



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διασύνδεση Αυτόνομων Οικισμών με Ανανεώσιμες Πηγές  
Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Παπαγγελή Αναστασία

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Φεβρουάριος 2023





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διασύνδεση Αυτόνομων Οικισμών με Ανανεώσιμες Πηγές  
Ενέργειας**

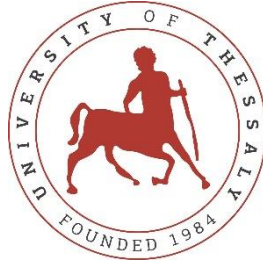
Διπλωματική Εργασία

Παπαγγελή Αναστασία

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Φεβρουάριος 2023





**UNIVERSITY OF THESSALY**  
**SCHOOL OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**Interconnection of Autonomous Villages with Renewable Energy  
Sources**

Diploma Thesis

Papageli Anastasia

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

February 2023



Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

**Μπαργιώτας Δημήτριος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

**Περαντζάκης Γεώργιος**

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

**Σταμούλης Γεώργιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας





## **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ**

### **ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

Παπαγγελή Αναστασία



## **DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS**

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Papageli Anastasia



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα για την πολύτιμη βοήθεια και για τις συμβουλές που μου έδωσε κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τις ευχαριστίες μου επίσης εκφράζω στον κύριο Σταμούλη Γεώργιο και τον κύριο Περαντζάκη Γεώργιο που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω απέραντη ευγνωμοσύνη μου στον πατέρα μου Γιάννη και στη μητέρα μου Ράνια για την ψυχολογική υποστήριξη και την συνεχή τους προσπάθεια να με καθοδηγούν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την αδερφή μου που ως φιλόλογος με βοήθησε στη δόμηση και στην σύνταξη της διπλωματικής.



## Διπλωματική Εργασία

# Διασύνδεση Αυτόνομων Οικισμών με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Παπαγγελή Αναστασία

## Περίληψη

Στη διάρκεια των τελευταίων δέκα χρόνων η έρευνα στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των ηλεκτρονικών ισχύος, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, έχει στρέψει την προσοχή της στην μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των ΑΠΕ, και κυρίως των φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία είναι περισσότερο διαδεδομένα. Οι ΑΠΕ παρουσιάζουν σημαντικά προτερήματα που σχετίζονται με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η εξέλιξη των ΑΠΕ και οι στόχοι που θέτονται από οργανισμούς για την μεγαλύτερη διείσδυση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, έχει οδηγήσει στην εξέλιξη των μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης. Ωστόσο, λόγω της διακοπτόμενης φύσης τους μελετώνται υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής τα οποία αποτελούν τον συνδυασμό ΑΠΕ και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να επιτυγχάνεται η τροφοδότηση των μικροδικτύων. Επιπλέον, για την αποτελεσματική διασύνδεση των συστημάτων αυτών, βασική προϋπόθεση αποτελεί ο κατάλληλος έλεγχος προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη παραγωγή των φωτοβολταϊκών, η διατήρηση της τάσης στο ζυγό του μικροδικτύου και η αποτελεσματική φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιείται η ανάλυση και η προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής και η διασύνδεση του σε ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης. Τέλος, η συνεισφορά της εργασίας είναι, με την προσομοίωση του συστήματος να πραγματοποιηθεί η μελέτη και η αξιολόγηση ενός αυτόνομου μικροδικτύου χωρίς την ύπαρξη διασύνδεσης με το δίκτυο διανομής, με την βοήθεια συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και ΑΠΕ. Επιπλέον, αναπτύσσεται και αξιολογείται ένας συνδυασμός στρατηγικών ελέγχου για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων.

### Λέξεις-κλειδιά:

ΣΗΕ, ηλεκτρονικά ισχύος, ΑΠΕ, μικροδίκτυο, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας





# **Interconnection of Autonomous Villages with Renewable Energy Sources**

Papageli Anastasia

## **Abstract**

During the last ten years, research in the field of electrical energy systems as well as power electronics, both at academic and industrial level, has turned its attention to the greatest possible exploitation of RES, and mainly PV systems which are more widespread. RES present significant advantages related to conventional forms of energy production, regarding the protection of the environment. In addition, the evolution of RES and the goals set by organizations for their greater penetration in electricity networks, has led to the development of DC and AC microgrids. However, due to their intermittent nature, hybrid power generation systems are being studied, which are the combination of RES and energy storage units, in order to achieve the supply of microgrids. In addition, for the effective interconnection of these systems, a basic condition is the appropriate control in order to achieve the maximum production of PV, the maintenance of the voltage on the microgrid balance and the efficient charging and discharging of the storage system. In this context, in this Diploma Thesis, the analysis and simulation of a hybrid power generation system and its interconnection in a DC microgrid is carried out. Finally, the contribution of the work is, with the simulation of the system, to carry out the study and evaluation of an autonomous microgrid without the existence of an interconnection with the distribution network, with the help of energy storage and RES systems. In addition, a combination of control strategies for implementing such systems is developed and evaluated.

## **Keywords:**

Power systems, power electronics, RES, microgrid, energy storage units



## Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i> .....	<i>xv</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i> .....	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων</i> .....	<i>xxv</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i> .....	<i>xxvii</i>
<b>Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο εργασίας .....	1
1.2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας .....	1
1.3 Εξέλιξη των Μοντέρνων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	3
1.4 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ζήτηση .....	5
1.5 Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	7
1.6 Έξυπνα Δίκτυα .....	8
1.6.1 Βασικά Συστατικά των έξυπνων δικτύων .....	11
1.6.2 Προγράμματα υποδομής των έξυπνων δικτύων .....	12
1.6.3 Το υπάρχον δίκτυο.....	13
1.6.4 Εξέλιξη του Έξυπνου Δικτύου .....	15
1.6.5 Μετάβαση στο Έξυπνο Δίκτυο.....	16
1.6.6 Έξυπνα μικροδίκτυα.....	17
1.6.7 Τοπολογία Μικροδικτύων .....	18
<b>Κεφάλαιο 2 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ</b> .....	<b>21</b>
2.1 Εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου .....	21
2.2 Ταξινόμηση των μικροδικτύων.....	22
2.3 Σχεδιασμός μικροδικτύων DC.....	22
2.3.1 Πρόβλεψη παραγωγής και φορτίου .....	23
2.3.2 Επιλογή τοπολογίας.....	24

<b>2.4 Έλεγχος μικροδικτύου DC.....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Ιεραρχικός έλεγχος .....	26
<b>2.5 Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου .....</b>	<b>27</b>
<b>2.6 Εμπόδια ανάπτυξης των μικροδικτύων .....</b>	<b>28</b>
2.6.1 Κοινωνικοπολιτισμικό .....	29
2.6.2 Οικονομικό.....	29
2.6.3 Περιβαλλοντικό .....	29
2.6.4 Θεσμικό.....	30
2.6.5 Τεχνικό .....	30
<b>Κεφάλαιο 3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Ανάλυση των μορφών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....</b>	<b>33</b>
3.2.1 Ηλιακή Ενέργεια .....	33
3.2.1 .1 Πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας .....	34
3.2.1 .2 Μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας .....	34
3.2.2 Αιολική Ενέργεια.....	35
3.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	37
3.2.4 Ενέργεια Βιομάζας.....	38
3.2.5 Γεωθερμία.....	39
3.2.6 Κυματική ενέργεια.....	40
<b>3.3 Εισαγωγή στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Φωτοβολταϊκή Μονάδα .....	47
<b>3.4 Είδη φωτοβολταϊκών πάνελ.....</b>	<b>47</b>
3.4.1 Φ/Β Ημιαγωγοί Λεπτών Υμενίων (thin films) .....	48
3.4.1 .1 Τύποι ηλιακών κυψελών λεπτού υμενίου .....	49
3.4.1 .2 Άμορφοι ηλιακοί συλλέκτες .....	49
3.4.1 .3 Πάνελ Τελλουρίου Καδμίου (CdTe) .....	50
3.4.1 .4 Ηλιακά πάνελ Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS) .....	51
3.4.1 .5 Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV) ηλιακά πάνελ .....	51
3.4.1 .6 Thin-Film vs Παραδοσιακά ηλιακά πάνελ.....	52
3.4.2 Φ/Β μονο-κρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon) .....	53
3.4.2 .1 Κατασκευή μονοκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ.....	53
3.4.2 .2 Εφαρμογές μονοκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών .....	54
3.4.2 .3 Κόστος μονοκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών .....	55
3.4.2 .4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μονοκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ .....	55

3.4.3 Φ/Β πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου (Multi-crystalline Silicon) .....	56
3.4.3 .1 Λειτουργία πολυκρυσταλλικών πάνελ .....	56
3.4.3 .2 Χαρακτηριστικά των πολυκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ .....	57
3.4.3 .3 Εφαρμογές πολυκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών .....	58
<b>3.5 Έλεγχος MPPT .....</b>	<b>59</b>
3.5.1 Εισαγωγή .....	59
3.5.2 Μέθοδοι υλοποίησης MPPT .....	59
3.5.2 .1 Αλγόριθμος διαταραχής και παρατήρησης (P&O) .....	60
3.5.2 .2 Αυξητικής αγωγιμότητας (InC) .....	62
3.5.2 .3 Μέθοδος κλασματικού ρεύματος βραχυκυκλώματος .....	64
3.5.2 .4 Μέθοδος τάσης ανοιχτού κύκλου .....	66
<b>Κεφάλαιο 4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1 Ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....</b>	<b>67</b>
4.1.1 Ενεργειακά Συστήματα και Δίκτυα .....	67
<b>4.2 Βασικές αρχές των Ηλεκτρονικών Ισχύος .....</b>	<b>70</b>
4.2.1 Ηλεκτρικές Συσκευές Ημιαγωγών .....	70
4.2.2 Τύποι μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος και βασικές τοπολογίες .....	72
4.2.3 Σύνθεση Μετατροπών Ηλεκτρονικών Ισχύος .....	73
4.2.4 Εισαγωγή στους μετατροπείς ισχύος dc dc .....	74
4.2.5 Boost converter .....	75
<b>4.3 Κλασικές τοπολογίες PDDC .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4 Τεχνικές διαμόρφωσης και ελέγχου .....</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Μετατροπείς DC/DC με MPPT .....</b>	<b>78</b>
4.5.1 Διαφορετικοί παράγοντες επηρεάζουν το MPPT .....	79
4.5.2 Σύγκριση επιδόσεων MPPT .....	79
<b>4.6 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση .....</b>	<b>81</b>
<b>4.7 Εφαρμογές πεδίου PDDC .....</b>	<b>81</b>
4.7.1 Φ/Β ισχύς .....	81
<b>4.8 Έλεγχος PI .....</b>	<b>82</b>
4.8.1 Συστήματα αυτόματου ελέγχου .....	82
4.8.2 Ελεγκτής PID .....	84
<b>4.9 Συμπεράσματα .....</b>	<b>85</b>
<b>Κεφάλαιο 5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....</b>	<b>87</b>

<b>5.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>87</b>
<b>5.2 Σύστημα αποθήκευσης φωτοβολταϊκού.....</b>	<b>88</b>
5.2.1 Χαμηλό κόστος.....	88
5.2.2 Αποτελεσματικότητα .....	89
5.2.3 Συντήρηση .....	89
<b>5.3 Λειτουργίες αποθήκευσης μπαταρίας σε φωτοβολταϊκό σύστημα .....</b>	<b>90</b>
5.3.1 Αποθήκευση και αυτονομία ενέργειας .....	90
5.3.2 Σταθεροποίηση τάσης .....	90
5.3.3 Ρεύμα παροχής υπέρτασης .....	90
<b>5.4 Αρχή λειτουργίας της μπαταρίας.....</b>	<b>90</b>
<b>5.5 Παράμετροι μπαταρίας .....</b>	<b>91</b>
5.5.1 Χωρητικότητα μπαταρίας .....	91
5.5.2 Τάση μπαταρίας.....	91
5.5.3 Βάθος εκκένωσης (DOD).....	91
5.5.4 Κύκλος ζωής της μπαταρίας .....	91
5.5.5 Ποσοστό εκφόρτισης/φόρτισης ή C – rate .....	92
5.5.6 Αυτοεκφόρτιση .....	92
<b>5.6 Τύποι μπαταριών.....</b>	<b>92</b>
5.6.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid) .....	92
5.6.1 .1 Μπαταρία τύπου “πλημμυρισμένης” κυψέλης (Flooded cell type battery) .....	93
5.6.1 .2 Σφραγισμένη/τύπου γέλης μπαταρία (Sealed /Gel type battery) .....	94
5.6.1 .3 Μπαταρίες με τζελ (Gelled batteries) .....	94
5.6.1 .4 Απορροφημένες μπαταρίες GAS MAT [AGM] (Absorbed GAS MAT [AGM] batteries).....	95
5.6.2 Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Ni - Cd).....	95
5.6.3 Μπαταρίες νικελίου υδρογόνου .....	96
5.6.4 Μπαταρίες Νικελεζάργυρου.....	97
5.6.5 Μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS).....	97
5.6.6 Μπαταρίες χλωριούχου νατρίου νικελίου .....	97
5.6.7 Μπαταρίες νικελίου – υδριδίου μετάλλου (Ni MH) .....	98
5.6.8 Μπαταρίες ιόντων λιθίου .....	98
5.6.9 Μπαταρίες πολυμερούς λιθίου .....	99
<b>5.7 Παράγοντες γήρανσης μπαταριών .....</b>	<b>100</b>
5.7.1 Διαστρωμάτωση με οξύ .....	100
5.7.2 Θείωση.....	100
5.7.3 Διάβρωση.....	101

5.7.4 Βραχυκύκλωμα .....	101
5.7.5 Χαμηλή θερμοκρασία .....	102
5.7.6 Υψηλή θερμοκρασία .....	102
<b>5.8 Προστασία και ρύθμιση μπαταριών .....</b>	<b>102</b>
5.8.1 Ρυθμιστής διακλάδωσης .....	103
5.8.2 Ρυθμιστής σειράς.....	103
5.8.3 Ρυθμιστής ηλεκτρομαγνητικής σειράς .....	103
5.8.4 Αυτόματος διακόπτης κυκλώματος.....	103
5.8.5 Εγκατάσταση μπαταρίας .....	103
<b>5.9 Σύγκριση τεχνικών παραμέτρων μπαταριών μολύβδου οξέος και ιόντων λιθίου .....</b>	<b>104</b>
5.9.1 Χρόνος φόρτισης.....	104
5.9.2 Κύκλος Ζωής .....	105
5.9.3 Ασφάλεια .....	105
5.9.4 Συντήρηση .....	106
5.9.5 Ανακύκλωση .....	107
5.9.6 Κεφάλαιο Κόστος.....	107
<b>5.10 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιδράσεων .....</b>	<b>107</b>
<b>5.11 Δικατευθυντήριος μετατροπέας Buck-Boost .....</b>	<b>108</b>
5.11.1 Λειτουργία .....	109
<b>Κεφάλαιο 6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 111</b>	
<b>6.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>111</b>
<b>6.2 Ανάλυση μοντέλου Simulink .....</b>	<b>111</b>
6.2.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία .....	112
6.2.2 Μοντελοποίηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter).....	113
6.2.3 Έλεγχος MPPT .....	115
6.2.4 Μοντελοποίηση δικατευθυντήριου μετατροπέα buck-boost.....	117
6.2.5 Ελεγκτής PI.....	118
6.2.6 Σύστημα μπαταρίας.....	120
6.2.7 DC μικροδίκτυο – σύστημα αντιστάσεων.....	121
<b>6.3 Αυτονομία μπαταρίας.....</b>	<b>122</b>
<b>6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....</b>	<b>123</b>
<b>Κεφάλαιο 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>127</b>
<b>7.1 Συμπεράσματα .....</b>	<b>127</b>

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	129
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>131</b>



## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 Μοντέρνο δίκτυο ενέργειας.....	4
Σχήμα 1.2 Καθολικό ΣΗΕ .....	5
Σχήμα 1.3 Αναπαράσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα .....	6
Σχήμα 1.4 Τυπική αναπαράσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου .....	6
Σχήμα 3.1 Δομή ενός ηλιακού κελιού .....	42
Σχήμα 3.2 Τυπική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	45
Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V σε διάφορες θερμοκρασίες.....	46
Σχήμα 3.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διάφορες τιμές ακτινοβολίας.....	46
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ροής της μεθόδου MPPT P&O .....	61
Σχήμα 3.6 Διαδρομή MPP με τον αλγόριθμο P&O κάτω από αργά (διακεκομμένη γραμμή) και γρήγορα (συνεχόμενη γραμμή) μεταβαλλόμενη ακτινοβολία. ....	62
Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με τις εξισώσεις της μεθόδου InC.....	63
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου InC.....	64
Σχήμα 3.9 Η τρισδιάστατη γραφική παράσταση των $I_{sc}$ και $I_{mp}$ για διακυμάνσεις ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.....	65
Σχήμα 3.10 Τρισδιάστατη γραφική παράσταση $V_{oc}$ και $V_{mp}$ για διακυμάνσεις ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.....	66
Σχήμα 4.1 Κύκλωμα ανοδικού μετατροπέα DC/DC .....	76
Σχήμα 4.2 Έλεγχος PI ανοιχτού βρόχου .....	83
Σχήμα 4.3 Σύστημα ελέγχου PI κλειστού βρόχου .....	84
Σχήμα 5.1 Δικατευθυντήριος μετατροπέας .....	109
Σχήμα 6.1 Block διάγραμμα φωτοβολταϊκού .....	112
Σχήμα 6.2 Χαρακτηριστικές I-V και P-V αντίστοιχα .....	113
Σχήμα 6.3 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost).....	114
Σχήμα 6.4 Χαρακτηριστικά mosfet.....	115
Σχήμα 6.5 Block ελέγχου MPPT.....	116

Σχήμα 6.6 Δικατευθυντήριος μετατροπέας buck-boost .....	117
Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστικά των διακοπών IGBT .....	118
Σχήμα 6.8 Block ελέγχου PI διπλού βρόχου .....	119
Σχήμα 6.9 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας – μπαταρία ιόντων λιθίου .....	120
Σχήμα 6.10 Block αντιστάσεων για τα φορτία των κατοικιών.....	122
Σχήμα 6.11 Κυματομορφές ρευμάτων .....	123
Σχήμα 6.12 Κυματομορφές τάσεων .....	124
Σχήμα 6.13 Κυματομορφές ισχύος, τάσεων και στάθμης φόρτισης .....	125
Σχήμα 6.14 Κυματομορφές ισχύος.....	125

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Λειτουργίες των έξυπνων δικτύων .....	10
Πίνακας 6.1 Φορτία κατοικιών.....	121





# **Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Αντικείμενο εργασίας**

Λόγω της εξέλιξης των μικροδικτύων συνεχούς τάσης και της διεύρυνσης της χρήσης των ΑΠΕ και των υβριδικών συστημάτων, στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση ενός συστήματος που αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό, μία μπαταρία και ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης, καθώς και η ανάπτυξη κατάλληλων μετατροπέων και στρατηγικών ελέγχου για την διασύνδεση του συστήματος. Επιπλέον, για την περαιτέρω αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο περιέχει τα παραπάνω συστήματα. Συγκεκριμένα, η βιβλιογραφική ανασκόπηση πραγματοποιείται σε τεχνολογίες ΑΠΕ, σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικροδίκτυα και σε έξυπνα δίκτυα, καθώς επίσης και σε μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση και τεχνικές ελέγχου μετατροπέων. Όσον αφορά την προσομοίωση, αυτή περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, έναν μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης ο οποίος ελέγχεται με έναν αλγόριθμο MPPT, έναν δικατευθυντήριο μετατροπέα συνεχούς τάσης ο οποίος χρησιμοποιείται για την διασύνδεση και τον έλεγχο του συστήματος της μπαταρίας στον ζυγό συνεχούς τάσης και στην τροφοδότηση των φορτίων. Επίσης αναπτύσσεται ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης, το οποίο αποτελείται από αντιστάσεις 2 κατοικιών, σε υπό κλίμακα μεγέθη και των οποίων η διασύνδεση γίνεται μέσω διακοπών, έτσι ώστε να εναλλάσσονται. Ο δικατευθυντήριος μετατροπέας ελέγχεται με έναν ελεγκτή PI ο οποίος διατηρεί την τάση του ζυγού σταθερή και ελέγχει το ρεύμα της μπαταρίας.

## **1.2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας**

Τα παραδοσιακά καύσιμα που παρέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας τόσο στην Ελλάδα όσο και στον υπόλοιπο κόσμο είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο κ.α. Παρ' όλη την ευρεία χρήση τους από τις καθημερινές συσκευές, μέχρι και για την θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες, εξακολουθούν να έχουν μειονεκτήματα που επηρεάζουν σημαντικά την όχι μόνο την κοινωνική και οικονομική ζωή των ανθρώπων αλλά και την

ανθρώπινη υγεία. Μερικά απ' αυτά τα μειονεκτήματα είναι ότι το πετρέλαιο κατά την καύση του δημιουργεί αέρια παραπροϊόντα που επηρεάζουν αρνητικά το στρώμα του όζοντος ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ακόμα προσβάλλουν το αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπινων οργανισμών δημιουργώντας υποβόσκοντα ανεπανόρθωτα προβλήματα όπως είναι ο καρκίνος. Οπότε με αφορμή τα διόλου ασήμαντα μειονεκτήματα των ορυκτών καυσίμων η έρευνα και ανάπτυξη στράφηκε σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μέχρι και σήμερα μια βιώσιμη λύση έτοιμη να καλύψει έως και το 30 – 40 % της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως [1].

Ανάμεσα στις ΑΠΕ ανήκει και η ενέργεια που παρέχεται από τον ήλιο, όπου τέτοια συστήματα εντάσσονται στα Φωτοβολταϊκά συστήματα που έχουν ενταχθεί όχι μόνο στην κύρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και στα οικιακά δίκτυα δημιουργώντας την αμφίδρομη ροή ισχύος στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, δηλαδή στην επιστροφή ενέργειας πίσω στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στη δεύτερη σημαντικότερη πηγή ενέργειας εντάσσεται η αιολική ενέργεια.

Η αιολική ενέργεια γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη στην Ελλάδα, εξαιτίας του ιδιαίτερου κλίματος και της μοναδικής δομής της. Αρχικά αξίζει να αναφερθεί ότι το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας αποτελείται από ένα διασυνδεδεμένο σύστημα στα νησιά, το οποίο παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στα πιο απομονωμένα νησιά αλλά και σε αυτά που εξαρτώνται ακόμα από πετρελαϊκούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχουν σοβαρά προβλήματα τεχνικά και οικονομικά όσο αναφορά την παροχή ενέργειας μέσω του διασυνδεδεμένου συστήματος, όπως μεγάλες απώλειες στα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η συντήρηση και διόρθωση σφαλμάτων σε υποβρύχια καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικώς η ανάγκη για αυτονόμηση αυτών των νησιών, δηλαδή για την αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναγκαία.

Το ιδιαίτερο κλίμα των νησιών με τους δυνατούς ανέμους αλλά και η ανάπτυξη του τομέα των ηλεκτρικών ισχύος οδήγησε στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων μέχρι μερικών MW.

Ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι ο εντοπισμός περιοχών με υψηλή ταχύτητα ανέμου. Ειδικότερα στα νησιά της Ελλάδας έρευνες έχουν δείξει ότι η Μύκονος και η Άνδρος έχουν μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 11,4 m/s και 8,5 m/s αντίστοιχα. Η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών στα νησιά για την διείσδυση της αιολικής ενέργειας δημιούργησε μεγάλα προβλήματα όσο αναφορά τον έλεγχο του φορτίου, καθώς κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών η ζήτηση σε ενέργεια είναι μεγάλη ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες η ζήτηση είναι λιγότερη. Παρ' όλα αυτά, υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο το καλοκαίρι και τον χειμώνα, αλλά το μέγεθος των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι επιλεγμένο κατάλληλα, ώστε να επιτυγχάνεται η ορθή λειτουργία του συνδυασμένου συστήματος των ανεμογεννητριών οποιαδήποτε στιγμή.

### **1.3 Εξέλιξη των Μοντέρνων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

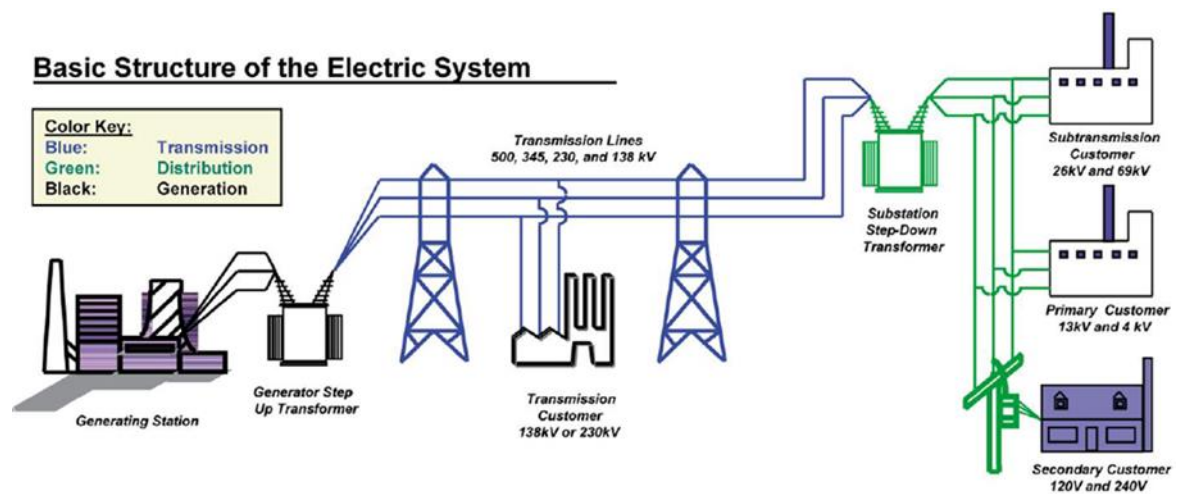
Η ανάπτυξη των πρώτων AC (Alternative Current) ξεκίνησε από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) το 1985 ένα τυπικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η πρώτη γραμμή μεταφοράς ήταν μιας φάσης και ήταν ικανή να μεταφέρει τόση ενέργεια όση θα χρειαζόταν για την τροφοδότηση φωτιστικών. Ακόμα και οι πρώτοι κινητήρες ήταν μιας φάσης, μέχρι που ο Νίκολας Τεσλα παρουσίασε δημοσίευση περί δυο φάσεων και πολυφασικών συστημάτων. Τα πλεονεκτήματα των πολυφασικών συστημάτων αναγνωρίστηκαν αμέσως και σταδιακά αντικατέστησαν τα DC (Direct Current) συστήματα στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας από τους κύριους λόγους της γρήγορης αποδοχής των AC συστημάτων ήταν οι μετασχηματιστές. Μέσω αυτών δόθηκε η δυνατότητα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλότερα επίπεδα τάσης για την μείωση των απωλειών και για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Επιπλέον, ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του AC συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι μέσω των μετασχηματιστών μέτρησης γίνεται εύκολη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου.

Από την άλλη μεριά, στα DC συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στο AC σύστημα, ενώ η σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς γίνεται μέσω ενός μετασχηματιστή για την διαμόρφωση του κατάλληλου επιπέδου τάσης



και με έναν ανορθωτή. Στο τέλος της γραμμής μεταφοράς υπάρχει ένας αντιστροφέας ισχύος για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε AC στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Επίσης, οικονομικές έρευνες ανά τακτά χρονικά διαστήματα έχουν δείξει ότι οι DC εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι συμφέρουν οικονομικά για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σε υψηλό επίπεδο τάσης. Τέτοιο παράδειγμα συστήματος αποτελεί το διασυνδεδεμένο HVDC (High Voltage Direct Current) σύστημα της Ελλάδας - Ιταλίας με επίπεδο τάσης 400 kV. Επιπροσθέτως, ένα ακόμα πλεονέκτημα της DC μεταφοράς έναντι της AC είναι η ικανότητα του να συνδέει ασύγχρονα ΣΗΕ μεταξύ τους όπως των 50-Hz και των 60-Hz.

Η πρώτη γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης λειτούργησε στα 500 kV το 1965, ενώ αργότερα το επίπεδο τάσης 765 kV. Σήμερα τα HVDC συστήματα έχουν φτάσει σε επίπεδο τάσης τα 1100 kV στην Κίνα, ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



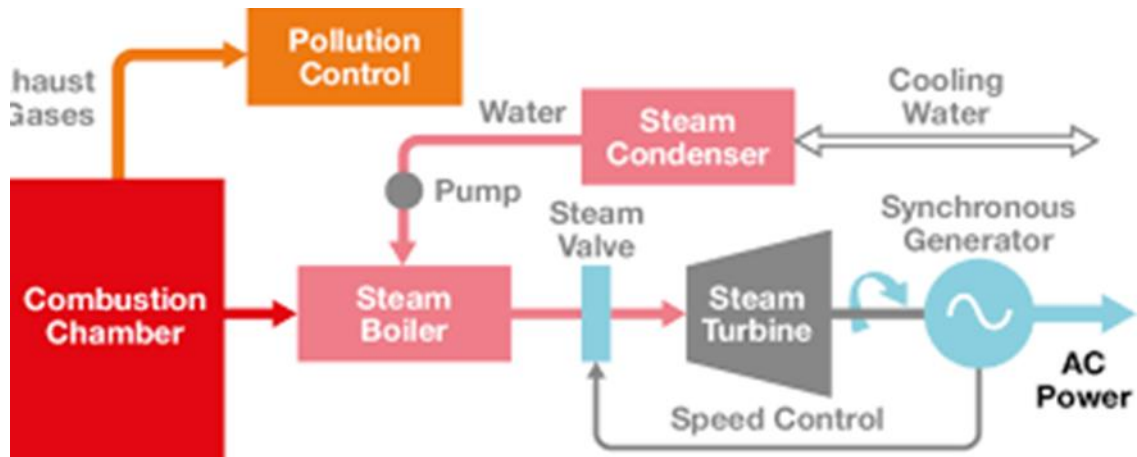
Σχήμα 1.1 Μοντέρνο δίκτυο ενέργειας



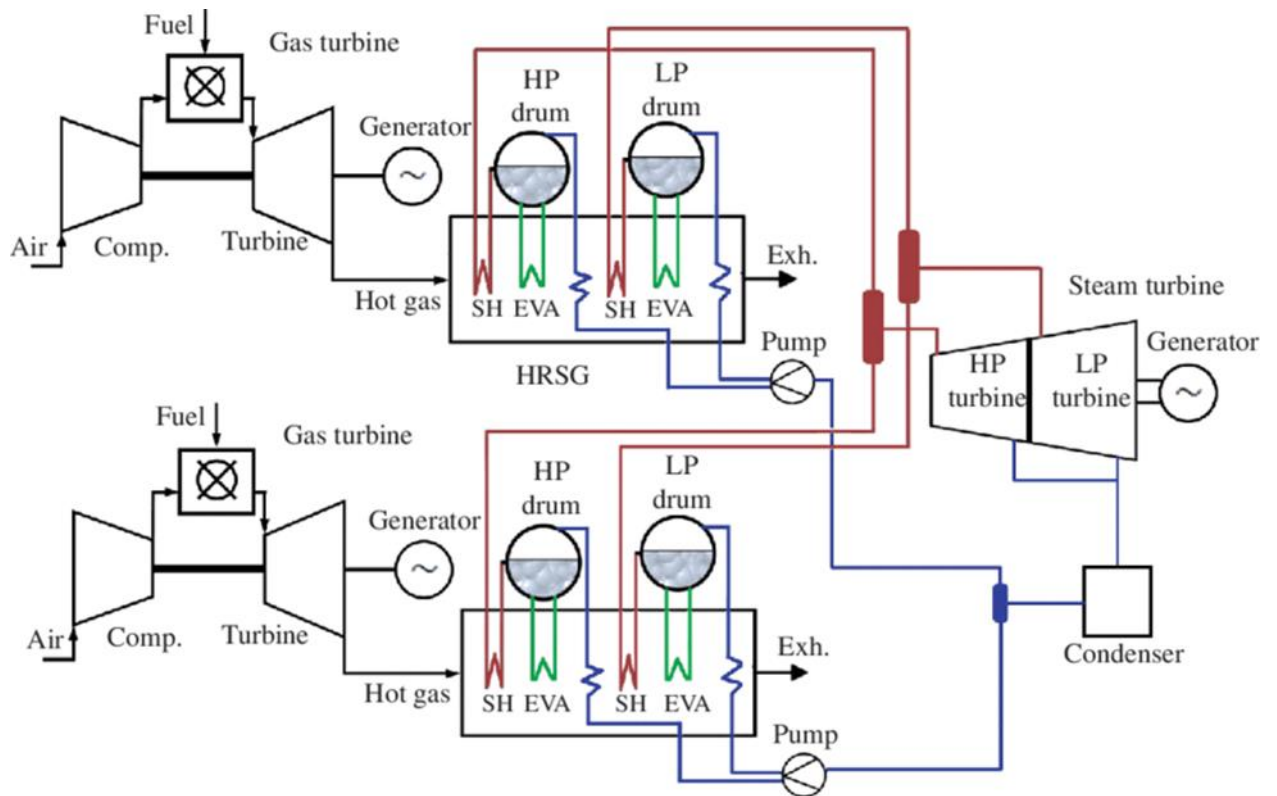
Σχήμα 1.2 Καθολικό ΣΗΕ

#### 1.4 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ζήτηση

Τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του φορτίου (κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή απαιτούμενη ενέργεια για διάφορες δραστηριότητες), ενώ η τάση και η συχνότητα κατά μήκος του δικτύου παραμένουν σταθερές. Στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διαφορετικά είδη μονάδων γεννητριών, η οποίες βασίζονται στη χρήση καυσίμου. Αυτές που χρησιμοποιούν ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα, τα οποία είναι μη ανανεώσιμα, κατηγοριοποιούνται ως θερμικά εργοστάσια παραγωγής, των οποίων οι γεννήτριες συνδέονται σε ατμοτουρμπίνες ή αεριοτουρμπίνες προκειμένου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτές που αναφέρονται ως ΑΠΕ. Οι ΑΠΕ συμπεριλαμβάνουν κυρίως την υδροηλεκτρική, την αιολική, την ηλιακή, την βιομάζα και την γεωθερμική ενέργεια. Στο Σχήμα 1.3 και Σχήμα 1.4 απεικονίζονται αναπαραστάσεις μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα και συνδυασμένου κύκλου αντίστοιχα.



Σχήμα 1.3 Αναπαράσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα



Σχήμα 1.4 Τυπική αναπαράσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου

Η ηλεκτρική ενέργεια καταλαμβάνει μια σημαντική μερίδα της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, η οποία συνεχίζει να αυξάνεται ραγδαία και τείνει να γίνει ακόμα μεγαλύτερη και απ' αυτή των ορυκτών καυσίμων. Αρχικά όμως χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, αφού επίσημα στατιστικά έχουν δείξει ότι ο άνθρακας παραμένει το πρωταρχικό χρησιμοποιούμενο ορυκτό καύσιμο για την

παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ακολουθούν οι μονάδες παραγωγής πυρηνικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση του πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε να μειώνεται από το 1970 δραστικά εξαιτίας της κρίσης για τα ελάχιστα αποθέματα του.

Ένα ακόμα θέμα που απασχόλησε την επιστημονική κοινότητα είναι οι τιμές των ορυκτών καυσίμων και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον όσο αναφορά τις εκπομπές παραπροϊόντων όπως διοξείδιο του άνθρακα εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου, γι' αυτό η έρευνα και ανάπτυξη στρέφεται προς την ανάπτυξη των υποκατάστατων ορυκτών καυσίμων και ειδικότερα τις ΑΠΕ. Η αιολική και ηλιακή ενέργεια ως ΑΠΕ είναι οι ταχύτερα αναπτυσσόμενες μορφές ενέργειας ενώ το φυσικό αέριο έρχεται δεύτερο. Επιπροσθέτως, μέχρι το ατύχημα στη Fukushima η πυρηνική ενέργεια θεωρούνταν μια πολλά υποσχόμενη μορφή ενέργειας αλλά αργότερα έχασε την αξιοπιστία της και θεωρήθηκε από πολλές χώρες επικίνδυνη και ακατάλληλη.

### **1.5 Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Η τάση στα άκρα μιας σύγχρονης γεννήτριας σε ένα ΣΗΕ συνήθως δεν ξεπερνάει τα 30 kV. Η μέγιστη ισχύς μιας ατμοτουρμπίνας που οδηγείτε από μια γεννήτρια μπορεί να φτάσει μέχρι τα 2000 MVA. Για τις περισσότερες χώρες, ονομαστική τάση του 1 kV ή λιγότερη αναφέρεται ως χαμηλή τάση, ενώ η μέση τάση αναφέρεται στο εύρος 1 kV μέχρι 69 kV. Τάσης μεγαλύτερες των 69 kV θεωρούνται ως το επίπεδο μεταφοράς ενώ μικρότερες από 69 kV επίπεδο διανομής. Συνήθως η τάση των γεννητριών ανυψώνεται στο επίπεδο τάσης της μεταφοράς στο εύρος από 115 kV έως 765 kV ή υψηλότερο. Το κανονικό επίπεδο τάσης είναι 115, 138 και 230 kV. Το Extra High Voltage (EHV) είναι 345, 500 και 765 kV. Γραμμές μεταφοράς με επίπεδο τάσης από 1100 kV έως 1500 kV θεωρείται η Ultra High Voltage (UHV).

Παρ' όλα αυτά, το HVDC σύστημα αρχίζει να γίνεται πιο ελκυστικό σε σχέση με τα παραπάνω επίπεδα μεταφοράς. Το σημαντικό σημείο στο HVDC είναι η μετατροπή της AC

τάσης σε DC στην αρχή της γραμμής μεταφοράς και η επαναφορά της σε AC τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Τα επίπεδα τάσης του HVDC έχουν ξεπεράσει τα 800 kV. Η χρήση των HVDC συστημάτων έχει νόημα όταν οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται αρκετά μακριά από τα φορτία, ενώ έχει αποδειχτεί ότι συμφέρουν οικονομικά σε σχέση με τα HVAC (High Voltage Alternative Current) για εναέριες γραμμές μεταφοράς αποστάσεως 600-800 km (ή υποβρύχιες γραμμές μεγαλύτερες των 50 km).

Υπόγειες γραμμές μεταφοράς στα δίκτυα μεταφοράς χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιοχές με υψηλό αριθμό πληθυσμού ή όταν δεν είναι δυνατό να εγκατασταθούν εναέριες γραμμές μεταφοράς, εξαιτίας των χωρικών περιορισμών ή δυσκολιών κατασκευής. Όταν οι αγωγοί θάβονται στο έδαφος, υλικά μονώσεως πρέπει να εφαρμοστούν σ' αυτούς.

## **1.6 Έξυπνα Δίκτυα**

Τα έξυπνα δίκτυα είναι ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία περιέχουν ευφυή συστήματα, τα οποία είναι εφικτό να προβλέπουν την συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών, με σκοπό να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή απόδοση, ασφάλεια και οικονομία. Μέσω αυτών των συστημάτων επιτυγχάνεται η ανταλλαγή δεδομένων μέσω τηλεμετρίας, καθώς και η ενεργειακή διαχείριση μεταξύ του φορτίου και της παραγωγής.

Τα έξυπνα δίκτυα αναφέρονται σε μια γενιά τεχνολογίας όπου οι διεργασίες ελέγχου στο σύστημα μεταφοράς και διανομής γίνονται απομακρυσμένα και αυτοματοποιημένα. Η υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνίας (π.χ. WiFi, Bluetooth, Zigbee (wireless), Homeplug (Power Line Carrier PLC)) στα παραδοσιακά δίκτυα ισχύος αποτέλεσε την στερεά υποδομή για την εγκαθίδρυση των έξυπνων δικτύων. Η εμφάνιση των έξυπνων δικτύων συνδέεται άρρηκτα με την ανάγκη για ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αξιόπιστα. Μέσω των αναπτυγμένων επικοινωνιών είναι δυνατό να συλλέγονται πληροφορίες για το δίκτυο ισχύος από διάφορα σημεία του δικτύου. Οι κύριες λειτουργίες που οδήγησαν τα παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα στα έξυπνα δίκτυα

είναι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, οι έξυπνοι μετρητές και οι προηγμένοι αισθητήρες, προηγμένες μέθοδοι ελέγχου του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και βελτιωμένες αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων τόσο στους διαχειριστές όσο και στους χρήστες του δικτύου. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα της συμμετοχής των καταναλωτών για την επίλυση των συστημάτων σε τοπικό επίπεδο, αμφίδρομη ροή ενέργειας στο δίκτυο διανομής, ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής και μονάδων αποθήκευσης, μετατροπή δικτύου διανομής από παθητικό σε ενεργό τμήμα των ΣΗΕ με έλεγχο, μετατροπή του δικτύου διανομής σε τμήμα των ΣΗΕ για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και αναδιάρθρωση του τομέα μεταφοράς.

Παρέχοντας υψηλής ποιότητας ισχύος και σε μεγάλο εύρος συγκαταλέγεται σε ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός έξυπνου δικτύου. Διανύοντας την εποχή της ψηφιακής οικονομίας, είναι εξαιρετικά σημαντική η παροχή αξιόπιστης ισχύος άρα και βιώσιμη ανάπτυξη της ηλεκτρικής αγοράς ισχύος είναι αποφευκτική αλλαγή. Επιπλέον, με την συνεχή αλλαγή της ζήτησης, το έξυπνο δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να καταγράφει και πολλές φορές να προβλέπει ορισμένα φορτία ώστε να είναι προετοιμασμένο για τις πηγές που θα πρέπει να είναι σε θέση να διαθέσει. Υπό τέτοια μεγάλη υποχρέωση από μέρους του δικτύου, αυτό θα πρέπει να εξελιχθεί σε περισσότερο ευφυές αλλά ακόμα και να αυτοματοποιήσει πολλές από τις ενέργειες του ελαχιστοποιώντας τον χρόνο απόκρισης του π.χ. σε αλλαγές στη ζήτηση των φορτίων αλλά και στην ανταπόκριση του σε πιθανά σφάλματα όπως βραχυκυκλώματα σε κάποιο σημείο του ΣΗΕ. Επιπροσθέτως, οι παραδοσιακές συσκευές προστασίας διακοπών ισχύος και ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους πρέπει να αντικατασταθούν με ψηφιακούς και ευφυείς ηλεκτρονόμους αλλά και με ηλεκτρονικές συσκευές παρακολούθησης και προστασίας. Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται οι λειτουργίες των έξυπνων δικτύων.

Πίνακας 1.1 Λειτουργίες των έξυπνων δικτύων

## Λειτουργίες

Sensing	Control	Protection
Wide Area Monitoring, Visualization, and Simulation	Power Flow Control	Fault Current Limiting
Diagnosis & Notification of Equipment Condition	Automated Feeder Switching	Dynamic Capability Rating
Real-Time Load Measurement and Management	Automated Islanding and Reconnection	Adaptive Protection
	Automated Voltage and VAR Control	Enhance Fault Protection
	Real-Time Load Transfer	
	Customer Electric Use Optimization	

Ο τομέας της βιομηχανίας που έχει ως σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου, νερού τροφοδοσίας και τη διαχείριση αποβλήτων προσπαθεί να αντιμετωπίσει πολλά ζητήματα, όπως την τροποποίηση της παραγωγής, την ανάπτυξη των περιουσιακών στοιχείων, την κάλυψη της ζήτησης, την εξοικονόμηση της ενέργειας και το αποτύπωμα άνθρακα στον τομέα της παραγωγής. Ωστόσο, τα παραπάνω δεν μπορούν να επιλυθούν με την παρούσα υποδομή του παρόντος δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί έναν τομέα που αναπτύσσεται σε μία μόνο κατεύθυνση. Κατά την μετατροπή της ενέργειας καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέπεται μόνο το ένα τρίτο, χωρίς να ανακτάται πίσω η απορριπτόμενη θερμότητα. Κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος, μέσω των γραμμών μεταφοράς, το 8% της ενέργειας χάνεται με τη μορφή θερμότητας. Επίσης, το 20% της παραγωγής του δικτύου καλύπτει την αιχμή της ζήτησης και έτσι, χρησιμοποιείται μόνο το 5% της παραγόμενης ενέργειας.

Το δίκτυο, αντιμετωπίζει μια σειρά προβλημάτων, λόγω της ιεραρχικής διάταξης των στοιχείων του.

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που θα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο μέλλον και ορίζεται ως «έξυπνο δίκτυο» πρόκειται να λύσει τα ζητήματα του υπάρχοντος δικτύου. Το έξυπνο δίκτυο πρέπει να προσφέρει στις δημόσιες επιχειρήσεις και οργανισμούς έναν ολοκληρωτικό έλεγχο της παρουσίας και των υπηρεσιών τους. Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μπορεί να λύνει τα προβλήματα του συστήματος που προκύπτουν. Τέλος, ακόμα μία υποχρέωση που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για την φυσιολογική λειτουργία του δικτύου είναι η κατανόηση των καινούργιων όρων της συνεργασίας των μερών του συστήματος προκειμένου να υλοποιούνται οι ενεργειακές συναλλαγές σε όλο το δίκτυο.

#### 1.6.1 Βασικά Συστατικά των έξυπνων δικτύων

Το έξυπνο δίκτυο αποτελεί την σύνδεση μεταξύ της τεχνολογίας της πληροφορίας και της τεχνολογίας των επικοινωνιών ανάλογα με το σύστημα ισχύος, προκειμένου να υλοποιηθεί ο κατάλληλος έλεγχος του συστήματος. Οι αιτίες των προβλημάτων που δημιουργούνται σε ένα ΣΗΕ εντοπίζονται στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σημείο εκκίνησης του συστήματος για την επαναφορά του δικτύου να είναι σταθερό στο κάτω μέρος της αλυσίδας. Οι δημόσιες υπηρεσίες τονίζουν ότι ο αυτοματισμός της διανομής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες δυνατότητες με την πάροδο του χρόνου. Σύμφωνα με τις δυνατότητες αυτές, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η επικοινωνία και η διαχείριση δεδομένων. Με την εξέλιξη των δύο αυτών τομέων, η τεχνητή νοημοσύνη θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, τόσο στην τωρινή όσο και στην μελλοντική υποδομή των δημόσιων οργανισμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την εξέλιξη των επιχειρήσεών τους, με γνώμονα την ενσωμάτωση των καινούργιων εφαρμογών και διαδικασιών. Συμπερασματικά, για την βέλτιστη εκμετάλλευση του συστήματος ενέργειας, μέσω της αξιοποίησης της τεχνολογίας επικοινωνιών και της τεχνολογίας της πληροφορίας γίνεται χρήση καινούργιων προσεγγίσεων, τεχνολογιών και εφαρμογών. Αυτό, επιφέρει την σταδιακή ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων, με τις προσεγγίσεις της αρχιτεκτονικής, των πρωτοκόλλων και των προτύπων.



### 1.6.2 Προγράμματα υποδομής των έξυπνων δικτύων

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα για τις διάφορες τεχνολογικές καινοτομίες, στον τομέα της ενέργειας, λόγω της εξέλιξης των βιομηχανιών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθούν, παγκοσμίως, με σταθερούς ρυθμούς να ενσωματώσουν καινούργιες τεχνολογίες σε αρκετούς τομείς της λειτουργίας και της υποδομής τους. Σημαντικό στοιχείο της αλλαγής αυτής, αποτελεί η απαίτηση για την βέλτιστη χρήση των περιουσιακών στοιχείων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τεχνολογική εξέλιξη των ηλεκτρικών δικτύων έχει ως αποτέλεσμα, την σταδιακή εμφάνιση εφαρμογών που θα επιτρέψουν την μετατροπή των υπάρχοντων ηλεκτρικών δικτύων σε έξυπνα δίκτυα. Συμπεραίνεται πως η βασική λειτουργία του έξυπνου δικτύου στηρίζεται στην ενσωμάτωση των στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση των έξυπνων δικτύων βασίζεται στην ενσωμάτωση εφαρμογών, όπως είναι η παρακολούθηση της ποιότητας ισχύος του δικτύου. Για παράδειγμα, για την πλήρη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών στα οικιακά δίκτυα.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, με την κατάλληλη αξιοποίηση των περιουσιακών τους στοιχείων μπορούν να συμβάλλουν στην εξέλιξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, σε έξυπνα δίκτυα. Ως συνέπεια, το έξυπνο δίκτυο θα λειτουργεί με την χρήση κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης του. Η εξέλιξη αυτή, θα οδηγήσει τις δημόσιες υπηρεσίες και τους οργανισμούς να επιτύχουν την επίτευξη της δημιουργίας ενός νέου έξυπνου δικτύου, το οποίο θα περιλαμβάνει τις λειτουργίες ενός συμβατικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και καλύτερο έλεγχο της ζήτησης.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, αναμένεται πρόοδος στην ενσωμάτωση της κατανεμημένης παραγωγής, καθώς και στην συμπαραγωγή ενέργειας. Αυτό θα επιτυγχάνεται, μέσω της πρόβλεψης της ενσωμάτωσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας,

με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών άνθρακα ενός συστήματος. Επιπρόσθετα, οι εταιρίες διαχείρισης των έξυπνων δικτύων θα διαθέτουν πόρους προκειμένου να επιτύχουν μεγαλύτερη απόδοση συστήματος, εξοικονόμηση ενέργειας και έλεγχο της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Παρόλα αυτά, οι δημόσιες επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν κάποια προβλήματα. Βασικό προβληματισμό, για τις εταιρίες διαχείρισης των έξυπνων δικτύων αποτελεί η οικονομικά αποδοτική ενσωμάτωση των νέων λειτουργιών, καθώς και η αποφυγή ύπαρξης κινδύνου στις υπηρεσίες. Επιπρόσθετα, αυτές θα πρέπει να ελέγξουν τις στρατηγικές και το πλάνο που θα ακολουθηθεί, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μεγαλύτερη απόδοση των επενδύσεων τους.

Όπως συμβαίνει με τις περισσότερες νέες τεχνολογίες, οι αναπτυσσόμενες χώρες σημειώνουν ένα πλεονέκτημα, όσον αφορά την ενσωμάτωση των έξυπνων δικτύων. Σε σχέση με τις ανεπτυγμένες χώρες, λόγω της απουσίας υπάρχοντων συστημάτων μεγάλης κλίμακας, οι αναπτυσσόμενες μπορούν να εξελιχθούν χωρίς να απαιτείται η συνεργασία με τα υπάρχοντα συστήματά τους.

### 1.6.3 Το υπάρχον δίκτυο

Το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο είναι αποτέλεσμα της αστικοποίησης και της εξέλιξης των υποδομών σε πολλές περιοχές παγκοσμίως. Οι εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, αν και βρίσκονται σε αρκετές περιοχές, έχουν, γενικά, όμοιες τεχνολογίες. Η πρόοδος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες που είναι ξεχωριστοί για κάθε μία από τις επιχειρήσεις αυτές. Αυτοί οι παράγοντες είναι οικονομικοί, πολιτικοί και γεωγραφικοί.

Παρόλα αυτά, η διάταξη του παρόντος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δεν σημείωσε μεταβολές. Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θέσει μερικούς περιορισμούς μεταξύ

των υποσυστημάτων παραγωγής, μετάδοσης και διανομής της ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού, εξέλιξης και μετασχηματισμού.

Το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα το οποίο βασίζεται σε ιεραρχικό έλεγχο. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής στο ανώτερο μέρος της πυραμίδας εξασφαλίζουν την ενέργεια που παρέχεται στους καταναλωτές οι οποίοι βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο της πυραμίδας. Λόγω της δομής και της λειτουργίας του υπάρχοντος δικτύου, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας δεν διαθέτουν πληροφορίες, σχετικά με τη ζήτηση, σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το δίκτυο να είναι υπερδιαστασιοποιημένο προκειμένου να εξασφαλίζει την μέγιστη ζήτηση αιχμής σε όλο το φορτίο του. Όμως, η ζήτηση αιχμής δεν είναι συχνή και έτσι το σύστημα θεωρείται οικονομικά μη αποδοτικό.

Επιπρόσθετα, η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την αργή ανάπτυξη των υποδομών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ευστάθεια του συστήματος. Συγκεκριμένα, αυτή η μεγάλη αύξηση που έχει σημειωθεί στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει προκαλέσει την μείωση των περιθωρίων ασφαλείας του δικτύου. Αυτό μπορεί να έχει ως πιθανό αποτέλεσμα την δημιουργία προβλημάτων στο δίκτυο, λόγω της καταπόνησης του υπάρχοντος εξοπλισμού.

Προκειμένου να επιλυθούν τα πιθανά προβλήματα και να επιτευχθεί η διασφάλιση της λειτουργίας του υπάρχοντος συστήματος, οι εταιρίες παροχής βασικών αγαθών (ηλεκτρική ενέργεια, νερό, φυσικό αέριο) έχουν εξασφαλίσει την χρήση συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Ένα παράδειγμα, το οποίο είναι ευρέως γνωστό, αποτελεί το σύστημα εποπτικού ελέγχου και απόκτησης δεδομένων (SCADA). Αν και αυτά τα συστήματα προσφέρουν περιορισμένο έλεγχο των λειτουργιών τους, το δίκτυο διανομής λειτουργεί χωρίς έλεγχο σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το φαινόμενο κυριαρχεί σχεδόν σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, στη Βόρεια Αμερική, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τα πιο ανεπτυγμένα παγκοσμίως. Ωστόσο, το ποσοστό του δικτύου διανομής που

λειτουργεί με συστήματα πληροφοριών και επικοινωνιών δεν ξεπερνά το 25%. Επιπλέον, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, σε επίπεδο παρόχου, δεν ξεπερνούν το 20% του συστήματος.

#### 1.6.4 Εξέλιξη του Έξυπνου Δικτύου

Το 90% των διακοπών ρεύματος και των διαταραχών στα ΣΗΕ οφείλονται στο δίκτυο διανομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εξέλιξη των έξυπνων δικτύων να έχει ως αφετηρία τα δίκτυα διανομής.

Επιπρόσθετα, η απότομη αύξηση του κόστους των ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με την ανάγκη επέκτασης των υπαρχόντων υποδομών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει την απαίτηση αναδιοργάνωσης του δικτύου διανομής με την βοήθεια τεχνολογιών που συμβάλλουν στην ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην διαχείριση και προστασία των εσόδων των εταιριών.

Μία από τις σημαντικότερες επενδύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα συστήματα διανομής αφορά την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών στο δίκτυο. Τα συστήματα αυτά, παρέχουν στις εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας την δυνατότητα να ελέγχουν, χωρίς τη φυσική παρουσία κάποιου ανθρώπου στον χώρο της εγκατάστασης, τα αρχεία κατανάλωσης και το είδος των πιθανών βλαβών των εγκαταστάσεων.

Παρότι, η εξέλιξη των συστημάτων των έξυπνων μετρητών ήταν σημαντική, οι εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης της ενέργειας υποστηρίζουν ότι τα συστήματα αυτά δεν επιλύουν το πρόβλημα που δημιουργεί η αυξημένη ζήτηση. Τα συστήματα έξυπνων μετρητών περιορίζονται στην ανάγνωση δεδομένων του δικτύου, καθώς η λειτουργία τους αφορά μόνο την μετάδοση πληροφοριών προς τον διαχειριστή. Το σύστημα αυτό δεν δέχεται τις διορθωτικές ενέργειες που μπορεί να απαιτούνται για την αποκατάσταση

προβλημάτων. Αντίθετα, στα συστήματα, που είναι απαραίτητα για την πλήρη μετάβαση στα έξυπνα δίκτυα, ο έλεγχος του δικτύου είναι απαραίτητος.

Τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα, οι απλοί έξυπνοι μετρητές να μην αφομοιωθούν πλήρως από την αγορά. Αντίθετα, οι εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας στράφηκαν προς τους εξελιγμένους έξυπνες μετρητές, οι οποίοι προσφέρουν την δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας, η οποία περιλαμβάνει τόσο τη μετάδοση πληροφοριών του διαχειριστή αλλά και την ικανότητα μετασχηματισμού των παραμέτρων των καταναλωτών. Οι δημόσιες υπηρεσίες, μπορούν να εξελιχθούν στην διαχείριση φορτίου και στην προστασία εσόδων. Επίσης, μπορούν να συλλέξουν πληροφορίες για την ατομική ζήτηση κάθε καταναλωτή αλλά και για τη συνολική ζήτηση. Επιπρόσθετα, είναι εφικτό να επιβάλλουν κάποια όρια στην κατανάλωση και καθιερώνουν ορισμένα επίπεδα εσόδων για τον έλεγχο του κόστους τους.

Η εμφάνιση των εξελιγμένων έξυπνων μετρητών διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο για την ενίσχυση των αντιλήψεων σχετικά με τα έξυπνα δίκτυα. Για την μεγαλύτερη αφομοίωση των εξελιγμένων έξυπνων μετρητών από τις δημόσιες επιχειρήσεις, λαμβάνεται υπόψη η μελλοντική συμβατότητα τους με τις τοπολογίες και τις τεχνολογίες των έξυπνων δικτύων που θα εφαρμοστούν στο μέλλον.

#### 1.6.5 Μετάβαση στο Έξυπνο Δίκτυο

Ως συνέπεια των παραπάνω, το έξυπνο δίκτυο θα πρέπει να θέσει σε λειτουργία την υποδομή των εξελιγμένων έξυπνων μετρητών. Προκειμένου να γίνει εφικτή η εξέλιξη των εξελιγμένων έξυπνων μετρητών, το έξυπνο δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να ενσωματώσει την κατανεμημένη στρατηγική διοίκησης και ελέγχου. Ο έλεγχος που υλοποιεί το έξυπνο δίκτυο είναι απαραίτητο να υπάρχει σε όλες τις τοπολογίες, τα στοιχεία και τις λειτουργίες του συστήματος. Ωστόσο, ο διαχωρισμός των τριών αυτών στοιχείων είναι απαραίτητος, αφού έτσι προσδιορίζεται η τοπολογία του έξυπνου δικτύου και των συστατικών του στοιχείων.

### 1.6.6 Έξυπνα μικροδίκτυα

Το έξυπνο δίκτυο είναι η ενοποίηση όλων των τεχνολογιών, εννοιών, τοπολογιών και προσεγγίσεων που αντικαθιστούν την παραγωγή στερεών υλικών, την μετάδοση και διανομή τους, με ένα έξυπνο περιβάλλον. Στο περιβάλλον αυτό, οι στόχοι και οι ανάγκες των καταναλωτών βασίζονται στην ανταλλαγή δεδομένων, υπηρεσιών και συναλλαγών. Συνεπώς, ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα πλέγμα που έχει τη δυνατότητα καθορισμού της μονάδας και της τοπολογίας παραγωγής, όπως είναι η κεντρική, η κατακεντρωμένη, η διακοπτόμενη και η κινητή. Το έξυπνο δίκτυο προσφέρει στους καταναλωτές την αλληλεπίδραση με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να γίνει προσαρμογή της χρήσης ενέργειας αλλά και για να μειωθεί το ενεργειακό τους κόστος. Σε ένα έξυπνο δίκτυο μπορούμε επίσης να σκεφτούμε τον όρο αυτοθεραπεία, καθώς το ίδιο διαθέτει συστήματα πρόβλεψης πιθανών αστοχιών που μπορεί να συμβούν κατά τη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον διαθέτει συστήματα ελέγχου, προκειμένου να λαμβάνει τα κατάλληλα μέτρα, ώστε να αποφευχθεί ή να μετριαστεί ο όγκος των προβλημάτων του συστήματος. Ένα έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιεί ένα σύστημα δικτύου IT προκειμένου να ενισχύεται, συνεχώς, η χρήση των υπάρχοντων υποδομών και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιείται το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης.

Με βάση τη δομή του έξυπνου δικτύου, η οποία διαμορφώνεται με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι αυτό δεν πρέπει να αντικαθιστά το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αντίθετα, πρέπει να το συμπληρώνει. Το έξυπνο δίκτυο θα συνυπάρχει, δηλαδή, με το υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύοντας τις λειτουργίες και τις δυνατότητές του. Αυτό έχει ως απαίτηση, την ύπαρξη μιας τοπολογίας για το έξυπνο δίκτυο, η οποία θα επιτρέπει την οργανική ανάπτυξη, την ενσωμάτωση μελλοντικών τεχνολογιών και τη συμβατότητα με τα παλαιά συστήματα.

Το έξυπνο δίκτυο, έχει ως σκοπό την ενοποίηση συμπληρωματικών στοιχείων, υποσυστημάτων και λειτουργιών με τη χρήση ενός ελέγχου κατακεντρωμένου συστήματος εντολών. Επιπρόσθετα, η εξέλιξη του έξυπνου δικτύου ενισχύεται από την ενσωμάτωση ορισμένων plug-and-play βασικών δομών που ονομάζονται ευφυή (ή έξυπνα)

μικροδίκτυα. Τα μικροδίκτυα είναι διασυνδεδεμένα δίκτυα κατανεμημένων ενεργειακών συστημάτων (φορτίων και πηγών ενέργειας) που λειτουργούν είτε συνδεδεμένα είτε χωριστά από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 1.6.7 Τοπολογία Μικροδικτύων

Ένα έξυπνο δίκτυο μικροδικτύων που έχει τη δυνατότητα λειτουργίας τόσο συνδεδεμένα στο δίκτυο όσο και σε κατάσταση νησιδοποίησης, αντιπροσωπεύεται συνήθως από τα επόμενα επτά στοιχεία:

- Ενσωματώνει σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για την κάλυψη της τοπικής ζήτησης αλλά και για τη τροφοδότηση της περίσσειας ενέργειας πίσω στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ορίζονται ως συμπαραγωγοί και χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος, ο ήλιος και η βιομάζα. Κάποια μικροδίκτυα συμπεριλαμβάνουν θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα ανάκτησης της θερμικής ενέργειας που αποβάλλεται κατά την διαδικασία παραγωγής. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού και ανακυκλώνουν την απορριπτόμενη θερμότητα με τη μορφή τηλεψύξης ή τηλεθέρμανσης στην κατοικημένη περιοχή που βρίσκεται κοντά στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Χρησιμοποιεί την τοπική και κατανεμημένη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για την διευθέτηση της διακοπτόμενης λειτουργίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Περιλαμβάνει έξυπνους μετρητές και αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να μετρούν πολλές παραμέτρους κατανάλωσης όπως είναι η ενεργή ισχύς, η άεργος ισχύς, η τάση, το ρεύμα και η ζήτηση, με αποδεκτή ακρίβεια. Οι έξυπνοι μετρητές θα πρέπει να αντέχουν την θερμική καταπόνηση και να μπορούν να εφαρμόζουν έλεγχο στο φορτίο.

- Ενσωματώνει υποδομές επικοινωνίας, σύμφωνα με τις οποίες τα στοιχεία του συστήματος ανταλλάσσουν τις πληροφορίες και τις εντολές με ασφάλεια και αξιοπιστία.
- Ενσωματώνει έξυπνες συσκευές στα φορτία οι οποίες έχουν την δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες, καθώς και να δέχονται εντολές από τον διαχειριστή, προκειμένου να ελέγχεται η λειτουργία τους αλλά και το επίπεδο εξυπηρέτησής τους με βάση τις απαιτήσεις των καταναλωτών.
- Ενσωματώνει έναν έξυπνο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από ενσωματωμένα στοιχεία δικτύωσης, υπολογιστών και επικοινωνιών. Επίσης, παρουσιάζεται στους χρήστες με τη μορφή εφαρμογών διαχείρισης ενέργειας οι οποίες δέχονται τον έλεγχο σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Τα στοιχεία αυτά, είναι απαραίτητο να μπορούν να αναγνωρίζουν όλα τα φορτία, να τους υποβάλλουν ερωτήματα, να ανταλλάσσουν δεδομένα και εντολές μαζί τους και να διαχειρίζονται τα δεδομένα για προγραμματισμένη ή κατ' απαίτηση μεταφορά στο υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης που βρίσκεται στο έξυπνο δίκτυο.





## Κεφάλαιο 2 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) τα οποία τροφοδοτούν τους χρήστες κατά κύριο λόγο από μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται σε κρίση, λόγω της αυξημένης χρήσης ορυκτών καυσίμων και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που αυτά προκαλούν. Επιπρόσθετα, ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα των παραδοσιακών ΣΗΕ είναι οι αυξημένες απώλειες λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας[2]. Επιπλέον, η αύξηση της ζήτησης ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχει επιφέρει σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια του συστήματος. Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει στην ανάπτυξη μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης [3].

Τα μικροδίκτυα ορίζονται από ορισμένα πρότυπα όπως είναι το IEEE Std 2030.8-2018, IEC TS 62898-1:2017. Ως μικροδίκτυο ορίζεται η διασύνδεση κατανεμημένων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΠΕ, συσσωρευτές, γεννήτριες ντίζελ) και φορτίων. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί είτε διασυνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο διανομής είτε σε νησιδοποίηση [4]. Τα μικροδίκτυα αποτελούν μια σημαντική λύση προκειμένου να επιτευχθεί ο περιορισμός της εξάρτησης μεταξύ των καταναλωτών και των παραδοσιακών ΣΗΕ. Στην ανάπτυξη των μικροδικτύων έχει συντελέσει σε μεγάλο βαθμό η εξέλιξη των ΑΠΕ και των ηλεκτρονικών ισχύος μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η διασύνδεσή τους στο μικροδίκτυο, καθώς και ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος. Σύμφωνα με [5] [6] αναμένεται η ανάπτυξη των μικροδικτύων τα επόμενα χρόνια, λόγω της βελτίωσης της ποιότητας ισχύος και της παροχής ενέργειας από εναλλακτικές πηγές όταν τα ΣΗΕ αδυνατούν να τροφοδοτήσουν τους καταναλωτές λόγω προβλημάτων όπως διακοπές ρεύματος ή από άλλα σφάλματα.

Ωστόσο, είναι απαραίτητο να επιλυθούν προβλήματα των μικροδικτύων που σχετίζονται με την αμφίδρομη ροή ισχύος, με τον τύπο διαμόρφωσης του συστήματος, καθώς και με

τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη νησιδοποίηση του μικροδικτύου. Παρά τη συμβολή των ΑΠΕ στην ανάπτυξη των μικροδικτύων, η διακοπτόμενη συμπεριφορά τους, λόγω διαφορετικών καιρικών συνθηκών, μπορεί να επιφέρει προβλήματα τα οποία επηρεάζουν τη συχνότητα, την τάση και την ενεργό και άεργο ισχύ. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων ελέγχου μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η ευστάθεια και αξιοπιστία του συστήματος [7].

Παρόλο που η επιλογή της τοπολογίας των μικροδικτύων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποδοτική ενσωμάτωση των καταναλωμένων παραγωγών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οι μελέτες που έχουν γίνει σε αυτό το επιστημονικό πεδίο περιορίζονται σε παράγοντες που δεν επιτρέπουν μια ολοκληρωμένη ανάλυση των τοπολογιών, των εφαρμογών, καθώς και τα χαρακτηριστικά ή τεχνικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η αξιολόγηση των τοπολογιών γίνεται με γνώμονα τα χαρακτηριστικά του ρεύματος (DC ή AC), τις τεχνικές ελέγχου μέσω των μετατροπών ισχύος που χρησιμοποιούνται, το κόστος λειτουργίας. Επίσης, η αξιολόγηση στηρίζεται στην μετάβαση μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών του μικροδικτύου.

## **2.2 Ταξινόμηση των μικροδικτύων**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένα μικροδίκτυο αποτελείται από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και καταναλωτές και δύναται να λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε λειτουργία νησιδοποίησης. Απαραίτητη προϋπόθεση της λειτουργίας ενός μικροδικτύου αποτελεί η ύπαρξη καθορισμένων ορίων που αφορούν την ποιότητα ισχύος [8].

## **2.3 Σχεδιασμός μικροδικτύων DC**

Κατά τον σχεδιασμό και την λειτουργία μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος υπάρχουν σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μερικοί από αυτούς είναι ο οικονομικός, ο οικολογικός αντίκτυπος και η αξιοπιστία. Τόσο ο κατάλληλος σχεδιασμός

ενός μικροδικτύου, όσο και η σωστή εκτέλεση αυτού έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στη λειτουργία όσο και στην αξιοπιστία και σταθερότητα του συστήματος.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ένα DC μικροδίκτυο δύναται να λειτουργήσει τόσο σε λειτουργία διασύνδεσης με το δίκτυο όσο και σε λειτουργία νησίδας. Ο κατάλληλος σχεδιασμός των μονάδων παραγωγής αλλά και της ενεργειακής διαχείρισης του συστήματος αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να επιτευχθεί η αξιοπιστία του συστήματος κατά την εμφάνιση σφαλμάτων, βυθίσεων ή ανυψώσεων της τάσης και οποιωνδήποτε άλλων διαταραχών. Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη ο οικονομικός παράγοντας στον οποίο περιλαμβάνονται το κόστος επένδυσης, το κόστος λειτουργίας, το κόστος συντήρησης και αξιοπιστίας [9]. Το συνολικό κόστος επένδυσης αποτελείται από το βραχυπρόθεσμο και το μακροπρόθεσμο κόστος. Το βραχυπρόθεσμο κόστος υπολογίζεται ανά ώρα κατά τη διάρκεια ενός σύντομου χρονικού ορίζοντα, ενώ το μακροπρόθεσμο υπολογίζεται ετησίως. Το κόστος αξιοπιστίας βασίζεται στον δείκτη αξιοπιστίας κατά τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού. Τα μικροδίκτυα μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικές μονάδες παραγωγής, όπως είναι φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα, κυψέλες καυσίμου καθώς και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές). Επιπλέον, μπορεί να περιλαμβάνουν συστοιχίες υπερπυκνωτών, φορτία συνεχούς ρεύματος και φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία V2G (Vehicle to grid) μπορούν να χρησιμοποιούν τα ηλεκτρικά οχήματα ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.

### 2.3.1 Πρόβλεψη παραγωγής και φορτίου

Η ενεργειακή διαχείριση των μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, λόγω της διακοπτόμενης φύσης των ΑΠΕ. Η διακύμανση που απαντάται στην ισχύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην λειτουργία των μικροδικτύων συνεχούς τάσης. Έτσι η πρόβλεψη παραγωγής των ΑΠΕ αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού ενός μικροδικτύου. Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτή η πρόβλεψη γίνεται χρήση ποικίλων επιστημονικών πεδίων, όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα η μηχανική μάθηση αλλά και άλλες απλούστερες μέθοδοι [10].

Προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός μικροδικτύου χρησιμοποιούνται υβριδικές κατανεμημένες γεννήτριες. Επίσης, ένας παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο μικροδίκτυο είναι η διακύμανση στο προφίλ φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη χρήση μοντέλων πρόβλεψης και στην περίπτωση του προφίλ φορτίου, έτσι ώστε να γίνεται η κατάλληλη ενεργειακή διαχείριση για την κάλυψη των καταναλωτών. Συμπερασματικά, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου απαιτεί τόσο την πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ, όσο και την πρόβλεψη φορτίου.

### 2.3.2 Επιλογή τοπολογίας

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μετατόπιση από τα συμβατικά δίκτυα διανομής προς νεότερες τεχνολογίες δικτύων, οι οποίες ενσωματώνουν μονάδες διανεμημένης παραγωγής, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, φορτία σταθερής ισχύος κ.α. Τόσο τα μικροδίκτυα DC όσο και τα υβριδικά δίκτυα DC/AC αλληλεπιδρούν με τα δίκτυα διανομής προκειμένου να επιληφθούν προβλήματα που προκύπτουν σε αυτά για την παροχή ισχύος στους καταναλωτές. Έτσι, η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας ενός μικροδικτύου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα κατά τον σχεδιασμό του.

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός μικροδικτύου ερευνώνται νέες τεχνολογίες, όπως είναι τα κτήρια μηδενικής ενέργειας τα οποία αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων [11]–[13]. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ.

## 2.4 Έλεγχος μικροδικτύου DC

Η διασύνδεση του δικτύου διανομής με ένα μικροδίκτυο DC και τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που αυτό περιέχει γίνεται μέσω ενός δικατευθυντήριου μετατροπέα [14]–[17]. Ο μετατροπέας διασύνδεσης των δύο συστημάτων αποτελείται από ελεγκτές

μικροδικτύων οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να λειτουργούν τόσο σε λειτουργία νησίδας όσο και σε λειτουργία διασύνδεσης με το δίκτυο. Κατά τη λειτουργία διασύνδεσης με το δίκτυο η τάση του μικροδικτύου ελέγχεται μέσω ελεγκτών συνεχούς τάσης ενώ κατά τη λειτουργία νησιδοποίησης η τάση του ζυγού συνεχούς τάσης καθορίζεται από τις μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συνηθέστερες μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα μικροδίκτυα, είναι οι συσσωρευτές και οι υπερπυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος και αυτό τους καθιστά κατάλληλους για την παροχή ισχύος σύντομων διακυμάνσεων τάσης [18]–[20]. Συγκεκριμένα, οι συστοιχίες υπερπυκνωτών συνδέονται μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση στο dc ζυγό, έτσι ώστε να παρέχουν σε μικρό χρονικό διάστημα την απαραίτητη ισχύ για την εξομάλυνση της τάσης. Αντίθετα, οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Έτσι, οι συστοιχίες συσσωρευτών είναι κατάλληλες για την αντιστάθμιση ισχύος σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα σε σχέση με τους υπερπυκνωτές [21]. Τόσο στα φωτοβολταϊκά, όσο και στα αιολικά πάρκα όταν βρίσκονται σε λειτουργία διασύνδεσης με τον ζυγό συνεχούς τάσης, μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος είτε για την λειτουργία τους στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), όσο και σε άλλο σημείο ισχύος, διαφορετικό από αυτό του σημείου μέγιστης ισχύος.

Κατά την λειτουργία διασύνδεσης στο δίκτυο, κάθε αναντιστοιχία ισχύος, είτε πρόκειται για έλλειψη ενέργειας, είτε πρόκειται για πλεονάζουσα παραγωγή εξισορροπείται μέσω της ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο διανομής. Κατά τη λειτουργία νησίδας είναι απαραίτητη η σχεδίαση και εγκατάσταση επαρκούς συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθεί πιθανή αναντιστοιχία ισχύος. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που η αποθήκευση ενέργειας δεν είναι αρκετή, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου απορρίπτει φορτία προκειμένου να επιτύχει την εξισορρόπηση ισχύος και τον έλεγχο της τάσης του dc ζυγού σε μια προκαθορισμένη τιμή.

Παρόλο που τα τελευταία χρόνια σημειώνεται ανάπτυξη των μικροδικτύων ο έλεγχος της τάσης του dc ζυγού και η διαχείριση της ποιότητας ισχύος, λόγω της σύνδεσης διαφορετικών υβριδικών πηγών και φορτίων στον dc ζυγό, αποτελούν απαιτητικές

εργασίες κατά τον σχεδιασμό του ελέγχου. Επίσης, από τη βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι ακόμα δεν υπάρχουν αυστηρά καθορισμένα πλαίσια που να ορίζουν τα χαρακτηριστικά της ποιότητας ισχύος ενός dc μικροδικτύου [22].

Οι στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε μικροδίκτυα DC χαρακτηρίζονται ως κεντρικοί, αποκεντρωμένοι και κατανεμημένοι έλεγχοι. Στις στρατηγικές κεντρικού ελέγχου τα δεδομένα από τις κατανεμημένες μονάδες παραγωγής αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο σε έναν πραγματικό ελεγκτή και στη συνέχεια τα σήματα εντολών αποστέλλονται πίσω σε κάθε μονάδα από τον κεντρικό ελεγκτή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της στρατηγικής ελέγχου αποτελεί η μικρότερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η κακή επεκτασιμότητα [23]. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα μειονεκτήματα στα μικροδίκτυα dc εφαρμόζεται ο αποκεντρωμένος ελεγκτής. Προκειμένου να υλοποιηθεί ο αποκεντρωμένος έλεγχος εφαρμόζεται ο ελεγκτής droop.

Κατά την υλοποίηση του ελέγχου droop απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων, το οποίο αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία λόγω της ισχυρής σύνδεσης της ακρίβειας και της σταθερότητας του συστήματος, με τις παραμέτρους του droop ελέγχου [24], [25]. Για παράδειγμα, αν προσδιοριστούν υψηλότεροι συντελεστές πτώσης μπορεί να προκληθεί ένα πιο αποσβεσμένο σύστημα. Τα πλεονεκτήματα των δύο προαναφερθέντων ελέγχων συνδυάζονται στον κατανεμημένο ελεγκτή, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι στόχοι ελέγχου, οι οποίοι είναι η αναλογική κατανομή φορτίου, η αυτόνομη κατανομή τάσης και ο έλεγχος της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών [26]–[29]. Ωστόσο, στην περίπτωση μικροδικτύων μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιείται ο ιεραρχικός έλεγχος.

#### 2.4.1 Ιεραρχικός έλεγχος

Μια άλλη κατηγορία ελέγχου, η οποία εφαρμόζεται σε μικροδίκτυα συνεχούς τάσης είναι ο ιεραρχικός έλεγχος. Ο ιεραρχικός έλεγχος έχει δημιουργηθεί προκειμένου να χρησιμοποιείται σε μικροδίκτυα όπου υπάρχουν πολλές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, διαφορετικοί τύποι φορτίων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δομή του ιεραρχικού

ελέγχου χαρακτηρίζεται από τρία επίπεδα ελέγχου τα οποία είναι το πρωτεύον, το δευτερεύον και το τριτογενές. Ο πρωτεύον έλεγχος, ο οποίος είναι και ο ταχύτερος σε σχέση με τον δευτερεύον και τον τριτεύον. Ο έλεγχος αυτός λαμβάνει μετρήσεις προκειμένου να αποκαταστήσει την συνεχή τάση σύνδεσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί σωστός καταμερισμός ισχύος τόσο σε σταθερές όσο και σε δυναμικές συνθήκες. Ο δευτερεύον ελεγκτής έχει μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης σε σχέση με τον πρωτεύον και η χρήση του στοχεύει στην αντιστάθμιση της τάσης που προκύπτει από τον πρωτεύον ελεγκτή. Επιπλέον, εξισορροπεί την κατανομή ισχύος μεταξύ των διαφόρων διεσπαρμένων παραγωγών. Ο τριτογενής έλεγχος είναι αυτός με τον μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης και η λειτουργία του στοχεύει στην διατήρηση της βέλτιστης διαχείρισης των διάφορων μονάδων τόσο του μικροδικτύου όσο και μεταξύ του δικτύου διανομής και των μικροδικτύων [30], [31].

## **2.5 Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου**

Τα μικροδίκτυα έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. περιβαλλοντικά οφέλη: σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (με την καύση ορυκτών καυσίμων), η εξέλιξη των ΑΠΕ και η ένταξή τους στα μικροδίκτυα συμβάλλει στην μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος [32]. Επίσης, η ανάπτυξη των ΑΠΕ έχει σημαντικά μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στον πλανήτη, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου. Ταυτόχρονα, συντελεί στη βελτίωση της ποιότητάς του αέρα και στην μείωση της παραγωγής αποβλήτων. Συμπερασματικά, η εξέλιξη των μικροδικτύων συμβάλλει στην μειωμένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια συμβάλλει στην επιβράνδυση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη [33].
2. Λειτουργικά οφέλη: καθώς τα μικροδίκτυα αποτελούν δίκτυα μικρής έκτασης τροφοδοτούμενα σε σημαντικό βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν μειωμένες απώλειες μεταφοράς. Επιπλέον, μειώνουν την επιβάρυνση των δημόσιων



δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, συντελούν στην βελτίωση της ποιότητας ισχύος, με την χρήση διατάξεων που επικουρούν στην βελτίωσή της (μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος). Τα παραπάνω αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την βελτίωση της αξιοπιστίας ενός μικροδικτύου, καθώς και για την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος.

3. Έλεγχος ζήτησης φορτίου: λόγω του μικρότερου μεγέθους ενός μικροδικτύου και της αποκέντρωσης η οποία το χαρακτηρίζει, είναι δυνατή η ακριβέστερη πρόβλεψη παραγωγής και ζήτησης φορτίου το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα, την μείωση των διακοπών ρεύματος, αλλά και την καλύτερη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας.

4. Οφέλη στην υγεία του ανθρώπου: μέσω της ανάπτυξης των μικροδικτύων είναι δυνατή η πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές που νωρίτερα δεν ήταν εύκολη η πρόσβαση σε αυτή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την χρήση του ηλεκτρισμού για οικιακές χρήσεις όπως το μαγείρεμα και ο φωτισμός, τα οποία νωρίτερα πραγματοποιούταν με την χρήση υγραερίου, το οποίο είναι επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία [34]–[38]. Επίσης, μέσω των μικροδικτύων καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες για τους τομείς της υγείας, το οποίο συντελεί στην βελτίωση του εξοπλισμού νοσοκομείων και μονάδων αποθήκευσης για εμβόλια σε αναπτυσσόμενες περιοχές. Επιπλέον, η πρόσβαση σε σύγχρονες, οικονομικές και αξιόπιστες ενεργειακές υπηρεσίες συνεισφέρουν στην βελτίωση της ευημερίας των γυναικών, προσφέροντας νέες οικονομικές ευκαιρίες [34].

## **2.6 Εμπόδια ανάπτυξης των μικροδικτύων**

Η ανάπτυξη των μικροδικτύων έχει προκαλέσει την μετατροπή τους από ένα απλούστερο σύστημα σε ένα πιο σύνθετο, λόγω των πολλών ενδιαφερόμενων μερών [33]–[39]. Επιπλέον για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διακοπτόμενη φύση των ΑΠΕ, έτσι ώστε να συμπεριληφθούν τα οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά και θεσμικά εμπόδια [40]. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικά

εμπόδια που επιβραδύνουν την ανάπτυξη και εφαρμογή μικροδικτύων βασιζόμενα σε ΑΠΕ για την ηλεκτροδότηση αναπτυσσόμενων χωρών, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

#### 2.6.1 Κοινωνικοπολιτισμικό

Καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των έργων ηλεκτροδότησης των αναπτυσσόμενων περιοχών αποτελούν οι κοινωνικοί παράγοντες. Ένα σημαντικό εμπόδια στην υλοποίηση έργων ΑΠΕ, πολλές φορές αποτελεί η μη δημόσια αποδοχή. Η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών συνεισφέρουν στην επιλογή πιθανής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις που αγνοείται η άποψη της τοπικής κοινωνίας, υπάρχουν άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στην υλοποίηση των έργων. Μερικές από αυτές τις επιπτώσεις είναι το υψηλότερο αρχικό κόστος, οι καθυστερήσεις λόγω συχνών διαμαρτυριών και μερικές φορές τον τερματισμό των έργων.

#### 2.6.2 Οικονομικό

Τα έργα που απαιτούνται για την υλοποίηση μικροδικτύων που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ απαιτούν επενδύσεις υψηλού κεφαλαίου, οι οποίες έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής. Ένας σημαντικός παράγοντας που συνδέεται με το υψηλό κόστος των έργων για την κατασκευή των εγκαταστάσεων ΑΠΕ είναι ότι δεν αξιολογείται κατάλληλα η ανάπτυξη μικροδικτύων με βάση τους πόρους ενέργειας χαμηλού κόστους. Ένα επιπλέον οικονομικό εμπόδιο για την ανάπτυξη των μικροδικτύων είναι η έλλειψη μακροπρόθεσμων προοπτικών χρηματοδότησης έργων ΑΠΕ.

#### 2.6.3 Περιβαλλοντικό

Ένα επιπλέον εμπόδιο για την ανάπτυξη των μικροδικτύων αποτελούν οι κανονισμοί χωροθέτησης και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά (κλιματικές συνθήκες, χαρακτηριστικά εδάφους). Για την δημιουργία μικροδικτύων που βασίζονται σε αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια η απόκτηση της κατάλληλης έκτασης γης μπορεί να αποτελέσει σημαντικό τροχοπέδη [41]. Επίσης, άλλα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν είναι η ξαφνική πλημμύρα σε περίπτωση υδροηλεκτρικής ενέργειας, η ηχορύπανση σε περίπτωση αιολικής ενέργειας, η μόλυνση των υδάτων, η διάβρωση του εδάφους και η αποψίλωση των δασών.

#### 2.6.4 Θεσμικό

Καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η θεσμική οργάνωση του ενεργειακού τομέα ανήκει στην εκάστοτε κυβέρνηση, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει έλλειψη συντονισμού και έλλειψη μιας κυβέρνησης που προκαλεί ένα οικονομικά σταθερό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό πολλές φορές είναι αποτρεπτικό για την προσέλκυση επενδύσεων, εμποδίζοντας έτσι την ανάπτυξη των μικροδικτύων και των ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη γραφειοκρατίας και η απουσία οργάνωσης μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων καθιστά τις διαδικασίες αδειοδότησης έργων ιδιαίτερα περίπλοκες.

#### 2.6.5 Τεχνικό

Επιπλέον σε πολλές περιπτώσεις η ανεπαρκής τεχνολογία και η έλλειψη απαραίτητων υποδομών αποτελούν εμπόδια στην ανάπτυξη μικροδικτύων. Σε πολλές περιπτώσεις, η δυσκολία ενσωμάτωσης εγκαταστάσεων ΑΠΕ στο υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και η αδυναμία επέκτασης των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν την ανάπτυξη των μικροδικτύων μη εφικτή. Επίσης, η έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και η δομή του υπάρχοντος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες αποτελούν εμπόδιο για επιπλέον ανάπτυξη των μικροδικτύων σε αυτές.

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σε μικροδίκτυα. Παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μικροδικτύων, οι εφαρμογές τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Συμπεραίνεται προς τα μικροδίκτυα, ότι αποτελούν την εξέλιξη των συμβατικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μέσω αυτών θα επιτευχθεί η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, με την παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιείται σε περιβάλλον προσομοίωσης, ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης για την τροφοδότηση κατοικιών από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Το μικροδίκτυο που έχει αναπτυχθεί ανήκει στην κατηγορία των αυτόνομων μικροδικτύων, καθώς δεν είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, στο υπό μελέτη σύστημα αναπτύσσεται και ένας έλεγχος για την φόρτιση και εκφόρτιση ενός συσσωρευτή.

## Κεφάλαιο 3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 3.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση ενέργειας από το σύνολο του πληθυσμού. Η αύξηση αυτή οφείλεται στις υπηρεσίες για την ικανοποίηση της ανθρώπινης οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, καθώς και της ευημερίας και της υγείας [42]. Η κάλυψη αυτών των αναγκών με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, έχει σημαντικά αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Έτσι, η κάλυψη όλων αυτών των ενεργειακών αναγκών και ο περιορισμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με σκοπό την επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής, αποτελούν σημαντικές προκλήσεις της επιστημονικής και βιομηχανικής δραστηριότητας.

Αντίθετα, ένα σημαντικό ποσοστό ανθρώπινου πληθυσμού και συγκεκριμένα 1,4 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Δεδομένου του ότι το 85% του πληθυσμού αυτού ζει σε αγροτικές περιοχές προβλέπεται ότι ο αριθμός των αγροτικών κοινοτήτων που βασίζεται στην παραδοσιακή χρήση της βιομάζας θα αυξηθεί από τα 2,7 δισεκατομμύρια που είναι σήμερα στα 2,8 το 2030 [43].

Ιστορικά, η πρώτη φορά που καταγράφηκε εξόρυξη άνθρακα για εμπορικούς σκοπούς ήταν το 1750 στην περιοχή της Βιρτζίνια. Τότε ο άνθρακας αποτέλεσε το περισσότερο προτιμώμενο καύσιμο για ατμομηχανές της εποχής, καθώς παρουσίασε μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς από αντίστοιχες ποσότητες καυσίμων οι οποίες είχαν ως βάση τη βιομάζα (καυσόξυλα και κάρβουνο). Αξίζει να επισημανθεί ότι ο άνθρακας ήταν συγκριτικά φθηνότερος και αποτελούσε πιο καθαρό καύσιμο τους προηγούμενους αιώνες [44]. Τις τελευταίες δεκαετίες, για την διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυριάρχησε η χρήση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Επίσης, η εκθετική αύξηση του πληθυσμού κατά τις δεκαετίες αυτές οδήγησαν σε αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός των παραπάνω, προκάλεσε τη ραγδαία αύξηση στις εκπομπές CO<sub>2</sub> [45]. Αυτό με τη σειρά του προκάλεσε μια ισχυρή

κλιματική αλλαγή, οι σοβαρές επιπτώσεις της οποίας μπορούν ακόμα να περιοριστούν, με την προϋπόθεση ότι θα υπάρξουν προσπάθειες για τον ενεργειακό μετασχηματισμό των υπάρχοντων συστημάτων. Αυτό έχει μετατοπίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στη μεγαλύτερη εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες αποτελούν την ισχυρότερη εναλλακτική για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία βασίζεται κατά το μεγαλύτερο μέρος σε ορυκτά καύσιμα [42].

Πολλές χώρες έχουν θέσει στο επίκεντρο εθνικών και στρατηγικών σχεδίων, την αειφόρο ανάπτυξη. Συγκεκριμένα, η γενική συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών, πρότεινε ένα σύνολο παγκόσμιων Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης. Οι στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης εστιάζουν περισσότερο στην επιστημονική κοινότητα σε σχέση με τους Αναπτυξιακούς Στόχους της τελευταίας δεκαετίας. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η κλιματική αλλαγή, απαιτείται συντονισμένη παγκόσμια παρακολούθηση και μοντελοποίηση πολλών παραγόντων, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, καθώς και παροχή τροφίμων, υγείας και νερού [46], [47].

Η πρώτη φορά που ξεκίνησε η συστηματική έρευνα για εναλλακτικές μορφές ενέργειας, ήταν στα τέλη της δεκαετίας του 1990, όταν ο γενικός πληθυσμός άρχισε να πιέζεται από την αύξηση των τιμών του πετρελαίου [48]. Από τη βιβλιογραφία αποδεικνύεται πως με την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ΑΠΕ (βιοενέργεια, ηλιακή ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, αιολική και ωκεάνια ενέργεια) καθίσταται εφικτή η επίτευξη της ιδέας της βιωσιμότητας. Πολλές κυβερνήσεις καθώς και πολλοί διεθνής οργανισμοί και ιδιώτες προσβλέπουν στη δημιουργία ενός βιώσιμου μέλλοντος, μέσω των ευκαιριών που έχουν δημιουργηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, όσον αφορά την αντικατάσταση υλικών που προέρχονται από το πετρέλαιο και από πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, έναντι άλλων τα οποία βασίζονται σε ΑΠΕ. Η έναρξη των παγκόσμιων Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης από τα Ηνωμένα Έθνη επικουρεί στη διασφάλιση του περιορισμού της κλιματικής αλλαγής του 21ου αιώνα, καθώς και στη

διασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος βασισμένου σε ανανεώσιμες μορφές ενέργειας [42], [49].

## **3.2 Ανάλυση των μορφών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Παγκοσμίως χρησιμοποιούνται πολλά είδη ΑΠΕ και η διείσδυσή τους στο δίκτυο γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Ωστόσο, ακόμα δεν αποτελούν την κυρίαρχη ενεργειακή πηγή. Τα πιο διαδεδομένα είδη ΑΠΕ, αναλύονται παρακάτω.

### **3.2.1 Ηλιακή Ενέργεια**

Μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ, είναι η χρήση της ηλιακής ενέργειας και η μετατροπή της σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ημιαγωγών, οι οποίοι παρουσιάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την πρόκληση ροής ηλεκτρονίων λόγω της πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ημιαγωγών. Για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται συστήματα τα οποία ονομάζονται ηλιακά πάνελ, τα οποία παράγουν συνεχές ρεύμα. Τα ηλιακά πάνελ αποτελούνται από έναν αριθμό κυψελών που περιέχουν ένα ημιαγωγικό υλικό.

Όταν τα ηλιακά πάνελ δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία υπάρχει ροή ηλεκτρονίων και έτσι υπάρχει ηλεκτρισμός, ενώ αντίθετα, όταν η ηλιακή ενέργεια δεν προσπίπτει πάνω στα ηλιακά πάνελ, δεν υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνήθως εγκαθίσταται τόσο σε εκτάσεις γης όσο και σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές του διαστήματος για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημικούς σταθμούς. Μια φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από πολλές φωτοβολταϊκές κυψελίδες οι οποίες είναι συνδεδεμένες τόσο σε σειρά όσο και παράλληλα, προκειμένου να επιτυγχάνεται το κατάλληλο επίπεδο τάσης και ρεύματος. Με τον όρο φωτοβολταϊκό πάνελ, εννοείται οποιοσδήποτε αριθμός φωτοβολταϊκών μονάδων, ενώ με τον όρο φωτοβολταϊκή συστοιχία εννοείται οποιοσδήποτε αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ. Το μέγεθος μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι μόνο μερικά

εκατοστά, κι έτσι ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από δεκάδες φωτοβολταϊκές κυψέλες [50].

Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι σχετικά φθηνή, λόγω του χαμηλού κόστους συντήρησης και της άφθονης ηλιακής ενέργειας που είναι απαραίτητη για την λειτουργία τους. Ωστόσο, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, έτσι ώστε η ηλιακή ενέργεια να προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πάνελ για το μεγαλύτερο δυνατό μέρος της ημέρας.

#### 3.2.1.1 Πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την πιο άφθονη μορφή ενέργειας και παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας. Είναι περιβαλλοντικά καθαρή, καθώς δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον. Με εξαίρεση το κόστος εγκατάστασης, το κόστος λειτουργίας και το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρά. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε αντίθεση με τα ηλιακά δεν εκπέμπουν θόρυβο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ότι δεν περιέχουν κινητά μέρη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κίνδυνος μηχανικών βλαβών. Μακροπρόθεσμα, λόγω της ηλιακής ενέργειας εκτιμάται ότι το μέσο νοικοκυριό θα καλύπτει το 50% της ενέργειάς του από ηλιακή ενέργεια.

#### 3.2.1.2 Μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας

Το κόστος εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σχετικά υψηλό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την απαίτηση αρκετών ετών για την απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Επίσης, λόγω της εξάρτησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία, η συνολική παραγωγή μιας χώρας εξαρτάται από το κλίμα της. Επιπλέον, για τα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούνται περισσότερα τετραγωνικά μέτρα ανά KW εγκατεστημένης ισχύος. Επιπρόσθετα, λόγω της μη παραγωγής ενέργειας κατά τις νυχτερινές ώρες, σε αυτόνομα συστήματα είναι απαραίτητη η εγκατάσταση και η χρήση συσσωρευτών, έτσι ώστε οι συσκευές που τροφοδοτούνται από ηλιακή ενέργεια, να συνεχίσουν να τροφοδοτούν και κατά τις νυχτερινές ώρες. Ωστόσο, οι συστοιχίες

συσσωρευτών είναι ογκώδεις συσκευές, οι οποίες καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο και πρέπει να αντικαθίστανται ανά κάποια χρονικά διαστήματα.

### 3.2.2 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια, ως μια εναλλακτική πηγή ενέργειας, αποτελεί μια από τις αναπτυσσόμενες πηγές ενέργειας, οι οποίες στοχεύουν σε ένα περιβαλλοντικά βιώσιμο μέλλον, για την κοινωνία.

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται από την κινητική ενέργεια του αέρα, η οποία οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη. Η ανομοιόμορφη κατανομή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια της γης και της θάλασσας προκαλεί την εμφάνιση ανέμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι άνεμοι που προκύπτουν από αυτήν, να αποτελούν εμμέσως μια μορφή ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, άνεμος είναι η κίνηση του αέρα, που προκαλείται από την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτό ισχύει για κάθε είδους άνεμο, από ασθενής ως ισχυρότερους ανέμους που οφείλονται στην ηλιακή θέρμανση της γης. Η αιολική ισχύς είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας, σε πιο αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας, όπως είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ανεμογεννητριών.

Καθώς η ανάγκη για την διείσδυση της αιολικής ενέργειας αυξάνεται κατά τα τελευταία χρόνια, θεωρείται απαραίτητο να γίνει η βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας των αιολικών εγκαταστάσεων. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας σε μια ανεμογεννήτρια, εκτός από την ταχύτητα του ανέμου, επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευή της. Αυτοί οι παράγοντες είναι το ύψος της ανεμογεννήτριας, η διατομή των πτερυγίων, ο βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας και του συστήματος μετάδοσης κίνησης.



Θεωρητικά θα ήταν εφικτό να υπάρξει καθολική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε μια ανεμογεννήτρια. Αυτό θα συνέβαινε, κατά την περίπτωση που θα αποτρεπόταν η διέλευση του αέρα μέσω του ρότορα. Ωστόσο, μια ανεμογεννήτρια είναι εφικτό να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, ως και το 60% της διαθέσιμης ενέργειας. Επιπλέον, οι απώλειες που υπάρχουν στη γεννήτρια μειώνουν την απόδοσή της με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση της αιολικής ενέργειας να φτάνει στο 35% [51].

Οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται με βάση τον προσανατολισμό τους σε κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Επιπλέον, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την ταχύτητα περιστροφής σε ταχύστροφες ή αργόστροφες, καθώς και με βάση την ισχύ τους σε μικρές, μεσαίες ή μεγάλες.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και την μετατροπή της σε ηλεκτρική είναι:

- Πύργος στήριξης: το ελάχιστο ύψος του είναι ίσο με την διάμετρο της πτερωτής. Κατά την επιλογή του λαμβάνεται υπόψη το κόστος και η δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου.
- Πτερωτή: τα πτερύγια καλύπτουν μικρό ποσοστό του εμβαδού που διαγράφουν (2%-10%).
- Άξονας περιστροφής: πρέπει να μπορεί να αντέξει ισχυρές, στρεπτικές μεταβατικές ροπές αλλά και καμπτικές.

- Σύστημα μετάδοσης κίνησης: διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο στροφών με απόδοση 96% για το διβάθμιο. Περιλαμβάνει, επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και συνδέσμους απορρόφησης ταλαντώσεων.
- Ηλεκτρική γεννήτρια: είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια. Οι σύγχρονες συναντώνται σπάνια, σε μεγάλες ισχύς. Η ασύγχρονη γεννήτρια, έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και της ευκολίας σύνδεσης στο δίκτυο.
- Σύστημα ελέγχου: για μικρές ανεμογεννήτριες το σύστημα ελέγχου είναι η ουρά, ενώ για μεγάλες υπάρχει ειδικός αυτοματισμός.

Προκειμένου να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης αιολικής ενέργειας, προσαρμόζεται η γωνία του πτερυγίου σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου. Ο καθορισμός της γωνίας επιτυγχάνεται με τον έλεγχο περιστροφής της ανεμογεννήτριας γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

### 3.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που προκαλείται από την πτώση του νερού από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο σε ένα χαμηλότερο. Η εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής επιτυγχάνεται όταν το νερό αυτό διέρχεται μέσα από μια συσκευή μετατροπής ενέργειας, όπως είναι ένας στρόβιλος ή ένας τροχός νερού. Ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του νερού που πέφτει σε μηχανική, η οποία συνήθως μετατρέπεται σε ηλεκτρική με την χρήση μιας γεννήτριας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία από τις πρώτες ΑΠΕ που χρησιμοποιήθηκαν. Για την αξιοποίηση της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, οι οποίοι μετατρέπουν την ενέργεια του ρέοντος νερού σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται, με την εγκατάσταση φραγμάτων σε ποτάμια τα οποία έχουν ως

αποτέλεσμα, τη δημιουργία μεγάλων δεξαμενών και στη συνέχεια την αξιοποίηση του νερού μέσω υδροτροβίλων, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοποίηση της υδροηλεκτρικής ενέργειας δεν επιφέρει εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, αλλά η δημιουργία του φράγματος μπορεί να επιφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα στο οικοσύστημα της περιοχής [52].

#### 3.2.4 Ενέργεια Βιομάζας

Μία ακόμα, σημαντική εναλλακτική πηγή ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε αγροτικές περιοχές, είναι η ενέργεια βιομάζας. Η αποτελεσματική αξιοποίηση της βιοενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στην ενεργειακή αναβάθμιση πολλών αγροτικών περιοχών.

Η ενέργεια της βιομάζας προέρχεται από τη διαδικασία παραγωγής καυσίμων, από φυτικά και ζωικά απόβλητα [51]. Η πηγή ενέργειας στην βιομάζα αποτελεί η οργανική ύλη στην οποία αποθηκεύεται σε χημικούς δεσμούς η ηλιακή ενέργεια. Αυτή η δεσμευμένη ενέργεια απελευθερώνεται, όταν οι δεσμοί μεταξύ των μορίων άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου διασπώνται μέσω των διαδικασιών της πέψης, της καύσης και της αποσύνθεσης.

Προκειμένου να επιτευχθεί η απομάστευση ενέργειας από βιομάζα, πραγματοποιείται η μετατροπή της οργανικής ύλης σε ενέργεια, μέσω συγκεκριμένης διαδικασίας η οποία αναλύεται παρακάτω. Κατά τη ζύμωση της αλκοόλης, το άμυλο που βρίσκεται σε οργανική ύλη, λόγω της θερμότητας μετατρέπεται σε ζάχαρη. Στη συνέχεια, η ζάχαρη ζυμώνεται, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα, την απόσταξη της αιθανόλης. Έπειτα, μια αερόβια χώνευση μετατρέπει τη βιομάζα (αστικά στερεά απόβλητα, απόβλητα αγοράς). Κατά τη διαδικασία αυτή, με την απουσία οξυγόνου, τα βακτήρια διασπούν το οργανικό υλικό και παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Αυτή η βιομετατροπή αποτελεί μια περιβαλλοντικά εφικτή, μη ρυπογόνο και οικονομικά αποδοτική διαδικασία [53]. Επίσης, τα λύματα και τα υπολείμματα του χωνευτηρίου περιέχουν υψηλά ποσοστά αζώτου και φωσφόρου και

μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν πίσω στο έδαφος ως λίπασμα [54]. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί έως και το 70% της ενέργειας.

Τα οργανικά απόβλητα συγκεντρώνονται και ξηραίνονται με μια φυσική μέθοδο. Έπειτα, τεμαχίζονται στο μέγιστο μέγεθος σωματιδίων 2 – 4 mm. Τα στερεά απόβλητα, τοποθετούνται σε ένα πλαστικό δοχείο σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια, μετατρέπονται με την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης.

### 3.2.5 Γεωθερμία

Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των μονάδων παραγωγής με γεωθερμική ενέργεια στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι πάνω από 3.000 MW. Οι γεωθερμικοί σταθμοί για να παράγουν ατμό, χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες βαθιά μέσα στο έδαφος. Ο ατμός αυτός χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία μεγάλων τουρμπινών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας έχουν την δυνατότητα άντλησης από υπόγειες δεξαμενές ζεστού νερού ή ακόμα και της θέρμανσης νερού με την άντλησή του. Οι υπόγειες θερμοκρασίες εξετάζονται με γεωτρήσεις σε βάθος μεγαλύτερο από ένα χιλιόμετρο [55]. Ουσιαστικά η γεωθερμική ενέργεια δεν θεωρείται ανανεώσιμη. Αυτό συμβαίνει, γιατί κάποια στιγμή ο πυρήνας της γης θα κρυώσει. Ωστόσο, τη θεωρούμε ανανεώσιμη, αφού η εποχή αυτή αναφέρεται σε εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια στο μέλλον.

Τόσο για την άντληση θερμότητας από τη γη με σκοπό την χειμερινή θέρμανση, όσο και για την χρήση κλιματιστικών το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται συμπιεστές. Η ενέργεια που αντλούν οι συμπιεστές μέσα και έξω από τη γη είναι ανανεώσιμη, καθώς αντικαθίστανται από εποχή σε εποχή. Αντίθετα, η ενέργεια με την οποία λειτουργεί ο συμπιεστής μπορεί να είναι είτε ανανεώσιμη είτε συμβατική.

### 3.2.6 Κυματική ενέργεια

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κυμάτων του ωκεανού και ένας τύπος εξ αυτών είναι τα αιολικά κύματα. Τα αιολικά κύματα σημειώνουν την υψηλότερη συγκέντρωση ενέργειας. Καθώς πνέουν οι άνεμοι στους ωκεανούς δημιουργούν τα κύματα ανέμου. Εξαιτίας αυτής της μεταφοράς ενέργειας, ένα μέρος αυτής αποθηκεύεται στο νερό κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Αφού δημιουργηθούν τα κύματα ανέμου, ταξιδεύουν πολλά χιλιόμετρα με μικρή απώλεια ενέργειας. Ωστόσο, οι απώλειες ενέργειας μεγαλώνουν όταν συναντώνται αντίθετοι άνεμοι. Σε περιοχές κοντά στην ακτογραμμή, η ένταση του ανέμου μειώνεται, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τον βυθό. Προκειμένου να υπάρξει ισορροπία μετά την διασπορά ενέργειας κοντά στην ακτή, εμφανίζονται τα φυσικά φαινόμενα όπως είναι η διάθλαση και η ανάκλαση, με αποτέλεσμα την συγκέντρωση ενέργειας.

Υπάρχουν δύο μορφές ενέργειας των κυμάτων του ωκεανού. Αυτές είναι η κινητική και η δυναμική ενέργεια των σωματιδίων του νερού. Η κινητική ενέργεια δημιουργείται από την κίνηση των σωματιδίων του νερού, τα οποία ακολουθούν κυκλικές διαδρομές. Προσεγγιστικά, σε ένα γραμμικό κύμα, η κινητική του ενέργεια είναι ίση με τη δυναμική. Η ροή ενέργειας σε ένα κύμα, δηλαδή, η ισχύς του κύματος, είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους και της περιόδου της κίνησης. Στα κύματα μεγάλης περιόδου, η μέση ισχύς ξεπερνά τα 40 έως 50 kW ανά μέτρο πλάτους των επερχόμενων κυμάτων.

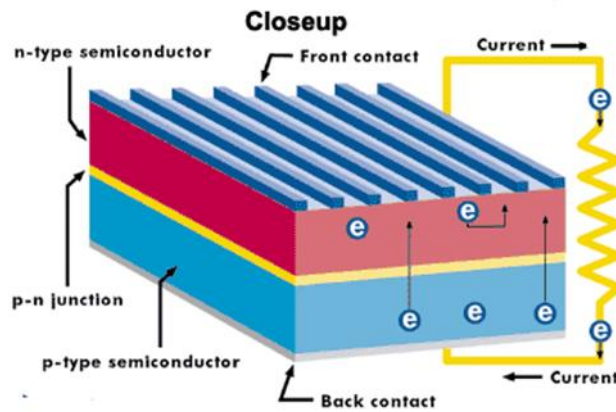
Η κυματική ενέργεια καταμερίζεται ανομοιόμορφα σε όλο τον πλανήτη, όπως και οι πιο πολλές ΑΠΕ. Αρκετά μεγάλες πηγές κυματικής ενέργειας εντοπίζονται κατά μήκος της δυτικής ευρωπαϊκής ακτής, στα ανοικτά των ακτών του Καναδά και των Ηνωμένων Πολιτειών και κατά μήκος των νότιων ακτών της Αυστραλίας και της Νότιας Αμερικής.

Οι εκτιμήσεις της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων εκτιμούν μια αγορά κυματικής ενέργειας περίπου 5,5 TWh/έτος. Παρόλα αυτά, η συμβολή της κυματικής ενέργειας παγκοσμίως προβλέπεται ότι είναι της τάξης των 2000 TWh/έτος, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.3 Εισαγωγή στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι στην ουσία ο μετασχηματισμός της ενέργειας που αποδίδουν τα φωτόνια του φωτός καθώς προσπίπτουν σε ειδικώς επεξεργασμένα ημιαγώγιμα υλικά, σε ηλεκτρική ενέργεια ικανή να ωθήσει τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται σε ένα κύκλωμα δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Η επεξεργασία του αγωγού είναι απαραίτητη καθώς σε αντίθετη περίπτωση, η ενέργεια που θα δώσουν τα φωτόνια που προσπίπτουν στα ηλεκτρόνια των ημιαγώγιμων υλικών θα μετατραπεί σε μη επιθυμητή θερμότητα μετά από μερικές συγκρούσεις των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους στο εσωτερικό των ατόμων. Για να μπορέσει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο να δημιουργηθεί, εισάγονται χημικά στοιχεία στο ημιαγώγιμο υλικό που το βοηθούν να δημιουργήσει πλεόνασμα ηλεκτρονίων και οπών, διαδικασία που αποκαλείται πρόσμιξη. Τα χημικά στοιχεία που βοηθούν στη πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας ονομάζονται στοιχεία πρόσμιξης. Ένα καλό στοιχείο πρόσμιξης για το πυρίτιο που είναι ημιαγωγός με 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα είναι το βόριο το οποίο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο από ότι το πυρίτιο. Επομένως, κάθε άτομο βορίου που ενώνεται με ένα άτομο πυριτίου, αφήνει ένα κενό στο σημείο που θα έπρεπε να υπάρχει άλλο ηλεκτρόνιο. Αυτή η δομή ονομάζεται ημιαγωγός τύπου P (θετικός). Ένα άλλο στοιχείο πρόσμιξης για το πυρίτιο είναι ο φώσφορος. Αυτό το στοιχείο έχει ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο δεσμού από το πυρίτιο, στην αντικατάσταση ενός ατόμου του πυριτίου από άλλο του φωσφόρου στο κρυσταλλικό πλέγμα, το επιπλέον ηλεκτρόνιο μένει ελεύθερο και ο ημιαγωγός αποκαλείται τύπου N (αρνητικός). Παρόλα αυτά, το καθαρό ηλεκτρικό φορτίο του κρυστάλλου παραμένει μηδενικό διότι κάθε άτομο έχει όμοιο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων και κατά συνέπεια εξισορροπούνται τα φορτία του [56]. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η τοπολογία που αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 3.1 Δομή ενός ηλιακού κελιού

Η ένωση ενός ημιαγωγού τύπου P με έναν ημιαγωγό τύπου N, στην περιοχή της ένωσης αναγκάζει κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του χώρου τύπου N να ωθηθούν προς τη ζώνη P διαπερνώντας το όριο με αποτέλεσμα να τοποθετηθούν στα ελεύθερα κενά. Έτσι η πλησιέστερη περιοχή στο όριο θα μείνει με αρνητικό φορτίο στον ημιαγωγό P και θετικό φορτίο στον N. Με αυτή τη διαδικασία, θα σχηματιστεί μια ένωση P-N όπου το ηλεκτρικό πεδίο που θα δημιουργηθεί, χάρη στο πέρασμα των φορτίων, θα δημιουργήσει ένα φράγμα δυναμικού που δεν επιτρέπει να συνεχίζεται επ' άοριστο η διαδικασία της διάχυσης των ηλεκτρονίων.

Όταν προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πάνω στην ημιαγώγιμη ένωση και εφόσον τα φωτόνια μεταφέρουν την απαραίτητη ενέργεια στα ηλεκτρόνια ώστε αυτά να απελευθερωθούν, κάποια ηλεκτρόνια θα διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού και θα μεταφερθούν έξω από τον ημιαγωγό. Εάν υπάρχει ένα εξωτερικό κύκλωμα, μέσω του οποίου να μπορούν να κυκλοφορήσουν, θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Τα παραπάνω ηλεκτρόνια, αφού διαπεράσουν το εξωτερικό κύκλωμα, θα μπουν εκ νέου στην ημιαγώγιμη ένωση από την άλλη πλευρά.

Παρ όλα αυτά δεν είναι ικανά όλα τα φωτόνια που να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια και να παράγουν ηλεκτρισμό, αυτό συμβαίνει γιατί κάποια μήκη κύματος είναι πιο κατάλληλα

από κάποια άλλα, ανάλογα με τον τύπο του ημιαγώγιμου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ένωση.

Η φασματική απόκριση αποτελεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας κάποιου συγκεκριμένου ημιαγώγιμου υλικού να μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική, σε καθορισμένο μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σε μια κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου για παράδειγμα, η απόδοση κατά την μετατροπή είναι πολύ καλή για μήκη κύματος από 350 έως 1100 nm.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι διαφορετικού μήκους κύματος στα πλαίσια μιας μεγάλης περιοχής με αποτέλεσμα η απόδοση της μετατροπής να είναι αποτέλεσμα της φασματικής απόκρισης για κάθε μήκος κύματος παίρνοντας ένα συνολικό αποτέλεσμα για κάθε υλικό που επιλέγεται. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση στο κύτταρο του πυριτίου είναι περίπου 23% σε εργαστηριακές συνθήκες που όταν πρόκειται για εμπορικές κυψέλες κατασκευασμένες με βιομηχανικές διαδικασίες, η παραπάνω τιμή δεν ξεπερνά συνήθως το 20%.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, συγκριτικά με την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά τους καθορίζεται από τις κυψέλες που το απαρτίζουν και περιγράφεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ). Είναι το μεγαλύτερο σε ένταση ρεύμα που μπορούμε να έχουμε σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στην ουσία είναι το ρεύμα που προκύπτει στους πόλους ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν αυτό είναι βραχυκυκλωμένο.

Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ). Αποτελεί την μεγαλύτερη τάση που μπορούμε να έχουμε χωρίς να περνάει ρεύμα στο κύκλωμα, σε ανοιχτό κύκλωμα. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε φορτίο πάνω στο πλαίσιο.



Ρεύμα ( $I_{mp}$ ) Είναι το ρεύμα που προκύπτει έχοντας μια συγκεκριμένη τάση ( $V_{mp}$ ). Είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που κυκλοφορεί δια μέσου ενός φορτίου.

Μέγιστη ισχύς ( $P_{max}$ ). Είναι το γινόμενο της τάσης επί της έντασης. Η τιμή  $P_{max}$  είναι το γινόμενο που προκύπτει από έναν συνδυασμό τιμών έντασης και τάσης, τέτοιον ώστε η τιμή να είναι μέγιστη. Ουσιαστικά η αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος ορίζει τις τιμές  $I_{mp}$  και  $V_{mp}$  για το μέγιστο αποτέλεσμα.

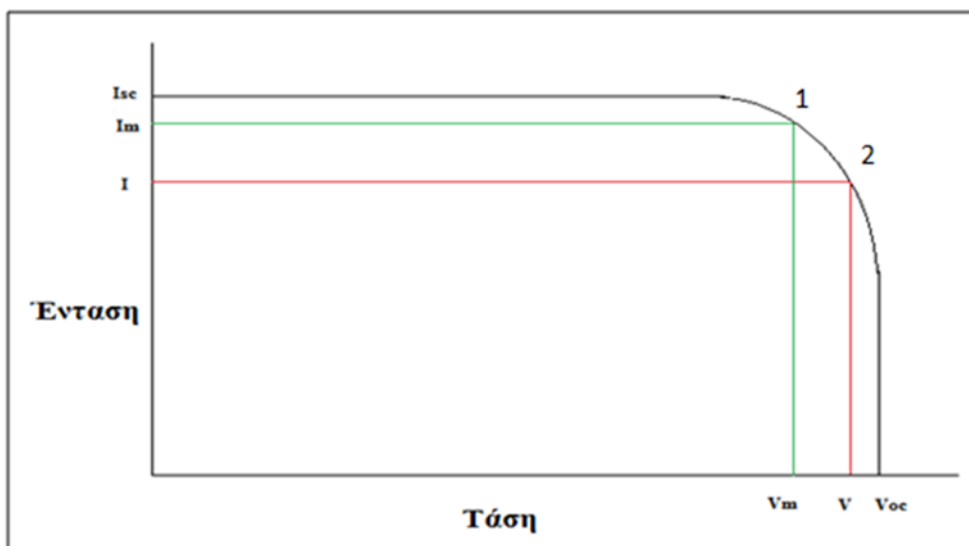
Παράγοντας πλήρωσης (FF). Είναι μια θεωρητική έννοια που εξυπηρετεί στη μέτρηση του σχήματος της καμπύλης που ορίζουν οι μεταβλητές  $I$  και  $V$  και ορίζεται ως εξής:

Μία άλλη ιδιότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι και ο βαθμός απόδοσης( $\eta$ ) η οποία υπολογίζεται με την βοήθεια των παραπάνω χαρακτηριστικών που έχουν προαναφερθεί και:

$$\eta = P_{mp}/P_{in} = P_{mp}/(A \cdot G) = (FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}) / (A \cdot G)$$

$$\eta = P_{mp}/P_{in} = P_{mp}/(A \cdot G) = (FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}) / (A \cdot G)$$

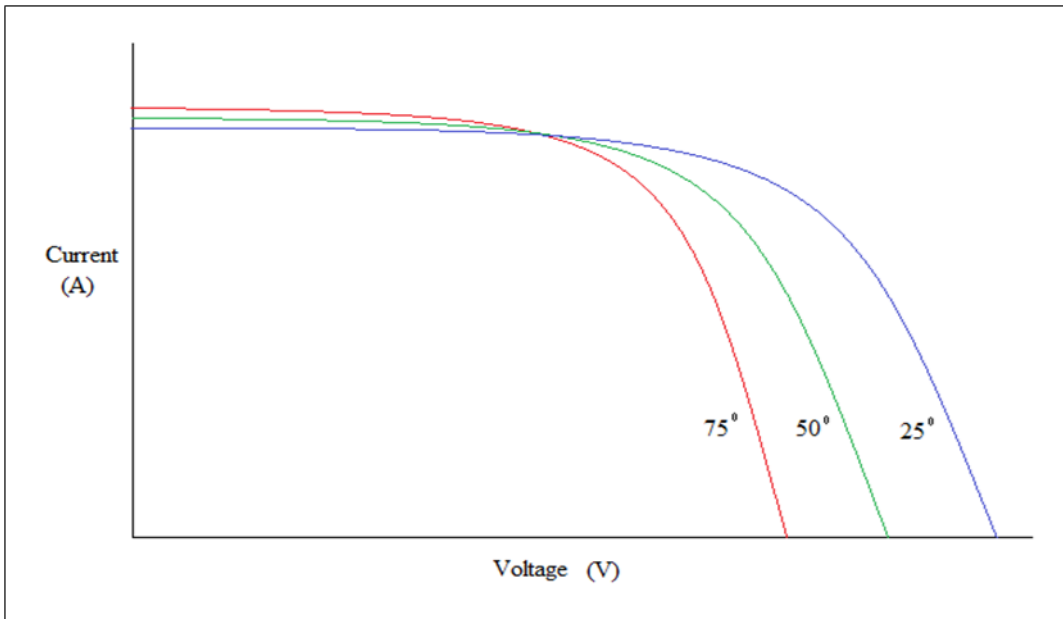
Όπου  $P_{mp}$  η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδει το φωτοβολταϊκό στοιχείο και όπου  $P_{in}$  το γινόμενο της ενεργού επιφάνειας  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε  $m^2$  (χωρίς να περιλαμβάνεται το μεταλλικό πλαίσιο) και της έντασης της ακτινοβολίας  $G$  σε  $W/m^2$ . Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η χαρακτηριστική  $I-V$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



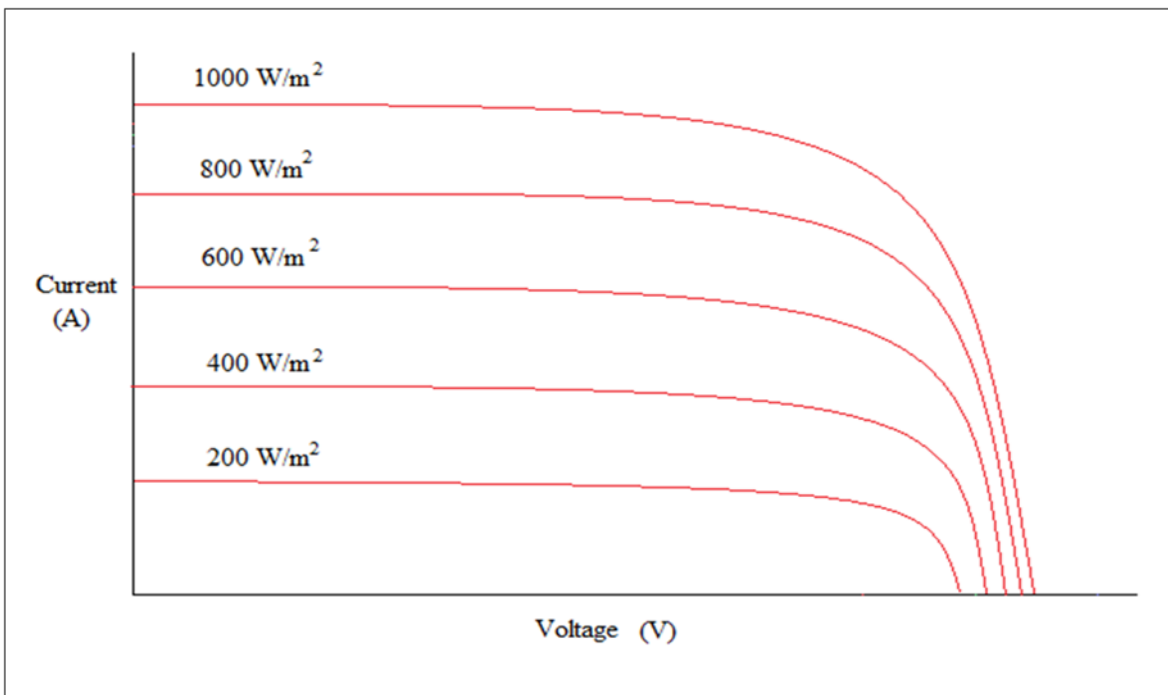
Σχήμα 3.2 Τυπική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το σημείο 2 το οποίο είναι τυχαίο στο Σχήμα 2.2 αναπαριστά τη λειτουργία του πλαισίου με μια ένταση  $I$  και τάση  $V$  στα άκρα του. Η ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι  $I \cdot V$ , που γραφικά αναπαρίσταται από το εμβαδό του ορθογωνίου του οποίου η άνω δεξιά γωνία είναι το σημείο 2.

Καθώς το σημείο 2 μετατοπίζεται προς τα δεξιά, φαίνεται πως το εμβαδό του ορθογωνίου, κατά τη απότομη μείωση του  $I$ , γίνεται κάθε φορά και πιο μικρό. Μια παρόμοια κατάσταση θα προκύψει αν το παραπάνω σημείο μετακινηθεί προς τα αριστερά, καθώς, σ' αυτή την περίπτωση, αυτό που ελαττώνεται είναι η τιμή του  $V$ . Θα υπάρξει επομένως ένα ενδιάμεσο σημείο 1 στο οποίο το εμβαδό του ορθογωνίου θα είναι το μέγιστο δυνατό. Αυτό το σημείο είναι το σημείο της μέγιστης ισχύος. Ο παράγοντας πλήρωσης είναι ο λόγος του εμβαδού του ορθογωνίου που ορίζεται από το σημείο 1 προς το εμβαδό που ορίζεται από το εξωτερικό της καμπύλης των πλευρών  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ . Το Σχήμα 3.3 και το Σχήμα 3.4 περιγράφουν τη λειτουργία των πάνελ σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας:



Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V σε διάφορες θερμοκρασίες



Σχήμα 3.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διάφορες τιμές ακτινοβολίας

Η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται κυρίως από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, την ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού από το οποίο αποτελείται το σύστημα, τις τεχνικές προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την γεωγραφική τοποθεσία και τέλος οτιδήποτε σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων που επιδρούν στα διάφορα μέρη των φωτοβολταϊκών

συστημάτων. Παράγοντες όπως η σκόνη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ταχύτητα ανέμου, η υγρασία, οι χιονοπτώσεις, το χαλάζι και οι αμμοθύελλες, επιδεινώνουν την ενεργειακή απόδοση των ηλιακών εγκαταστάσεων και πολύ συχνά δημιουργούν προβλήματα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και στη υπόλοιπη εγκατάσταση. Τέλος, αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στις μεθόδους για την εύρεση και επίλυση των διαφόρων προβλημάτων που δημιουργούνται από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και τις διάφορες τεχνικές μετριασμού για τη βελτίωση της απόδοσης ενέργειας.

### 3.3.1 Φωτοβολταϊκή Μονάδα

Η διάρκεια ζωής μιας φωτοβολταϊκής μονάδας εξαρτάται από την ποιότητα και ανθεκτικότητα (αργός ρυθμός αποδόμησης). Η έκθεση σε εξωτερικούς χώρους προκαλεί σοβαρή πίεση στις φωτοβολταϊκές μονάδες με αποτέλεσμα η μειωμένη ισχύς εξόδου. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν ευρέως τη σταθερότητα της μονάδας και η πρόβλεψη της υποβάθμισης είναι περίπλοκη. Η υποβάθμιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζεται κυρίως από τέσσερις κλιματικούς παράγοντες: Την θερμοκρασία, την ακτινοβολία, την υγρασία και τη μηχανική καταπόνηση που προκαλεί περαιτέρω υποβάθμιση όπως διάβρωση, αποχρωματισμός, αποκόλληση και θραύση. Η διαπερατότητα του πίσω μέρους ενός φωτοβολταϊκού πάνελ, ενισχύεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και υγρασία, καθώς η θερμοκρασία της μονάδας είναι πάντα μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η εισχώρηση υγρασίας στο πάνελ υποβαθμίζει το υλικό πρόσφυσης μεταξύ της φωτοβολταϊκής κυψέλης και του μεταλλικού πλαισίου, προκαλώντας διάβρωση με αποτέλεσμα τη διαρροή του ρεύματος. Η εισροή υγρασίας λόγω υψηλότερης υγρασίας και θερμοκρασίας, όπως και οι ακτίνες UV διαβρώνουν τη μεταλλική επιφάνεια και αυξάνει την ελασματοποίηση μεταξύ του ηλιακού στοιχείου και του υλικού EVA. Άλλοι κλιματολογικοί παράγοντες όπως το χιόνι και ο άνεμος δημιουργούν μηχανική καταπόνηση στη φωτοβολταϊκή μονάδα. Οι καταιγίδες με χαλάζι προκαλούν ζημιά σε γυάλινες μονάδες, και η αμμοθύελλα προκαλεί φθορά στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου [50].

## 3.4 Είδη φωτοβολταϊκών πάνελ

Τα είδη των φωτοβολταϊκών πάνελ, είναι τα παρακάτω:

- Φ/Β Ημιαγωγοί Λεπτών Υμενίων (thin films)
- Φ/Β μονο-κρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon)
- Φ/Β πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου (Multi-crystalline Silicon)
- Φ/Β άμορφου Πυριτίου (Amorphous or thin Silicon)

#### 3.4.1 Φ/Β Ημιαγωγοί Λεπτών Υμενίων (thin films)

Τα πάνελ λεπτής μεμβράνης ή αλλιώς λεπτού υμενίου (Thin-Film) παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, όπως και τα παραδοσιακά συστήματα. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι είναι πολύ ελαφριά και εύκαμπτα κύτταρα. Αυτό οφείλεται στη δομή τους, η οποία αποτελείται από πολλαπλά λεπτά στρώματα φωτοβολταϊκών υλικών.

Τα στρώματα αυτά έχουν πάχος περίπου 300 έως 350 φορές μικρότερο από το τυπικό πυρίτιο. Αυτό τα καθιστά ιδανική λύση για εγκατάσταση σε φορητές συσκευές, σε μέσα μεταφοράς ή για την ενσωμάτωσή τους σε κτηριακές δομές. Κάθε στοιχείο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό υλικό, ένα αγώγιμο φύλλο και ένα προστατευτικό στρώμα.

Εκτός από τα παραπάνω, τα πάνελ λεπτού υμενίου χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά για την παραγωγή τους, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πάνελ, μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Σε αντίθεση με τα πάνελ μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τα πάνελ λεπτής μεμβράνης έχουν χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, η απόδοσή τους και η πυκνότητα ισχύος μειώνεται. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις αυτού του τύπου ηλιακών πάνελ, ήταν η απόδοσή τους, η οποία διαφέρει ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους που υπάρχουν. Ωστόσο, λόγω της συνεχούς έρευνας των τελευταίων ετών, η απόδοσή τους βελτιώνεται σημαντικά.

#### 3.4.1.1 Τύποι ηλιακών κυψελών λεπτού υμενίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα πάνελ λεπτού υμενίου διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Η κάθε κατηγορία έχει την δική της κατασκευή, από διαφορετικά υλικά, τα οποία επηρεάζουν την απόδοση και το κόστος των πάνελ. Παρόλα αυτά, όλες οι κατηγορίες των πάνελ λεπτού υμενίου έχουν όμοια δομή, καθώς συμπεριλαμβάνουν φωτοβολταϊκό υλικό, ένα αγώγιμο φύλλο και ένα προστατευτικό στρώμα.

Παρακάτω, περιγράφονται οι τέσσερις συνηθέστεροι τύποι φωτοβολταϊκών υμενίων.

#### 3.4.1.2 Άμορφοι ηλιακοί συλλέκτες

Η τεχνολογία λεπτού υμενίου που αναπτύχθηκε πρώτη, είναι αυτή του ηλιακού άμορφου πυριτίου. Η τεχνολογία αυτή, αποτελεί την πλέον αναπτυγμένη τεχνολογία, έναντι άλλων σε φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου. Η διαδικασία κατασκευής του, στηρίζεται στην εναπόθεση χημικών ατμών, προκειμένου να τοποθετηθεί ένα λεπτό στρώμα πυριτίου πάνω στη βάση του, η οποία μπορεί να είναι είτε γυάλινη, είτε πλαστική είτε μεταλλική.

Τα άμορφα πάνελ εκμεταλλεύονται ένα μεγάλο εύρος του φάσματος του ηλιακού φωτός και επιπλέον διατηρούν ένα αξιοσημείωτο βαθμό απόδοσης σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η ελαστικότητά στις, η οποία τα καθιστά λιγότερο ανθεκτικά σε ρωγμές. Επιπλέον, λόγω στις ελαστικότητάς στις, αποτελούν μια καλή λύση για εφαρμογές, στις οποίες η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών γίνεται σε επιφάνειες οι οποίες παρουσιάζουν καμπυλότητα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των άμορφων πάνελ, έναντι άλλων φωτοβολταϊκών, είναι ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα μειώνεται η απόδοσή στις. Ο βαθμός απόδοσης των άμορφων ηλιακών κυττάρων κυμαίνεται μεταξύ 6% και 8%.

Παρόλο που τα άμορφα πάνελ, αποτελούν μια τεχνολογία λεπτού υμενίου που θα χρησιμοποιηθούν ευρέως στο μέλλον, ο χαμηλός βαθμός απόδοσής στις τα καθιστά μη

αποτελεσματική λύση για το μέσο σπίτι. Συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά πάνελ άμορφου πυριτίου μπορούν να αποδώσουν μόνο μία ποσότητα ενέργειας, η οποία αντιστοιχεί στο ένα τρίτο στις ενέργειας που μπορεί να αποδώσει ένα τυπικό ηλιακό πάνελ. Στις από τις εφαρμογές στις οποίες ενδείκνυται η χρήση άμορφου πυριτίου είναι σε αριθμομηχανές, σε φώτα εξωτερικού χώρου και σε μικρά gadget.

#### 3.4.1.3 Πάνελ Τελλουρίου Καδμίου (CdTe)

Παρόλο που τα ηλιακά κύτταρα άμορφου πυριτίου είναι περισσότερο ανεπτυγμένα, τα ηλιακά κύτταρα τελλουρίου καδμίου είναι η περισσότερο διαδεδομένη κατηγορία δομοστοιχείων λεπτής μεμβράνης. Τα ηλιακά κύτταρα τελλουρίου καδμίου αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία φωτοβολταϊκών πάνελ παγκοσμίως, μετά τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου.

Η κατασκευή αυτών των κυττάρων πραγματοποιείται με τελλουρίδιο του καδμίου, το οποίο αποτελεί μια χημική ένωση κατάλληλη για τη δέσμευση του ηλιακού φωτός και την μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ηλιακών κυττάρων τελλουριδίων του καδμίου είναι το μικρότερο κόστος τους, έναντι άλλων κατηγοριών κυψελών λεπτής μεμβράνης, με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερο χρόνο απόσβεσης. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι τα πάνελ τελλουριδίου του καδμίου έχουν το μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα στο περιβάλλον σε σχέση με τα υπόλοιπα πάνελ λεπτού υμενίου.

Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτών των ηλιακών κυττάρων είναι η περιεκτικότητά τους σε κάδμιο το οποίο είναι τοξικό στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να είναι απαραίτητη η λήψη ειδικών μέτρων για την προστασία έναντι αυτού του συστατικού. Οι συνέπειες αυτού του τοξικού στοιχείου, τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον, δεν απαντώνται κατά τη διαδικασία κατασκευής ή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά κατά την απόρριψη παλαιών πάνελ. Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι

η δυσκολία στην εύρεση του τελλουριδίου, το οποίο εμποδίζει τη διεύρυνση της παραγωγής τους.

#### 3.4.1.4 Ηλιακά πάνελ Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)

Η κατασκευή των πάνελ λεπτής μεμβράνης γαλλίου σεληνιούχου ινδίου βασίζεται στον συνδυασμό στρωμάτων χαλκού, ινδίου και δισελενιδίου. Ο συνδυασμός τους πραγματοποιείται με την τοποθέτηση των στρωμάτων αυτών, το ένα πάνω στο άλλο, έτσι ώστε να δημιουργείται ένας ισχυρός ημιαγωγός. Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, μπορεί να τοποθετηθεί επάνω σε διάφορα υλικά, όπως το γυαλί, το πλαστικό, ο χάλυβας και το αλουμίνιο.

Η ευκαμπτότητα αυτών των ηλιακών πάνελ, έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα χρήσης τους με ποικίλους τρόπους, στους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συμβατικά ηλιακά πάνελ. Τα ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης γαλλίου σεληνιούχου ινδίου μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις που ξεπερνούν το 20%. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, είναι ότι σε πολλά πάνελ χρησιμοποιείται επίσης κάδμιο το οποίο όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, είναι η τοξική ουσία που βρίσκεται και στα πάνελ τελλουριδίου του καδμίου. Η συνεχής έρευνα επάνω σε αυτήν την τεχνολογία, έχει οδηγήσει στην αντικατάσταση αυτής της χημικής ουσίας, με οξείδια ψευδαργύρου, τα οποία είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα συναντάται στην τιμή αυτών των πάνελ τα οποία λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής είναι δύσκολο να ανταγωνιστούν τα ηλιακά πάνελ τελλουριδίου του καδμίου ή πυριτίου.

#### 3.4.1.5 Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV) ηλιακά πάνελ

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούν αγώγιμα οργανικά πολυμερή αλλά και μικρά οργανικά μόρια για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, σε ηλεκτρική. Σε αυτήν την κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων πραγματοποιείται η τοποθέτηση λεπτών



οργανικών ατμών ή διαλυμάτων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των οργανικών υλικών που χρησιμοποιούνται είναι η αφθονία τους, η οποία συμβάλλει στο χαμηλότερο κόστος αγοράς τους. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτών των πάνελ είναι η χαμηλή τους απόδοση, η οποία είναι περίπου 11%. Το γεγονός αυτό, αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα από τη χρήση τους σε ευρεία κλίμακα. Επίσης, τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα χαρακτηρίζονται από μικρότερη διάρκεια ζωής, σε σχέση με τα συμβατικά ηλιακά πάνελ, αλλά και τις υπόλοιπες τεχνολογίες λεπτού υμενίου.

#### 3.4.1.6 Thin-Film vs Παραδοσιακά ηλιακά πάνελ

Η πλέον σημαντική διαφορά μεταξύ των ηλιακών πάνελ λεπτού υμενίου με τα παραδοσιακά ηλιακά πάνελ είναι ότι στα πάνελ λεπτού υμενίου η επιφάνεια έχει λεπτά στρώματα φωτοβολταϊκού υλικού. Αντίθετα, τα παραδοσιακά ηλιακά πάνελ, χωρίζονται σε κυψέλες, όπως πολυκρυσταλλικές και μονοκρυσταλλικές.

Επιπλέον, λόγω της χρήσης στρωμάτων υλικού, αντί για άκαμπτες κυψέλες, τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου μπορούν να κατασκευαστούν με χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκαμπτα και ελαφριά. Επιπρόσθετα, στα πάνελ λεπτού υμενίου υπάρχουν αυτοκόλλητα πάνελ τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως παράθυρα και άλλες κάθετες επιφάνειες.

Τα ηλιακά πάνελ λεπτού υμενίου αποτελούν μια τεχνολογία η οποία θα χρησιμοποιηθεί ευρέως στο μέλλον. Παρόλο που ακόμα δεν είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά με τα παραδοσιακά ηλιακά πάνελ, λόγω της χαμηλής τους απόδοσης, η εξέλιξή τους στο μέλλον θα διευρύνει την χρήση τους.

Επίσης, ενώ οι χαμηλές τους τιμές αποτελούν κίνητρο για την χρήση τους, η τοξικότητα του καδμίου είναι πιθανό να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα, όταν απορριφθούν οι φωτοβολταϊκές μονάδες.

#### 3.4.2 Φ/Β μονο-κρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon)

Ένα μονοκρυσταλλικό ηλιακό πάνελ είναι ένα ηλιακό πάνελ που αποτελείται από μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα. Η ονομασία αυτών των πάνελ προήλθε από ένα κυλινδρικό πλινθίο πυριτίου, το οποίο σχηματίζεται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, δηλαδή όπως ένας ημαγωγός. Το κύτταρο περιλαμβάνει έναν ενιαίο κρύσταλλο, με αποτέλεσμα να καθιστά ικανή την κίνηση των ηλεκτρονίων. Το κυλινδρικό πλινθίο κόβεται σε φωτοβολταϊκά δισκία πυριτίου, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται κελιά. Λόγω της χρησιμότητας των κυψελών, τα κυκλικά φωτοβολταϊκά δισκία πυριτίου κόβονται με σύρμα και σχηματίζουν φωτοβολταϊκά δισκία πυριτίου οκταγωνικού σχήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα κύτταρα αυτά να έχουν μοναδική εμφάνιση και ομοιόμορφο χρώμα.

##### 3.4.2.1 Κατασκευή μονοκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ονομασία των μονοκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ σχηματίζεται σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής τους. Τα φωτοβολταϊκά δισκία πυριτίου, τα οποία περιέχονται σε κάθε ηλιακό κύτταρο, κατασκευάζονται από μόνο έναν κρύσταλλο πυριτίου. Αυτός ο κρύσταλλος, κατασκευάζεται με τη μέθοδο Czochralski στην οποία ένας κρύσταλλος ο οποίος αποκαλείται «σπόρος» τοποθετείται σε μια δεξαμενή λιωμένου καθαρού πυριτίου σε υψηλή θερμοκρασία. Έπειτα, ο «σπόρος» απομακρύνεται και το λιωμένο πυρίτιο αποκτά μορφή γύρω του σχηματίζοντας έτσι έναν κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος μεγαλύτερου μεγέθους, ο οποίος αλλιώς ονομάζεται και ράβδος, διαχωρίζεται σε λεπτά δισκία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλιακών κυψελών. Τα περισσότερα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου αποτελούνται από 60 ή 72 ηλιακά κύτταρα. Ο αριθμός τους καθορίζεται από το μέγεθος του πάνελ. Στις

περισσότερες οικιακές εγκαταστάσεις συναντάται η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου 60 κυψελών.

#### 3.4.2.2 Εφαρμογές μονοκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών

Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ χρησιμοποιούνται για πληθώρα εφαρμογών, μερικές εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος έναντι άλλων υλικών, δηλαδή μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα διαδεδομένα, σε εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ηλιακές στέγες, τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές.
- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, όπως είναι οι μεγάλες εκτάσεις γης.
- Μία ακόμα εφαρμογή αυτών των πάνελ, συναντάται σε πάνελ μικρότερης ισχύος (5 έως 25 Watt) τα οποία χρησιμοποιούνται για την φόρτιση ηλεκτρονικών συσκευών (smartphones, κάμερες, κινητές συσκευές)
- Επίσης, χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία συσκευών με περισσότερες απαιτήσεις ισχύος, όπως ψυγεία και φούρνοι μικροκυμάτων. Για τις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούνται πάνελ ισχύος μεταξύ 40 και 130 Watt.
- Χρησιμοποιούνται, επίσης, ενσωματωμένα σε φωτιστικά υπαίθριων χώρων κατοικιών, καθώς και για τον φωτισμό δημόσιων δρόμων.

- Συναντώνται, επίσης, σε αγροτικές κατοικίες, οι οποίες βρίσκονται μακριά από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 3.4.2.3 Κόστος μονοκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών

Ο τρόπος κατασκευής των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα καθιστά αρκετά κοστοβόρα, έναντι άλλων κατηγοριών ηλιακών συλλεκτών. Επιπλέον, η υψηλή τους απόδοση και η υψηλή πυκνότητα ισχύος τους αποτελούν παράγοντες που αυξάνουν επιπλέον το κόστος.

Τα ηλιακά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου κοστίζουν περίπου 0,05€/Watt περισσότερο από ότι τα πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η απλοποίηση της κατασκευής έχουν προκαλέσει την μείωση της διαφοράς μεταξύ των τιμών των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

#### 3.4.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μονοκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι από τα πιο αποδοτικά ηλιακά στοιχεία της αγοράς, λόγω αρκετών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Ωστόσο έχουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου:

- Υψηλός βαθμός απόδοσης: 17%-22%.
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος (λιγότερες απαιτήσεις χώρου)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής: περίπου 25 χρόνια
- Υψηλή αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες
- Σχετικά υψηλή απόδοση σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου:

- Υψηλό κόστος αγοράς
- Σημαντική μείωση της απόδοσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- Περιβαλλοντική επιβάρυνση από τα απόβλητα που προκαλούνται από το κόψιμο του πυριτίου, κατά την κατασκευή.

### 3.4.3 Φ/Β πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου (Multi-crystalline Silicon)

Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ είναι ηλιακά πάνελ, τα οποία μετατρέπουν την ενέργεια του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιέχουν αρκετούς κρυστάλλους πυριτίου σε μία μόνο φωτοβολταϊκή κυψέλη. Γίνεται χύτευση πολλών θραυσμάτων πυριτίου προκειμένου να δημιουργηθούν τα φωτοβολταϊκά δισκία πυριτίου, που εμφανίζονται στους πολυκρυσταλλικούς ηλιακούς συλλέκτες. Στην συνέχεια, γίνεται το κρύωμα της δεξαμενής που περιέχει το χυτευμένο πυρίτιο, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των κυψελών. Καθώς τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ αποτελούνται από πολλούς κρυστάλλους πυριτίου, έχουν ένα τετράγωνο σχήμα και μια μπλε απόχρωση. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει πολλούς κρυστάλλους πυριτίου, με αποτέλεσμα την ελάχιστη κίνηση των ηλεκτρονίων στα κύτταρα των πολυκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ.

#### 3.4.3.1 Λειτουργία πολυκρυσταλλικών πάνελ

Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ αποτελούνται από πολλαπλά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Κάθε κυψέλη συμπεριλαμβάνει κρυστάλλους πυριτίου, με αποτέλεσμα τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ να λειτουργούν ως ημιαγωγοί. Καθώς τα φωτόνια προσπίπτουν στην διεπαφή PN, κάθε κυψέλη μεταδίδει στα ηλεκτρόνια ενέργεια, με αποτέλεσμα την πρόκληση της κίνησης των ηλεκτρονίων, η οποία στη συνέχεια προκαλεί την διαφορά δυναμικού. Ενώ τα υλικά τύπου P έχουν ελάχιστα ηλεκτρόνια, τα υλικά τύπου N είναι άφθονα σε ηλεκτρόνια. Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στην πάνω επιφάνεια και

συνδέεται με το φωτοβολταϊκό κύτταρο, συμπεριλαμβάνει μικρά σύρματα. Το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το φωτοβολταϊκό κύτταρο και βρίσκεται στο κάτω μέρος μοιάζει σαν αγωγός.

Αυτά τα ηλιακά πάνελ είναι κατασκευασμένα από πολλαπλά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Κάθε κυψέλη περιέχει κρυστάλλους πυριτίου που το κάνουν να λειτουργεί ως συσκευή ημιαγωγών. Όταν τα φωτόνια από το ηλιακό φως πέφτουν στη διασταύρωση PN (διασταύρωση μεταξύ υλικών τύπου N και τύπου P), μεταδίδει ενέργεια στα ηλεκτρόνια έτσι ώστε να μπορούν να ρέουν ως ηλεκτρικό ρεύμα. Εδώ, τα υλικά τύπου P έχουν έλλειψη ηλεκτρονίων ενώ τα υλικά τύπου N έχουν άφθονα ηλεκτρόνια. Δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με τα Φ/Β κύτταρα. Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια περιέχει μικρά σύρματα ενώ το ηλεκτρόδιο στο κάτω μέρος είναι ένας αγωγός σαν φύλλο.

#### 3.4.3.2 Χαρακτηριστικά των πολυκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ

Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ είναι περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ δεν χρειάζονται χωριστή διαμόρφωση και τοποθέτηση των κρυστάλλων. Επίσης, ένα χαρακτηριστικό που τα καθιστά περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον είναι ότι κατά την παραγωγή τους χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο μέρος του πυριτίου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η παραγωγή των αποβλήτων. Επιπλέον μερικά από τα χαρακτηριστικά των πολυκρυσταλλικών ηλιακών πάνελ είναι τα εξής:

- Το εύρος των αποδεκτών θερμοκρασιών για τους πολυκρυσταλλικούς ηλιακούς συλλέκτες κυμαίνεται από τους  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως τους  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ έχουν μικρότερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα πάνελ αυτά να έχουν χαμηλότερη απόδοση από τα υπόλοιπα, σε υψηλές θερμοκρασίες.

- Οι πολυκρυσταλλικοί ηλιακοί συλλέκτες χαρακτηρίζονται από υψηλότερο συντελεστή θερμοκρασίας σε σχέση με τους μονοκρυσταλλικούς συλλέκτες.
- Αυτά τα πάνελ παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος.
- Έχουν το δικό τους δομικό πλαίσιο, με αποτέλεσμα η τοποθέτηση να είναι φθηνότερη και απλούστερη.

#### 3.4.3.3 Εφαρμογές πολυκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών

Οι εφαρμογές των πολυκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η συνηθέστερη χρήση των πολυκρυσταλλικών πάνελ αποτελεί η εγκατάστασή τους σε οροφές κτηρίων.
- Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ χρησιμοποιούνται σε ηλιακά πάρκα προκειμένου να αξιοποιηθεί η ενέργεια του ήλιου για να μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο.
- Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ έχουν ευρεία χρήση για την τροφοδότηση αυτόνομων ή αυτοτροφοδοτούμενων συσκευών, όπως είναι τα φανάρια και ο δημόσιος φωτισμός σε απομακρυσμένες περιοχές. Επίσης χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση κατοικιών οι οποίες βρίσκονται εκτός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (off-grid).

### 3.5 Έλεγχος MPPT

#### 3.5.1 Εισαγωγή

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέρος της σχεδίασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο έλεγχος εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Max Power Point Tracker - MPPT). Ο έλεγχος MPPT παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της μέγιστης απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού, καθώς μέσω αυτού επιτυγχάνεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η σημαντικότητα του ελέγχου MPPT στα φωτοβολταϊκά συστήματα έχει προκαλέσει την έρευνα της επιστημονικής κοινότητας για την εύρεση τεχνικών ελέγχου, οι οποίες πρέπει να επιτυγχάνουν την άμεση εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος, τόσο σε περιπτώσεις ολικής ηλιοφάνειας όσο και κατά τη διάρκεια μερικής σκίασης. Με γνώμονα τα παραπάνω, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος τεχνικών MPPT, η χρήση των οποίων διαφέρει, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η εφαρμογή του εκάστοτε αλγορίθμου για τον έλεγχο ενός φωτοβολταϊκού πραγματοποιείται μέσω του μετατροπέα dc-dc που υπάρχει στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Συγκεκριμένα, το σήμα εξόδου του ελέγχου MPPT αντιστοιχεί σε ένα duty cycle για τον παλμό οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Στην ενότητα αυτή, αναλύεται η λειτουργία των πιο διαδεδομένων τεχνικών MPPT, καθώς και ο αλγόριθμος MPPT ο οποίος έχει επιλεγεί για την υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

#### 3.5.2 Μέθοδοι υλοποίησης MPPT

Οι μέθοδοι MPPT μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με την πολυπλοκότητά τους σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι απλούστεροι αλλά και πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι, ενώ στη δεύτερη ανήκουν πιο σύνθετοι αλγόριθμοι, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω. Επίσης, υπάρχει και μία τρίτη κατηγορία ελέγχου φωτοβολταϊκών συστημάτων, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, στις οποίες δεν είναι απαραίτητη η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος, αλλά επιθυμείτε η λειτουργία του φωτοβολταϊκού σε ένα συγκεκριμένο σημείο της χαρακτηριστικής P-V καμπύλης.



Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι:

- Διαταραχής και παρατήρησης (P&O)
- Αυξητικής αγωγιμότητας (InC)
- Μέθοδος τάσης ανοιχτοκύκλωσης και ρεύματος βραχυκύκλωσης

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι, οι οποίοι αναπτύσσονται με τη χρήση:

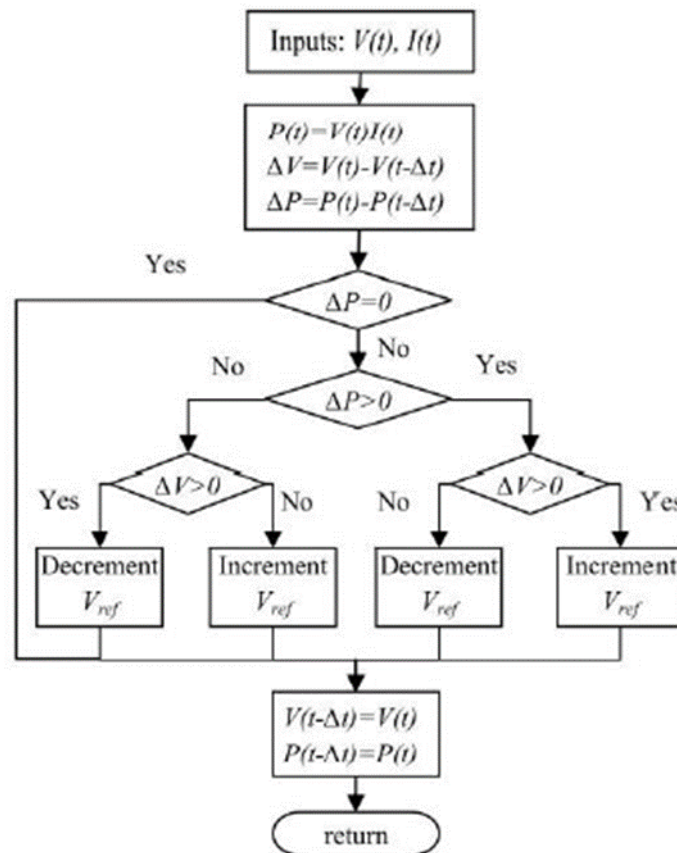
- Ασαφούς λογικής (Fuzzy logic)
- Τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN)
- Μηχανικής μάθησης (Machine learning)

Τέλος, σε κάποιες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η λειτουργία του φωτοβολταϊκού σε ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης P-V, καθώς απαιτείται ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος ή τάσης στην έξοδο του φωτοβολταϊκού, το οποίο είναι διαφορετικό από αυτό του σημείου μέγιστης ισχύος.

#### 3.5.2.1 Αλγόριθμος διαταραχής και παρατήρησης (P&O)

Ο αλγόριθμος P&O είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος και μελετάται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Όπως φαίνεται σε αυτό, αρχικά μετράται το ρεύμα και η τάση εξόδου και υπολογίζεται η ισχύς. Στον αλγόριθμο P&O γίνεται μια διαταραχή στην τάση λειτουργίας (V) και έτσι υπολογίζεται εκ νέου η ισχύς. Επομένως, αν η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια αυξάνεται, τότε στην επόμενη διαταραχή θα πραγματοποιηθεί μεταβολή της τάσης προς την ίδια κατεύθυνση. Σε περίπτωση που η νέα ισχύς είναι μικρότερη, τότε το σημείο λειτουργίας έχει απομακρυνθεί από το MPP και η τάση τροποποιείται προς την

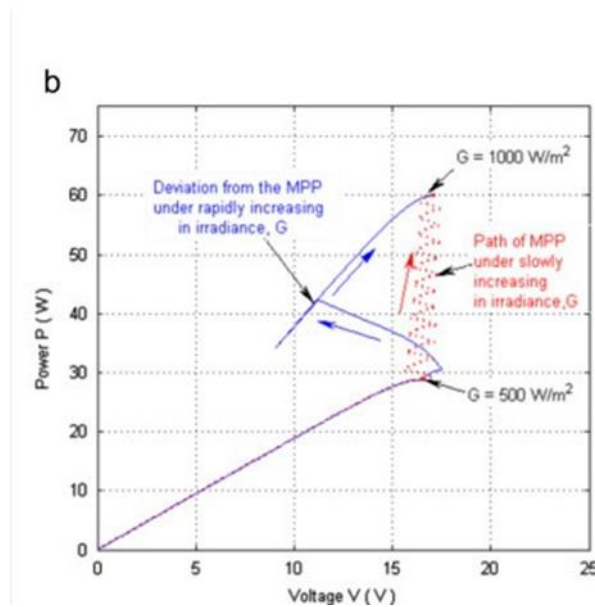
αντίθετη κατεύθυνση. Μετά από πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου, επιτυγχάνεται η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ροής της μεθόδου MPPT P&O

Η μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης δεν σταματά ποτέ στο σημείο μέγιστης ισχύος, αλλά συνεχίζει να ταλαντώνεται γύρω αυτό καθώς μεταβάλλεται συνεχώς η τάση εξόδου. Όταν φτάσει στο σημείο μέγιστης ισχύος, η μεταβολή της τάσης καταλήγει στη μείωση ισχύος και επομένως αλλαγή της κατεύθυνσης μεταβολής, το οποίο θα επαναληφθεί και από την αντίθετη κατεύθυνση κ.ο.κ. Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου στο σημείο MPP εξαρτάται από το βήμα μεταβολής του λόγου κατάτμησης, και κατ' επέκταση της τάσης. Μεγαλύτερο βήμα θα σήμαινε μεν ταχύτερη απόκριση αλλά θα προκαλούνταν μεγαλύτερες ταλαντώσεις γύρω από το σημείο MPP με άμεση συνέπεια, μειωμένη ισχύ. Αντίστοιχα, με μικρότερο βήμα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια γύρω από το σημείο MPP αλλά θα υπήρχε μείωση στον χρόνο απόκρισης. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι P&O μεταβλητού βήματος [57]. Όταν το σημείο λειτουργίας δεν βρίσκεται κοντά στο σημείο MPP, χρησιμοποιείται μεγαλύτερο βήμα, ενώ

όταν βρίσκεται κοντά μειώνεται προκειμένου να μειωθεί και το εύρος της ταλάντωσης γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η διαδρομή MPP με τον αλγόριθμο P&O, κάτω από αργά (διακεκομμένη γραμμή) και γρήγορα (συνεχόμενη γραμμή) μεταβαλλόμενη ακτινοβολία.



Σχήμα 3.6 Διαδρομή MPP με τον αλγόριθμο P&O κάτω από αργά (διακεκομμένη γραμμή) και γρήγορα (συνεχόμενη γραμμή) μεταβαλλόμενη ακτινοβολία.

### 3.5.2.2 Αυξητικής αγωγιμότητας (InC)

Η αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου InC βασίζεται στην σύγκριση του λόγου της παραγώγου αγωγιμότητας με την στιγμιαία αγωγιμότητα [58]. Απλούστερα, η λειτουργία αυτού του αλγορίθμου βασίζεται στην κλίση της καμπύλης P-V. Συγκεκριμένα, εκατέρωθεν του σημείου μέγιστης ισχύος η καμπύλη έχει διαφορετική κλίση. Σχηματίζεται λόγω του ότι η παράγωγος ισχύος στο MPP, σε αντίθεση με την τάση ( $dP/dV$ ) είναι στην πραγματικότητα μηδέν, δηλ.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή:

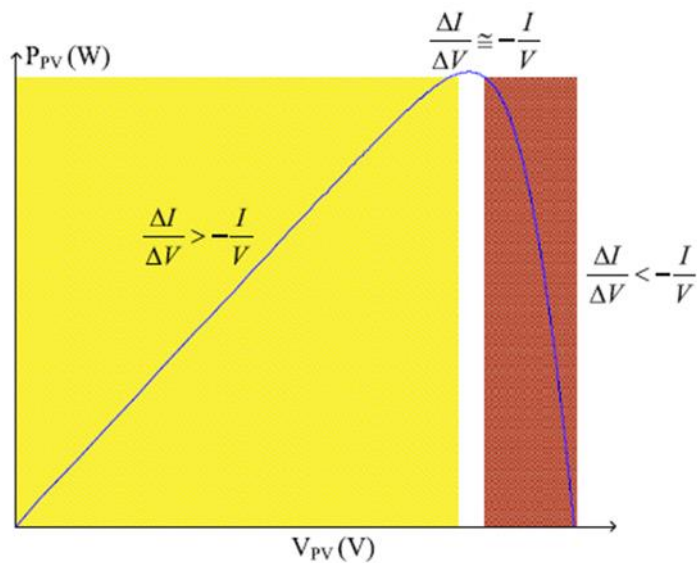
$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \cong \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2)$$

όπου τα  $\Delta I$  και  $\Delta V$  παριστάνουν, αντίστοιχα, τις μεταβολές του ρεύματος και της τάσης του φωτοβολταϊκού. Από την χαρακτηριστική καμπύλη P-V, η οποία ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7, προκύπτει:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \Rightarrow V = V_{MPP}$$

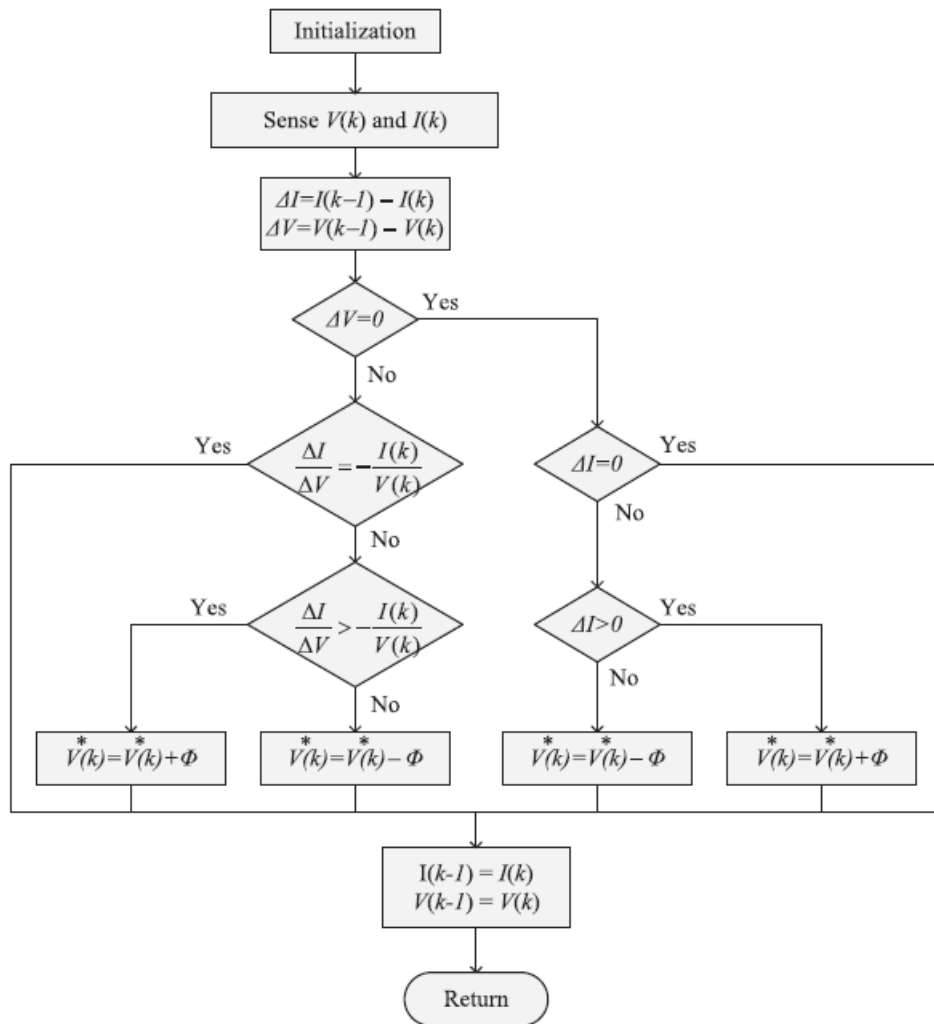
$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \Rightarrow V < V_{MPP}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \Rightarrow V > V_{MPP}$$



Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με τις εξισώσεις της μεθόδου InC

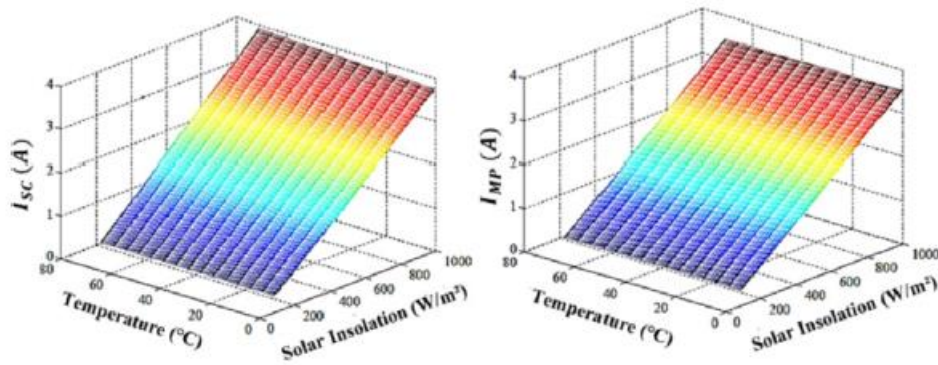
Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει το βασικό διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο InC, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8. Μια σημαντική παράμετρος για τον αλγόριθμο InC αποτελεί το βήμα της μεταβολής του duty cycle. Το κατάλληλο βήμα επιλέγεται προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή απόκλιση από το σημείο μέγιστης ισχύος, καθώς επίσης και η ταχύτερη εύρεση του σημείου αυτού.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου InC.

### 3.5.2.3 Μέθοδος κλασματικού ρεύματος βραχυκυκλώματος

Η μέθοδος FSCC βασίζεται στη σχέση που υπάρχει μεταξύ της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Η τρισδιάστατη γραφική παράσταση των  $I_{sc}$  και  $I_{mp}$  για διακυμάνσεις ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

Όπως παρατηρείται και στο σχήμα, η σχέση μεταξύ των  $I_{mp}$  και  $I_{sc}$  είναι γραμμική, δηλαδή  $I_{sc} = k_i \cdot I_{mp}$ , όπου το  $k_i$  είναι η σταθερά αναλογίας των δυο ρευμάτων. Η μέθοδος αυτή αφορά κάθε φωτοβολταϊκό ξεχωριστά, καθώς το  $k_i$  προσδιορίζεται εκ νέου για κάθε φωτοβολταϊκό, αλλά και για διαφορετικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός του δείκτη  $k_i$  πραγματοποιείται με την υλοποίηση πειραματικών δοκιμών ή με την υλοποίηση προσομοιώσεων για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό της εκάστοτε εφαρμογής. Ο προσδιορισμός του δείκτη  $k_i$  μέσω πειραματικών δοκιμών αποδίδει πιο ρεαλιστικά στοιχεία. Ωστόσο, με την χρήση τροφοδοτικών που εξομοιώνουν τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού είναι δυνατή η επίτευξη της εύρεσης του συντελεστή  $k_i$ .

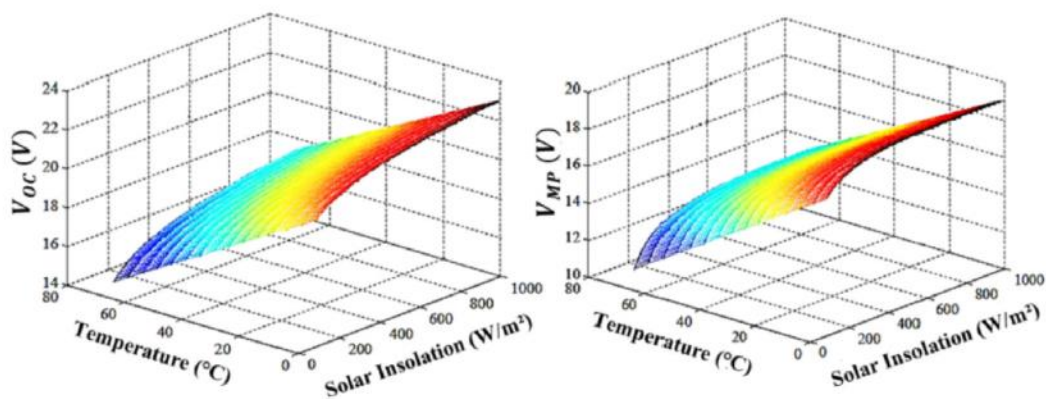
Για το μεγαλύτερο ποσοστό των φωτοβολταϊκών πάνελ, το  $k_i$  κυμαίνεται μεταξύ 78% και 92% του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι θα πρέπει η αναζήτηση του μεγίστου να διακόπτεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να υπολογίζεται εκ νέου το  $I_{sc}$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τον μηδενισμό της ισχύος εξόδου του κυκλώματος.

### 3.5.2.4 Μέθοδος τάσης ανοιχτοκύκλωσης

Ομοίως, για την μέθοδο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (FOCV), και αυτή βασίζεται στη σχέση που υπάρχει μεταξύ της τιμής της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.

Έτσι, ομοίως, η σχέση μεταξύ της  $V_{oc}$  και της  $V_{mp}$  είναι γραμμική, δηλαδή  $V_{oc}=k_j*V_{mp}$ , όπου  $k_j$  η σταθερά αναλογίας των δύο τάσεων. Όπως και στην περίπτωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ο υπολογισμός του δείκτη  $k_j$  πραγματοποιείται με την υλοποίηση πειραματικών δοκιμών ή με την υλοποίηση προσομοιώσεων για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό, της εκάστοτε εφαρμογής. Ο προσδιορισμός του δείκτη  $k_j$  μέσω πειραματικών δοκιμών αποδίδει πιο ρεαλιστικά στοιχεία. Ωστόσο, με την χρήση τροφοδοτικών που εξομοιώνουν τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού είναι δυνατή η επίτευξη της εύρεσης του συντελεστή  $k_j$ .

Για τα περισσότερα φωτοβολταϊκά της αγοράς, το  $k_j$  κυμαίνεται μεταξύ 71% και 84% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Όπως και στην περίπτωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, αντιμετωπίζεται το ίδιο πρόβλημα για τον προσδιορισμό της τάσης ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 3.10 Τρισδιάστατη γραφική παράσταση  $V_{oc}$  και  $V_{mp}$  για διακυμάνσεις ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

## Κεφάλαιο 4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

### 4.1 Ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

#### 4.1.1 Ενεργειακά Συστήματα και Δίκτυα

Από όσα έχουν ήδη αναφερθεί, είναι ξεκάθαρο ότι το μέλλον της παραγωγής ενέργειας που θα βελτιώσει τόσο τη βιωσιμότητα όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής ενέργειας, βρίσκεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όπως έχει αναλυθεί ευρέως στην βιβλιογραφία, τόσο η ηλιακή όσο και η αιολική ενέργεια αποτελούν τις πιο άφθονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η σύγχρονη κοινωνία θα λειτουργεί με την παραγόμενη ενέργεια από αυτές τις δύο μορφές. Προκειμένου να επιτευχθεί η μετατροπή αυτών των δύο μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική είναι απαραίτητο να υπάρξει ο κατάλληλος εξοπλισμός και οι κατάλληλες τεχνολογίες που θα το επιτρέψουν. Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, η μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρική ενέργεια μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητής τάσης. Για να ικανοποιηθεί η απαίτηση δικτύου για σταθερή συχνότητα 50 ή 60 Hz, είναι απαραίτητη η ύπαρξη πρόσθετου εξοπλισμού μετατροπής, σε αυτό περίπτωση για μετατροπή μεταβλητής συχνότητας, μεταβλητή τάση σε σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση, απαιτείται.

Για την ηλιακή ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ κυψέλης είναι η πιο δημοφιλής τεχνολογία για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν ισχύ συνεχούς ρεύματος σε μη ρυθμισμένη τάση. Με σκοπό να ικανοποιηθεί η απαίτηση του δικτύου για συγκεκριμένα επίπεδα συχνότητας και τάσης, απαιτείται η ύπαρξη ενός μετατροπέα DC-AC ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει την πηγή DC σε διάφορα επίπεδα τάσης σε μια τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας και σταθερής τάσης.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι σε οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων μετατροπέων, προκειμένου να επιτευχθούν οι



κατάλληλες προϋποθέσεις διασύνδεσης. Όσον αφορά τις συμβατικές μορφές ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμική ενέργεια (συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής), μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ατμοστροβίλων ή αεριοστροβίλων και σύγχρονων γεννητριών σταθερής ταχύτητας ή συχνότητας. Επίσης, η υδροηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω υδροστροβίλων και σύγχρονων γεννητριών σταθερής ταχύτητας και σταθερής συχνότητας.

Αφού παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια, είναι απαραίτητη η μεταφορά της στους καταναλωτές. Αυτή πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ή του δικτύου. Για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας η τάση στον ζυγό, μετά την παραγωγή, ανυψώνεται σε επαρκές επίπεδο τάσης, προκειμένου να εξασθενίσουν φαινόμενα που προκαλούν αυξημένες απώλειες. Στη συνέχεια, η τάση υποβιβάζεται στα επίπεδα του δικτύου διανομής, για την τροφοδότηση των καταναλωτών.

Στις περισσότερες σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές, απαιτείται τάση συνεχούς ρεύματος και επιτυγχάνεται μέσω της μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος των 50 ή 60 Hz σε συνεχές ρεύμα.

Από την απαρχή της εποχής της ηλεκτρικής ενέργειας, οι τεχνολογίες μεταφοράς και ελέγχου της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό μέρος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί μεγάλο πλήθος εξοπλισμού κατάλληλου για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στο πέρασμα των χρόνων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος περιλαμβάνει γραμμές μεταφοράς και διανομής, γεννήτριες, μετασχηματιστές, συσκευές διανομής, επαγωγείς ή αντιδραστήρες και συστοιχίες πυκνωτών.

Πολλά δεν δύναται να ελεγχθούν ή μπορούν να ελεγχθούν μόνο για σύνδεση ή αποσύνδεση με μηχανικούς διακόπτες. Άλλοι έχουν περιορισμένο εύρος ελέγχου, όπως ορισμένοι μετασχηματιστές. Επιπρόσθετα, και στην περίπτωση που είναι εφικτή η ύπαρξη

πλήρως ελεγχόμενου εξοπλισμού, όπως γεννήτριες, η δυναμική ελέγχου είναι σχετικά αργή εξαιτίας της ηλεκτρομηχανικής ή μαγνητικής φύσης του ελεγκτή. Σχεδόν κανένας παραδοσιακός εξοπλισμός ελέγχου δεν διαθέτει δυνατότητα μετατροπής συχνότητας (ένας περιστρεφόμενος μετασχηματιστής αποτελεί εξαίρεση), όπως απαιτείται από ορισμένα φορτία, παρόμοια με τις περιπτώσεις πηγών αιολικής και φωτοβολταϊκής ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθεί μετατροπή συχνότητας, ο εξοπλισμός μετατροπής που βασίζεται σε ηλεκτρονικά ισχύος θεωρείται απαραίτητος. Επιπλέον, οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να προσφέρουν αρκετά παραπάνω οφέλη σε σχέση με τον παραδοσιακό ηλεκτρομηχανικό ή ηλεκτρομαγνητικό εξοπλισμό.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι βασισμένα σε συσκευές ημιαγωγών. Οι συγκεκριμένες συσκευές προέρχονται από τρανζίστορ, διόδους κ.α., που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική ικανότητα χειρισμού ισχύος. Λόγω της ηλεκτρονικής τους φύσης, οι συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος είναι περισσότερο ευέλικτες και γρήγορες από τις αντίστοιχες ηλεκτρομηχανικές ή ηλεκτρομαγνητικές για τη μετατροπή, και τον έλεγχο ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την εμφάνιση των ηλεκτρονικών ισχύος στα τέλη της δεκαετίας του 1950, έχουν κερδίσει σταθερά έδαφος σε πληθώρα εφαρμογών. Σήμερα, οι μετατροπείς και οι ελεγκτές ηλεκτρονικών ισχύος είναι σημαντικό μέρος του εξοπλισμού για την παραγωγή, παράδοση και έλεγχο ηλεκτρικής ενέργειας και ο ρόλος τους αυξάνεται ραγδαία με τη συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και με τις αναδυόμενες ανάγκες όπως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα έξυπνα δίκτυα και τα ηλεκτρονικά φορτία. Μερικά παραδείγματα ηλεκτρονικών φορτίων αποτελούν οι μηχανισμοί κίνησης, σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV), κέντρα δεδομένων και άλλα ψηφιακά συστήματα.

## 4.2 Βασικές αρχές των Ηλεκτρονικών Ισχύος

### 4.2.1 Ηλεκτρικές Συσκευές Ημιαγωγών

Βασικό μέρος των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούν οι συσκευές ημιαγωγών ισχύος. Οι ηλεκτρονικές συσκευές ημιαγωγών ισχύος λειτουργούν μόνο ως διακόπτες για τον επιθυμητό έλεγχο των απαιτούμενων λειτουργιών, έτσι ώστε να παρουσιάζουν ελάχιστες απώλειες όταν είναι είτε ενεργοποιημένες (κλειστές) είτε απενεργοποιημένες (ανοιχτές). Ως αποτέλεσμα, οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούν τα βασικά κυκλώματα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τη δεκαετία του 1950, έχουν εφευρεθεί και αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι συσκευών ημιαγωγών ισχύος, οι οποίοι μπορούν επιπλέον να επιλεγούν με βάση τις εφαρμογές.

Η απόδοση μιας συσκευής ημιαγωγών ισχύος χαρακτηρίζεται κυρίως από τις ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος, απώλειες αγωγιμότητας ή κατάστασης, καθώς και από την διακοπτική συχνότητα και τις διακοπτικές απώλειες. Μερικές απ' τις πιο σημαντικές συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος είναι:

- Δίοδος ισχύος: Μια συσκευή δύο ακροδεκτών με παρόμοια χαρακτηριστικά με τις διόδους που χρησιμοποιούνται στη μικροηλεκτρονική αλλά με υψηλότερες τιμές τάσης και ισχύος.

- Thyristor: Ονομάζεται επίσης SCR (ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου). Σε αντίθεση με μια δίοδο, ένα θυρίστορ αποτελεί μια συσκευή με τρεις ακροδέκτες, με ένα πρόσθετο τερματικό πύλης. Η ενεργοποίηση του γίνεται με έναν παλμό οδήγησης μέσω της πύλης (GATE), ενώ αντίθετα η απενεργοποίηση λαμβάνει χώρα μόνο όταν το κύριο ρεύμα πάει στο μηδέν με εξωτερικά μέσα. Ένα θυρίστορ έχει χαμηλές απώλειες αγωγιμότητας αλλά αργές ταχύτητες μεταγωγής σε σύγκριση με άλλες συσκευές.

- GTO: σημαίνει θυρίστορ απενεργοποίησης πύλης. Ένα GTO μπορεί να ενεργοποιηθεί επίσης με έναν παλμό οδήγησης και μπορεί επίσης να απενεργοποιηθεί με μεγάλο παλμό ρεύματος αρνητικής πύλης. Τα GTO έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από τα IGBT και IGCT εξαιτίας των πολύπλοκων αναγκών οδήγησης πύλης και της αργής ταχύτητας μεταγωγής.

- Τρανζίστορ διπολικής διασταύρωσης ισχύος (BJT): Απαιτεί σήμα οδήγησης στην πύλη (GATE) για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση. Έχει αντικατασταθεί από IGBT και power MOSFET (τρανζίστορ πεδίου ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου) με απλούστερα σήματα πύλης και μεγαλύτερες διακοπτικές συχνότητες.

- Power MOSFET: Παρόμοιο με ένα τρανζίστορ φαινομένου πεδίου ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου για μικροηλεκτρονική και μπορεί να ενεργοποιηθεί και να απενεργοποιηθεί με ένα σήμα τάσης στην πύλη (GATE). Είναι η ταχύτερη διαθέσιμη συσκευή, ωστόσο παρουσιάζει σχετικά υψηλές απώλειες αγωγιμότητας και σχετικά χαμηλές ονομαστικές τιμές τάσης/ισχύος.

- IGBT: ορίζεται ως το διπολικό τρανζίστορ με μόνωση πύλης (GATE). Σε σύγκριση με ένα κανονικό BJT, μπορεί να ενεργοποιηθεί και να απενεργοποιηθεί με ένα παλμό οδήγησης στην πύλη (GATE), όπως τα MOSFET. Παρουσιάζει σχετικά χαμηλές απώλειες αγωγιμότητας και λειτουργεί σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες. Το IGBT γίνεται η κινητήρια δύναμη των ηλεκτρονικών ισχύος για εφαρμογές μέσης έως υψηλής ισχύος.

Εκτός από τις διόδους, όλες οι υπόλοιπες συσκευές παραπάνω είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν ή/και να απενεργοποιηθούν μέσω ενός σήματος οδήγησης. Επομένως, χαρακτηρίζονται ως ενεργά στοιχεία, ενώ οι διόδοι ονομάζονται παθητικά στοιχεία.

Ένα θυρίστορ ονομάζεται συχνά ημι-ενεργός διακόπτης, λόγω της έλλειψης ικανότητας ελεγχόμενης απενεργοποίησης.

#### 4.2.2 Τύποι μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος και βασικές τοπολογίες

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος βασίζονται σε κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος που περιέχουν ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος. Με διαφορετικούς τύπους ημιαγωγών διακοπών ισχύος, έχουν αναπτυχθεί πολλά ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος. Με βάση τις συναρτήσεις μετατροπής τους, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικούς τύπους:

- Rectifier – οι ανορθωτές μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC). Ανάλογα με τις πηγές AC, οι ανορθωτές μπορεί να είναι τριφασικοί ή μονοφασικοί. Ανάλογα με τους τύπους συσκευών, μπορεί να είναι παθητικές (βασισμένες σε δίοδο), ελεγχόμενες (ελεγχόμενες από θυρίστορ) ή ενεργές.
- Inverter – Μετατρέπουν το DC σε AC. Είναι επίσης τριφασικοί ή μονοφασικοί. Οι μετατροπείς γενικά απαιτούν ενεργές συσκευές μεταγωγής.
- Μετατροπέας DC–DC: ονομάζονται επίσης choppers. Οι μετατροπείς DC–DC μετατρέπουν ένα επίπεδο τάσης DC σε ένα άλλο. Μερικές φορές περιλαμβάνουν μαγνητική μόνωση.
- Μετατροπέας AC/AC: μετατρέπει απευθείας το εναλλασσόμενο ρεύμα σε εναλλασσόμενο διαφορετικού επιπέδου τάσης ή συχνότητας.

Επιπλέον, καθένας από τους τύπους μετατροπέων μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω. Για παράδειγμα, ένας μετατροπέας μπορεί να έχει μονοκατευθυντήρια ροή ισχύος ή αμφίδρομη ροή ισχύος. Εκτός από τους μετατροπείς DC-DC, άλλοι τύποι μπορούν επίσης να έχουν απομόνωση, αν και αυτό είναι λιγότερο δημοφιλές σε εφαρμογές.

Υπάρχει μια ποικιλία τοπολογιών μετατροπών για κάθε τύπο μετατροπέα που αναφέρονται παραπάνω. Για εφαρμογές υψηλής ισχύος όπως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και δίκτυα κοινής ωφέλειας, η βασική τοπολογία είναι το VSC. Το VSC το οποίο στηρίζεται σε IGBT πυριτίου, αποτελεί τοπολογία για εφαρμογές τριφασικών AC–DC ή DC–AC λόγω της απλότητας του κυκλώματος, του ελέγχου και της συνολικής καλής απόδοσης και αξιοπιστίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η γραμμή που βασίζεται σε θυρίστορ ή σε μετατροπείς μεταγωγής φορτίου εξακολουθούν να επικρατούν, όπως σε κλασικά συστήματα μετάδοσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC).

Οι τοπολογίες οι οποίες είναι βασισμένες σε θυρίστορ αποτελούν παλαιότερες τεχνολογίες με επιπτώσεις που μειώνουν την απόδοση (π.χ. υψηλές αρμονικές και χαμηλός συντελεστής ισχύος) και γι' αυτό το λόγο προϋποθέτουν την ύπαρξη ογκωδών και βαρέων φίλτρων και αντισταθμιστών.

Στοχεύοντας στην αύξηση του βαθμού απόδοσης, της πυκνότητας ισχύος και της αξιοπιστίας, έχουν παρουσιαστεί πολλές προηγμένες τοπολογίες πέρα από τα βασικά VSC, και αρκετές από αυτές έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του δικτύου.

#### 4.2.3 Σύνθεση Μετατροπών Ηλεκτρονικών Ισχύος

Τα παθητικά εξαρτήματα, όπως τα πηνία και οι πυκνωτές, απαρτίζουν βασικά μέρη των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Επιπλέον, ιδιαίτερο μέρος των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούν οι ημιαγωγικοί διακόπτες. Ουσιαστικά, οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος διαθέτουν την δυνατότητα μετατροπής ή ελέγχου της ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύοντάς την προσωρινά σε πηνία ή πυκνωτές. Ταυτόχρονα, πετυχαίνουν την διαμόρφωση των αρχικών κυματομορφών τάσης ή ρεύματος μέσω ελέγχου του λόγου κατάτμησης. Μια επιπλέον σημαντική λειτουργία των παθητικών στοιχείων κρίνεται το φιλτράρισμα των αρμονικών ή του θορύβου που προκαλείται από την εναλλαγή.

Εκτός από τα κυκλώματα ανορθωτή και μετατροπέα, ένας μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος περιλαμβάνει επίσης:

- (1) εξαρτήματα παθητικής αποθήκευσης ενέργειας, για παράδειγμα, πυκνωτές ζεύξης DC και επαγωγείς γραμμής AC.
- (2) σύστημα θερμικής διαχείρισης
- (3) φίλτρα, π.χ. φίλτρα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI).
- (4) εξαρτήματα ελέγχου και βοηθητικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένης της κίνησης πύλης, της προστασίας, του ελεγκτή, των αισθητήρων και της βοηθητικής παροχής ρεύματος. Αυτά τα υποσυστήματα και εξαρτήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του μετατροπέα και θα επηρεάσουν τη συνολική απόδοση, το μέγεθος, το κόστος και την αξιοπιστία του μετατροπέα.

#### 4.2.4 Εισαγωγή στους μετατροπείς ισχύος dc dc

Οι μετατροπείς αυτοί έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια στον κλάδο της βιομηχανίας και ως εκ τούτου μπορούν να ληφθούν υπόψη ως απ' τις πιο εξελιγμένες τεχνολογία. Αυτή τη στιγμή, είναι διαδεδομένη σε τυποποιημένα και ανανεωμένα αντικείμενα που τροφοδοτούν μια εκτεταμένη ποικιλία εφαρμογών. Παραδείγματα τέτοιων πρακτικών εφαρμογών είναι τα φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα [59], οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (OWT) [60], τα ηλεκτρικά / υβριδικά ηλεκτρικά / plug-in - υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα/οχήματα κυψελών καυσίμου (EV/ HEV/ PHEV/ FCV) [61], [62], τα ηλεκτρικά συστήματα μέσης τάσης DC (MVDC) και υψηλής τάσης DC (HVDC) [63], [64], οι τηλεπικοινωνίες τροφοδοσία ρεύματος, το σύστημα τροφοδοσίας του πλοίου [65] οι υπεράκτιες εφαρμογές πετρελαίου και αερίου υποθαλάσσιων συμπιεστών [66], τροφοδοσίας ρεύματος με βάση κυψέλες καυσίμου FC [67] κ.λπ. Παρά το γεγονός ότι η χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι εδραιωμένη, παρουσιάζουν μερικά μειονεκτήματα τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή ερευνά για τη βελτίωση τους. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές σε όλο τον κόσμο έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους γύρω από προσπάθειες προς την εξειδικευμένη βελτίωση της

απόδοσης μετατροπής, της πυκνότητας ισχύος, της αξιοπιστίας, των τεχνικών ελέγχου, της απλότητας και του κόστους τους καθώς και της διάδοσης των εφαρμογών τους. Επιπλέον, οι μετατροπείς DC/DC που είναι συχνά κατάλληλοι για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης, δεν μπορούν να αναπτυχθούν περισσότερο για εφαρμογές υψηλής ισχύος (HP)/μεσαίας ισχύος (MP) εξαιτίας των μη ικανοποιητικών επιδόσεών τους [68], [69].

#### 4.2.5 Boost converter

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης (boost DC-DC converter). Μέσω του μετατροπέα αυτού, η τάση, η οποία είναι επίσης συνεχής μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες της τάσης τροφοδοσίας, έως και τέσσερις φορές, ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου και του βαθμού χρησιμοποίησης (ή λόγου κατάτμησης - duty cycle) του διακόπτη. Η ελάχιστη τιμή της τάσης εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου. Οι φάσεις (καταστάσεις) λειτουργίας του μετατροπέα είναι οι εξής:

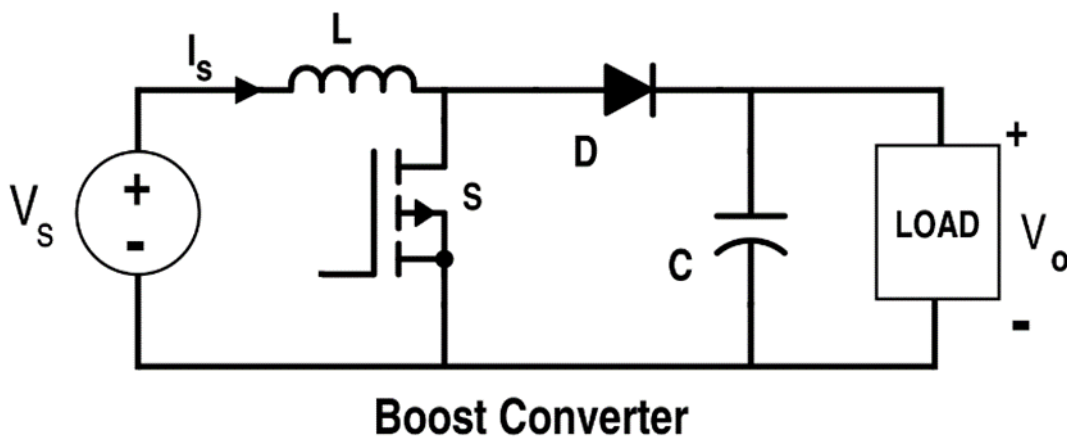
1η Φάση (Φόρτιση Πηνίου): Ο παλμός οδήγησης εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη S, με αποτέλεσμα η τάση εισόδου να εφαρμόζεται στα άκρα του πηνίου εισόδου, (ή όπως ονομάζεται πολλές φορές πηνίου ανύψωσης) και να το φορτίζει. Κατά τη φάση αυτή, ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής εξόδου, ο οποίος είχε φορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας, τροφοδοτεί την αντίσταση του φορτίου. Η φάση αυτή ολοκληρώνεται, όταν αφαιρεθεί ο παλμός οδήγησης από το διακόπτη S. Κατά τη φάση αυτή το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται και η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εισόδου. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε εδώ ότι λειτουργία με συνεχές ρεύμα πηνίου (ή Συνεχής Αγωγή Λειτουργίας - Continuous Conduction Mode - CCM) ορίζεται η μέθοδος λειτουργίας στην οποία το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός. Αυτό ισχύει για την ανάλυση οποιουδήποτε DC-DC μετατροπέα.

2η Φάση (Εκφόρτιση Πηνίου): Κατά τη δεύτερη φάση, ο διακόπτης S δεν άγει, αλλά άγει η διόδος ελεύθερης διέλευσης D, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί την ενέργεια της πηγής εισόδου και την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στον πυκνωτή εξόδου και κατά



συνέπεια στο φορτίο. Κατά τη φάση αυτή το ρεύμα, αφού είχε αναπτύξει από την προηγούμενη φάση τη μέγιστη τιμή του, αρχίζει να μειώνεται, ενώ η τάση στα άκρα του γίνεται  $V_{in}-V_o$ , όπου  $V_o$  είναι η τάση εξόδου (μέση τιμή) η οποία θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή. Η φάση αυτή τελειώνει, όταν το πηνίο έχει εκφορτιστεί και το ρεύμα του μηδενίζεται, με αποτέλεσμα και η διόδος D να σταματήσει να άγει.

3η Φάση (Ασυνεχής Λειτουργία): Αυτή η φάση λειτουργίας δημιουργείται μόνο όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχές ρεύμα πηνίου. Λειτουργία με ασυνεχές ρεύμα πηνίου (ή Ασυνεχής Αγωγή Λειτουργίας - Discontinuous Conduction Mode - DCM) ορίζεται η μέθοδος λειτουργίας στην οποία το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο παρουσιάζει διαστήματα όπου μηδενίζεται. Κατά τη φάση αυτή το ρεύμα λαμβάνει μηδενικές τιμές, οπότε δεν άγει κανένα ημιαγωγικό στοιχείο. Ο μετατροπέας ανύψωσης ανάλογα με την τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου, τον χρόνο αγωγής του διακόπτη  $t_{ON}$  και τη διακοπτική συχνότητα  $f_s$  (switching frequency) μπορεί να λειτουργεί υπό συνεχές ή ασυνεχές ρεύμα. Εάν το ρεύμα του πηνίου είναι ασυνεχές τότε ο μετατροπέας λειτουργεί και στις τρεις προαναφερθείσες φάσεις. Στην περίπτωση όμως που το ρεύμα του πηνίου είναι συνεχές, τότε ο μετατροπέας λειτουργεί μόνο στις δυο πρώτες φάσεις.



Σχήμα 4.1 Κύκλωμα ανοδικού μετατροπέα DC/DC

### 4.3 Κλασικές τοπολογίες PDDC

Για να επιτευχθεί η ακεραιότητα και η σαφέστερη κατανόηση των τεχνολογιών των μετατροπέων DC/DC που αναπτύχθηκαν πρόσφατα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να

παρέχετε μια σύντομη περίληψη της χρήσης τους πριν από τα τελευταία δέκα χρόνια. Υπάρχει μια σχετική δυσκολία να επισημανθεί η πρώτη τοπολογία μετατροπέα dc-dc που αναπτύχθηκε για εφαρμογές μέσης ή υψηλής ισχύος. Ωστόσο, φαίνεται ότι στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ένας μετατροπέας dc-dc τύπου buck ελεγχόμενος με θυρίστορ προτάθηκε για εφαρμογές τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος υψηλής ισχύος [63]. Σύμφωνα με το [63], ένα απλό κύκλωμα μεταγωγής με δύο ανορθωτές ελεγχόμενους (SCR), χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ισχύος στο φορτίο με περιοδική μεταγωγή. Αργότερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1970 [70], εξελίχθηκε μια σειρά τοπολογίας μετατροπέα συντονισμού συνεχούς ρεύματος για βιομηχανικό μέγεθος HP [71]. Στη συνέχεια στα τέλη της ίδιας δεκαετίας, έγινε πρόταση ενός μετατροπέα τριών επιπέδων υψηλής ισχύος dc-dc [63], ο οποίος σήμερα χαρακτηρίζεται ως τοπολογία μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων (MC). Ο συγκεκριμένος μετατροπέας τύπου buck-boost ελεγχόταν από θυρίστορ υψηλής συχνότητας χρονομερισμού με συνδέσμους ζεύξης αντιδραστήρα αποθήκευσης ενέργειας και μεταφοράς για τον μετατροπέα υψηλής συχνότητας (HF) και τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, στις αρχές του 1990 προτάθηκε μια τοπολογία διπλής γέφυρας μετατροπέα dc-dc (BC) πυκνότητας HP για εφαρμογές HP [63]. Αποτελείται από έναν τριφασικό μετατροπέα διπλής γέφυρας που λειτουργεί με την τεχνική HF και soft-switching (SS) και έναν τριφασικό συμμετρικό μετασχηματιστή AC. Ουσιαστικά, σήμερα, αυτές οι τρεις τοπολογίες (συντονιστική, πολυεπίπεδη και γέφυρα/πολυφασική γέφυρα (MPB)) θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως παραδοσιακές ή κλασικές τοπολογίες PDDC που κατασκευάστηκαν σε παλαιότερη εποχή για διάφορες εφαρμογές ισχύος. Οι συγκεκριμένοι συμβατικοί βασικοί μετατροπείς τύπου buck, boost και buck-boost (bB) χρησιμοποιούνται επίσης για εφαρμογές HP/MP με τη μορφή των παραπάνω τοπολογιών. Οι μετατροπείς αυτοί παρέχουν διαφορετικές παραμέτρους όπως ονομαστική ισχύς, συχνότητα λειτουργίας, συσκευές ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται και αρχές ελέγχου, μεταξύ άλλων τεχνικών προδιαγραφών.

1) Οι συνηθέστεροι λόγοι που χρησιμοποιούνται τα mosfet και scr ως ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία είναι οι χαμηλότερες διακόπτη και απώλειες. Οπτικές απώλειες οφείλονται στις πολύ υψηλές συχνότητες οι οποίες κυμαίνονται από 100 kHz έως 750 kHz.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την προτίμηση των mosfet είναι η απλή λειτουργία σε σχέση με άλλα ημιαγωγικά στοιχεία.

2) Η πιο διαδεδομένη και περισσότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου των mosfet είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM). Αντίθετα οι στρατηγικές μετατόπισης φάσης (PS-PWM) χρησιμοποιούνται σε άλλες εφαρμογές.

#### **4.4 Τεχνικές διαμόρφωσης και ελέγχου**

Στη βιβλιογραφία έχει μελετηθεί μεγάλος αριθμός τεχνικών ελέγχου για την παλμοδότηση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος DC/DC. Οι δύο συνηθέστερες τεχνικές ελέγχου για τον έλεγχο αγωγής των ημιαγωγικών διακοπών είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) και η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (PSM). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία σε μερικές περιπτώσεις η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης αντιμετωπίζεται επίσης ως διαμόρφωση πλάτους παλμού (PS-PSM). Ο έλεγχος διαμόρφωση πλάτους παλμού έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές μετατροπείς ισχύος DC/ DC. Επίσης, αυτός ο έλεγχος μπορεί να διακριθεί σε σταθερής συχνότητας (FF) και μεταβλητής συχνότητας (VF) [72]. Ωστόσο η τελική επιλογή της τεχνικής διαμόρφωσης παλμού επιλέγεται με βάση την εκάστοτε τοπολογία του μετατροπέα ισχύος DC/DC.

#### **4.5 Μετατροπέας DC/DC με MPPT**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος συνεισφοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σύμφωνα με προβλέψεις θα αποτελέσει την κορυφαία πηγή ενέργειας παγκοσμίως, μέχρι το 2040 [63].

Παρόλα αυτά, ένας σημαντικός περιορισμός για την περαιτέρω ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί η χαμηλή τους απόδοση. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη κατάλληλο ελέγχου μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η παραγωγή της μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού. Η τεχνική αυτή ονομάζεται ανίχνευση του

σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και αποσκοπεί στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V [73]. Λόγω των συχνών μεταβολών των καιρικών συνθηκών, τόσο της ηλιοφάνειας όσο για τη θερμοκρασία, είναι απαραίτητη η χρήση αυτού του ελέγχου προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη τάση εισόδου στον μετατροπέα που τροφοδοτεί το φορτίο. Ο έλεγχος MPPT εφαρμόζεται σε έναν μετατροπέα DC/DC ο οποίος στη συνέχεια τροφοδοτεί το φορτίο ή έναν ακόμα ενδιάμεσο μετατροπέα. Η ανάλυση και η περιγραφή των αλγορίθμων MPPT αναλύεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο [74].

#### 4.5.1 Διαφορετικοί παράγοντες επηρεάζουν το MPPT

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώνεται ότι υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους και της αξιοπιστίας για τους παράλληλους και τους σειριακούς μετατροπείς dc-dc. στην τοπολογία των παράλληλων μετατροπέων. Ο κάθε ένας από αυτούς ελέγχεται μέσω διαφορετικού MPPT. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται υψηλότερη αξιοπιστία. Αυτό συμβαίνει λόγω των φαινομένων όπως η μερική σκίαση η οποία σε άλλες περιπτώσεις δυσκολεύει την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. με την τροπολογία των παράλληλων μετατροπέων. Τα φωτοβολταϊκά που δεν σκιάζονται, θα συνεχίσουν να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ισχύος επιτυγχάνοντας έτσι τη μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας. Αντίστοιχα όταν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μιας συνολικής εγκατάστασης έχει κάποιο πρόβλημα, η υπόλοιπη εγκατάσταση συνεχίζει να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ωστόσο αυτή η τοπολογία απαιτεί την ύπαρξη συσκευών με γρήγορη απόκριση των οποίων η απόδοση δεν αντισταθμίζει το κόστος. Επιπλέον η επίδραση των αλγορίθμων MPPT σε φωτοβολταϊκά συστήματα επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους οι οποίες αφορούν την τοπολογία του μετατροπέα dc-dc, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία και την αντίσταση φορτίου.

#### 4.5.2 Σύγκριση επιδόσεων MPPT

Οι αλγόριθμοι MPPT αποδίδουν διαφορετικά για κάθε είδος dc-dc μετατροπέα. Από την εργασία [75] προκύπτει ότι μετατροπής FB και Push-Pull με υψηλότερη αναλογία ανύψωσης έχουν καλύτερη αποδοτικότητα από τον συμβατικό μετατροπέα buck feed

forward. Επιπλέον, το κύκλωμα και ο έλεγχος τους είναι απλούστερος από τα αντίστοιχα συμβατικά κυκλώματα. Επιπλέον, ένα Ακόμα χαρακτηριστικό αυτών των δύο μετατροπών είναι ότι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με απαιτήσεις μεγαλύτερης ισχύος. Επίσης, αυτοί οι μετατροπείς εμπεριέχουν και ένα υψίσυχνο μετασχηματιστή στην τοπολογία τους.

Επίσης, εκτός από τους παραπάνω μετατροπείς, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι, για εφαρμογές φ/β συστημάτων και MPPT, οι μετατροπείς Boost [76]. Όταν υπάρχει μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε αυξάνεται η αντίσταση φορτίου και έτσι μειώνεται η απόδοση του MPPT, για τον Boost. Παρόλα αυτά ο μετατροπέας Buck-boost παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση, αλλά και μεγαλύτερη χρησιμότητα από τους μετατροπείς buck και boost, καθώς έχει μεγαλύτερο εύρος τάσεων εισόδου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτό το μετατροπέα είναι ότι δεν έχει κάποιο περιορισμό, όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω οι τοπολογίες Buck-Boost θεωρούνται ως η καταλληλότερη επιλογή για τον έλεγχο MPPT [77]. Επίσης οι μετατροπείς flyback καθώς και μετατροπής χωρίς μετασχηματιστή, series και cuk μπορούν να προέρχονται από τις βασικές τοπολογίες των buck-boost. Οι μετατροπείς flyback παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση από τον συμβατικό μετατροπέα Buck-boost, σε όμοιες καταστάσεις φόρτισης, όσον αφορά τον χρόνο απόκρισης. Αντίθετα οι τοπολογίες μετατροπών χωρίς μετασχηματιστή, όπως είναι οι Series και Cuk, παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των βασικών μετατροπών Buck-boost. Μερικά από αυτά είναι η πολικότητα της τάσης εξόδου και ο κυματισμός της τάσης και του ρεύματος. Μία βασική διαφορά μεταξύ των τοπολογιών με μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή είναι η αλλαγή του Duty cycle. από τη βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι εξαιτίας των αλλαγών το Duty cycle σε σύγκριση με άλλους μετατροπείς, ο μετατροπέας flyback, έχει υψηλότερη ταχύτητα σύγκλισης στο σημείο MPP, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να έχει καλύτερη επίδοση στην εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

## 4.6 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση

Ο κατάλληλος σχεδιασμός και η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης των PDDC. Ένας μετατροπέας περιέχει τα εξής:

- Παθητικά εξαρτήματα (φίλτρα / μετασχηματιστές HF)
- Ενεργές συσκευές (διακόπτες ημιαγωγών και δίοδοι)
- Κυκλώματα ελέγχου και οδήγησης
- Διασυνδέσεις
- Στοιχεία συσκευασίας
- Θερμική διαχείριση μετατροπέα

## 4.7 Εφαρμογές πεδίου PDDC

Από τη βιβλιογραφία συμπεραίνεται πως οι μετατροπείς PDDCs αποτελούν ιδιαίτερα σημαντική και διαδεδομένη επιλογή στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανεμογεννήτριες καθώς επίσης και στη μεταφορά ισχύος με γραμμές μεταφοράς υψηλής συνεχούς τάσης (HVDC). Τα τελευταία χρόνια έχει διευρυνθεί ιδιαίτερα η χρήση αυτών των μετατροπέων χάρη στο χαμηλό τους βάρος την μεγάλη πυκνότητα ισχύος την υψηλή απόδοση καθώς και λόγω άλλων παραγόντων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

### 4.7.1 Φ/Β ισχύς

Τα φ/β συστήματα, ανάλογα με την τοπολογία τους μπορούν να διαχωριστούν σε 3 κατηγορίες. Συγκεκριμένα, η διάκριση έχει να κάνει με την σύνδεση του μετατροπέα DC/DC πριν τον αντιστροφέα DC/AC. Οι 3 κατηγορίες είναι:

- Σύνδεση κάθε στοιχείου φωτοβολταϊκού με έναν μετατροπέα DC/DC
- Σύνδεση κάθε σειράς συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών με έναν μετατροπέα DC/DC
- Σύνδεση παράλληλα με κάθε συστοιχία συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών

Οι τελευταίες δύο τοπολογίες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλότερης ισχύος ενώ η πρώτη για χαμηλότερης. Η διαφορά στην εκάστοτε τοπολογία είναι επιπλέον, η διαφορά στην εφαρμογή του MPPT, καθώς σε καθένα από αυτούς τους μετατροπέες DC/DC εφαρμόζεται κάποια τεχνική ελέγχου MPPT. Οι τοπολογίες με περισσότερους μετατροπέες ισχύος παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση, καθώς επιτυγχάνεται η εύρεση του γενικού σημείου μέγιστης ισχύος σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Ωστόσο η πολυπλοκότητα υλοποίησης λόγω των επιπλέον μετατροπέων αλλά και το επιπλέον κόστος αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς στην υλοποίησή τους.

Αντίθετα, το πλεονέκτημα της τελευταίας κατηγορίας, στην οποία συνδέεται ένας μετατροπέας κεντρικά στην εγκατάσταση, δηλαδή παράλληλα με όλες τις συστοιχίες φ/β είναι η μείωση του κόστους, η απλότητα της τοπολογίας και ο απλούστερος έλεγχος. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι η ύπαρξη καθολικού ελέγχου MPPT για όλη τη συστοιχία, το οποίο μειώνει ιδιαίτερα την απόδοση σε συνθήκες μερικής σκίασης.

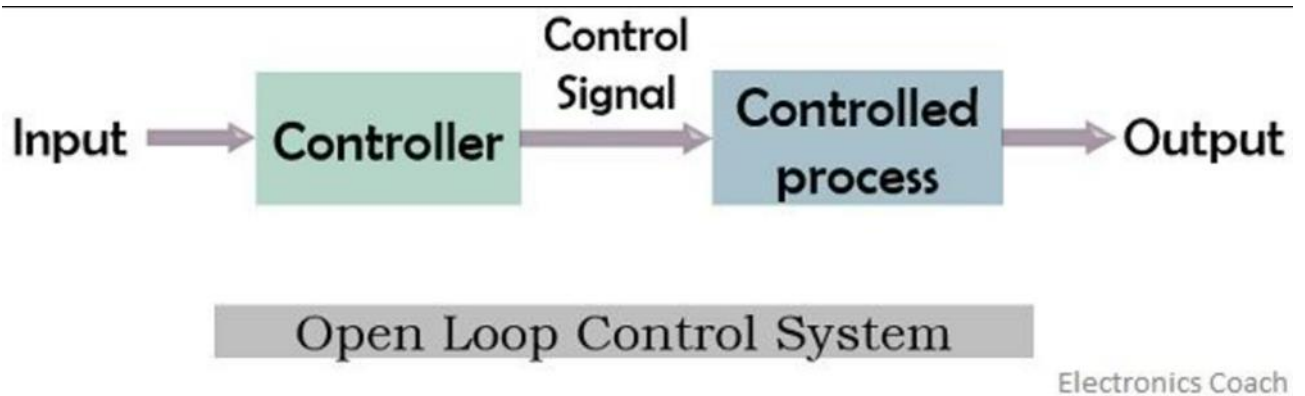
## **4.8 Έλεγχος PI**

### **4.8.1 Συστήματα αυτόματου ελέγχου**

Σύστημα αυτόματου ελέγχου αποτελεί ένα σύστημα του οποίου η έξοδος ελέγχεται σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια ή προδιαγραφές, από την είσοδο ελέγχου. Ένα σύστημα ελέγχου στοχεύει στην αλλαγή συμπεριφοράς ενός συστήματος ώστε να γίνει η επιθυμητή.

Τα συστήματα αυτόματου ελέγχου μπορεί να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι οι εξής:

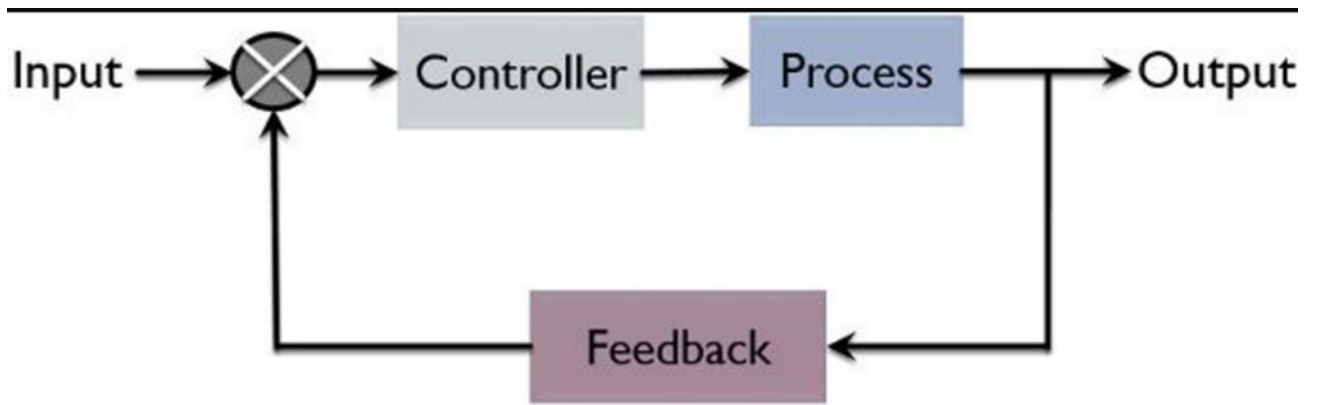
- Συστήματα ανοιχτού βρόχου (Σχήμα 4.2)
- Συστήματα κλειστού βρόχου (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.2 Έλεγχος PI ανοιχτού βρόχου

Στο Σχήμα 4.2 Έλεγχος PI ανοιχτού βρόχου γίνεται απεικόνιση του χονδρικού διαγράμματος ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Σε αυτά τα συστήματα εφαρμόζεται μία συγκεκριμένη είσοδος, χωρίς να ελέγχεται με κάποια ανάδραση η έξοδος του συστήματος. Το σήμα ελέγχου μπορεί να αφορά την τάση εξόδου ενός συστήματος, τις στροφές ενός κινητήρα κ.α. Το σύστημα αυτό αποτελείται από την είσοδο, από τον ελεγκτή, μέσω του οποίου γίνεται η ρύθμιση για το σήμα εξόδου. Αυτός συνήθως είναι ένας μικροελεγκτής. Έπειτα, ακολουθεί η επεξεργασία του σήματος και η έξοδος του, η οποία μπορεί να αφορά έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα.





Σχήμα 4.3 Σύστημα ελέγχου PI κλειστού βρόχου

Στο Σχήμα 4.3 Σύστημα ελέγχου PI κλειστού βρόχου απεικονίζεται ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Σε αυτή την περίπτωση ελέγχου, διακρίνεται ένα σήμα ανάδρασης, το οποίο παρέχει την ανατροφοδότηση για το σήμα εξόδου, ώστε εφαρμόζοντας κατάλληλη τεχνική ελέγχου να λάβει την επιθυμητή τιμή. Ένα ιδιαίτερα γνωστό παράδειγμα τέτοιου ελέγχου είναι ο έλεγχος PI, για τον οποίο έχει γίνει ανάπτυξη στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

#### 4.8.2 Ελεγκτής PID

Ένας από τους πιο διαδεδομένους ελέγχους κλειστού βρόχου είναι ο έλεγχος PID (Proportional Integral Derivative). Συγκεκριμένα, η παραλλαγή του PI αποτελεί την πιο γνωστή μορφή του ελεγκτή PID. Σε αυτή την περίπτωση ελέγχου το σήμα εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σήμα ανάδρασης του ελέγχου, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο υπολογισμός του σφάλματος, συγκρινόμενο με το σήμα αναφοράς. Για την ρύθμιση του ελεγκτή PI, ρυθμίζονται οι παράμετροι  $K_p$  και  $K_i$ , και αυτοί επιδρούν στην απόκριση του ελέγχου. Το σήμα εξόδου του ελεγκτή είναι:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

όπου:

$u(t)$ : το σήμα εξόδου του ελεγκτή

$e(t)$ : το σφάλμα μεταξύ του σήματος αναφοράς και του σήματος εξόδου

$K_p, K_i$ : οι παράμετροι που αναφέρονται παραπάνω.

$t$ : ο χρόνος

#### **4.9 Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως η αποτελεσματική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, με την χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών, απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, αλλά και αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος. Αυτό καθιστά τους μετατροπείς ισχύος ως ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.



## Κεφάλαιο 5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Σε παγκόσμια κλίμακα, παρατηρείται η ύπαρξη απομονωμένων περιοχών στις οποίες η πρόσβαση σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Τόσο μικρές όσο και μεσαίες γεννήτριες ντίζελ χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές τις απόμερες περιοχές. Οι συγκεκριμένες γεννήτριες ντίζελ βέβαια, παρά το χαμηλό αρχικό κόστος που έχουν χαρακτηρίζονται και από υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Σημαντικό να σημειωθεί ότι η γεννήτρια ντίζελ προκαλεί μόλυνση του περιβάλλοντος παράγοντας 3 κιλά αερίου CO<sub>2</sub> για κάθε λίτρο καυσίμου ντίζελ [78]. Για την αποφυγή της περιβαλλοντικής ρύπανσης, την υπερθέρμανση του πλανήτη και τη ζημιά στο στρώμα του όζοντος, υπάρχουν κάποιες κατάλληλες εναλλακτικές λύσεις όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μεταξύ όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (όπως αιολική, ηλιακή, γεωθερμική κ.λπ.) η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον εξαιτίας της καθαρής, χωρίς ρύπανση και ανεξάντλητη φύση της.

Η παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκού μπορεί να είναι αυτόνομου τύπου ή υβριδικού τύπου. Στο σύστημα παραγωγής ενέργειας φωτοβολταϊκού η παραγόμενη ισχύς και η απαίτηση ισχύος φορτίου δεν είναι ίσες. Ως εκ τούτου, προκύπτει μια απαίτηση για ένα σύστημα αποθήκευσης για τον περιορισμό της επίδρασης της μεταβολής της ηλιακής ενέργειας λόγω της διακύμανσης των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία. Στη περίπτωση χρήσης αυτόνομου τύπου παραγωγής ενέργειας φωτοβολταϊκού, η εφεδρική χωρητικότητα της μπαταρίας χρειάζεται να είναι υψηλή ώστε να παρέχει ισχύ χωρίς διακοπή και κατά τη χειμερινή περίοδο. Το ελάχιστο μέγεθος της μονάδας αποθήκευσης για το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι παροχή ενέργειας για μία νύχτα. Το μέγιστο μέγεθος εξαρτάται από τις ημέρες αυτονομίας που απαιτείται [78].

## 5.2 Σύστημα αποθήκευσης φωτοβολταϊκού

Οι μπαταρίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπόκεινται σε συχνή διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών πιο συχνά χρησιμοποιείται η μπαταρία μολύβδου με βαθιά εκφόρτιση. Ενώ οι μπαταρίες μολύβδου οξέος τύπου gel χρησιμοποιούνται για απομακρυσμένες εφαρμογές όπου απαιτείται λειτουργία χωρίς συντήρηση.

Επιπλέον, για φορητές εφαρμογές χρησιμοποιούνται μπαταρίες νικελίου-καδμίου ή υδριδίου μετάλλου. Η διάρκεια ζωής των μπαταριών κυμαίνεται από 3 έως 5 χρόνια και εξαρτάται από τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, τη θερμοκρασία και άλλες παραμέτρους.

Οι μπαταρίες για εφαρμογές φωτοβολταϊκών πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να πληρούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [78]:

1. Χαμηλό κόστος
2. Υψηλή ενεργειακή απόδοση
3. Μεγάλη διάρκεια ζωής
4. Χαμηλή συντήρηση, σιβαρή κατασκευή
5. Καλή αξιοπιστία και λιγότερη αυτοεκφόρτιση
6. Ευρεία θερμοκρασία λειτουργίας

### 5.2.1 Χαμηλό κόστος

Το κόστος μπορεί να αντιπροσωπεύεται από το αρχικό κόστος ή το ετήσιο κόστος. Το κόστος που καθορίστηκε κατά τη φάση σχεδιασμού για την αγορά των μπαταριών αποθήκευσης ορίζεται ως το αρχικό κόστος. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας δεν χρειάζεται να περιλαμβάνεται στο αρχικό κόστος. Παρόλα αυτά οι συγκεκριμένες δαπάνες

είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται στον ετήσιο υπολογισμό του κόστους. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας επηρεάζει ιδιαίτερα το κόστος του συστήματος. Στην περίπτωση που η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι μικρότερη από 3,5 χρόνια, τότε η μπαταρία είναι το εξάρτημα με το υψηλότερο κόστος στο σύστημα.

### 5.2.2 Αποτελεσματικότητα

Οι μονάδες μπαταριών δεν είναι ιδανικές. Είναι πολύ πιθανόν να υπάρξουν απώλειες ενέργειας κατά τη φόρτιση, την εκφόρτιση και την αυτοεκφόρτιση κατά τη διάρκεια αχρησιμοποίητου χρόνου. Η ενεργειακή απόδοση υπολογίζεται ως ο λόγος της φορτισμένης ενέργειας προς την εκφορτιζόμενη ενέργεια.

Ενεργειακή απόδοση = φορτισμένη ενέργεια (KW)/Αποφορτιζόμενη ενέργεια (KW).

Η αυτοεκφόρτιση επηρεάζεται από τις εσωτερικές απώλειες διαρροής της μπαταρίας και τις εξωτερικές απώλειες λόγω της κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για να μειωθεί η αυτοεκφόρτιση, οι μπαταρίες πρέπει να φυλάσσονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

### 5.2.3 Συντήρηση

Η λειτουργία της μπαταρίας με χαμηλή συντήρηση ή χωρίς συντήρηση προορίζεται για μικρά συστήματα σε αγροτικές περιοχές.

## **5.3 Λειτουργίες αποθήκευσης μπαταρίας σε φωτοβολταϊκό σύστημα**

### **5.3.1 Αποθήκευση και αυτονομία ενέργειας**

Να αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια και να παρέχει ενέργεια σε ηλεκτρικά φορτία όπως και όταν χρειάζεται (κατά τη διάρκεια της νύχτας και τις μη ηλιοφάνειες ημέρες το χειμώνα).

### **5.3.2 Σταθεροποίηση τάσης**

Για την παροχή ρεύματος σε ηλεκτρικά φορτία σε σταθερές τάσεις καταστέλλοντας τις διακυμάνσεις τάσης στα φωτοβολταϊκά συστήματα και προστατεύοντας τα φορτία από ζημιές.

### **5.3.3 Ρεύμα παροχής υπέρτασης**

Για την παροχή υψηλών ρευμάτων εκκίνησης σε ηλεκτρικά φορτία όπως κινητήρα ή άλλα επαγωγικά φορτία. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος με αποθήκευση μπαταρίας εξαρτάται από τον σχεδιασμό της μπαταρίας και τις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Εάν η μπαταρία δεν έχει σχεδιαστεί για τις συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, τότε είναι πολύ πιθανόν ότι δεν θα υπάρξει πρόωρη λειτουργία.

## **5.4 Αρχή λειτουργίας της μπαταρίας**

Η μπαταρία ορίζεται ως μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική ενέργεια με αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής [78].

## 5.5 Παράμετροι μπαταρίας

### 5.5.1 Χωρητικότητα μπαταρίας

Η χωρητικότητα αποθήκευσης της μπαταρίας αντιπροσωπεύεται σε Ampere hour ή Ah. Εάν  $V$  είναι η τάση της μπαταρίας, τότε η χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας της μπαταρίας μπορεί να είναι  $Ah \times V = \text{Watt-hour}$ . Συνήθως η χωρητικότητα της μπαταρίας καθορίζεται για μια δεδομένη βαθμολογία αποφόρτισης/φόρτισης ή βαθμολογία C. Η πραγματική χωρητικότητα εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας όπως φορτίο, θερμοκρασία κ.λπ.

### 5.5.2 Τάση μπαταρίας

Η τάση ακροδεκτών κατά την κατάσταση λειτουργίας είναι δημοφιλής ως ονομαστική τάση ή τάση εργασίας. Η συγκεκριμένη τάση θα καθορίζεται από τους κατασκευαστές. Μπορεί να είναι 3V, 6V, 12V, 24Vetc.

### 5.5.3 Βάθος εκκένωσης (DOD)

Δίνει ένα μέτρο της ενέργειας που αφαιρείται από μια μπαταρία ως ποσοστό της πλήρους χωρητικότητάς της. Η διαφορά μεταξύ της πλήρους φόρτισης και του βάθους εκφόρτισης της μπαταρίας σε ποσοστό ορίζεται ως η κατάσταση φόρτισης μιας μπαταρίας. Εάν το DOD είναι 25%, τότε η κατάσταση φόρτισης είναι  $(100 - 25) = 75\%$ .

### 5.5.4 Κύκλος ζωής της μπαταρίας

Είναι ο αριθμός των κύκλων πλήρους φόρτισης – εκφόρτισης που μπορεί να λειτουργήσει μια μπαταρία προτού η ονομαστική χωρητικότητα μειωθεί λιγότερο από το 80% της ονομαστικής αρχικής χωρητικότητάς της. Αφού ξεπεραστεί ο καθορισμένος κύκλος ζωής, η μπαταρία θα λειτουργεί με μικρότερη χωρητικότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά η χωρητικότητα θα είναι μειωμένη.



### 5.5.5 Ποσοστό εκφόρτισης/φόρτισης ή C – rate

Η βαθμολογία C είναι η τιμή που λαμβάνεται δίνοντας τον λόγο της χωρητικότητας της μπαταρίας προς τον αριθμό των ωρών για πλήρη φόρτιση ή αποφόρτιση που αντιπροσωπεύεται ως C/X, όπου X είναι ο χρόνος σε ώρες για πλήρη φόρτιση ή αποφόρτιση. Εάν  $X = 10$  h τότε η βαθμολογία C είναι C/10 ή 0,1 C.

Για τον υπολογισμό του ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης για μια βαθμολογία C διαιρείται η χωρητικότητα Ah με τις συνολικές ώρες φόρτισης και εκφόρτισης. Για μια μπαταρία χωρητικότητας 50 Ah, εάν η βαθμολογία C είναι 0,1 C, τότε το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης θα είναι  $50/10 = 5A$ .

### 5.5.6 Αυτοεκφόρτιση

Είναι η ηλεκτρική χωρητικότητα που χάνεται όταν μια μπαταρία δεν χρησιμοποιείται εξαιτίας της εσωτερικής ηλεκτροχημικής διαδικασίας με την μπαταρία. Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι μπαταρίες είναι εφικτό να αποθηκευτούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για να μειωθεί η αυτοεκφόρτιση.

## 5.6 Τύποι μπαταριών

### 5.6.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid)

Μια μπαταρία μολύβδου-οξέος αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη θεικού οξέος. Τα αρνητικά είναι τοποθετημένα σε ένα πλέγμα από σπογγώδες μεταλλικό μόλυβδο, ενώ τα θετικά τοποθετούνται σε ένα πορώδες πλέγμα σωματιδίων διοξειδίου του μολύβδου. Υπάρχουν δύο τύποι συμβατικών μπαταριών μολύβδου οξέος: flooded (FLA) και ρυθμιζόμενες με βαλβίδες (VRLA) [79]. Οι flooded μπαταρίες είναι λιγότερο ακριβές από τις ρυθμιζόμενες με βαλβίδες VRLA, αλλά απαιτούν τακτική συντήρηση και θα πρέπει να αποθηκεύονται σε καλά αεριζόμενο χώρο για να διαχέονται με ασφάλεια τα αέρια που παράγονται. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται συνήθως για την υποστήριξη της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, ειδικά σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εκτός δικτύου, καθώς είναι αδιάβροχες, εύκολες στη μεταφορά και σχετικά φθηνές σε σύγκριση με άλλους τύπους. Ωστόσο, οι παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν διάφορα τεχνικά προβλήματα, κυρίως μικρή διάρκεια ζωής, χαμηλό βάθος εκφόρτισης (<20%), περιορισμένο χρόνο ζωής (3 με 4 έτη), αργή φόρτιση και απαιτήσεις συντήρησης. Για να μετριαστούν αυτά τα μειονεκτήματα, εισάγονται πιο πρόσφατες μπαταρίες μολύβδου. Αυτές οι νέες μπαταρίες βασίζονται στη χρήση άνθρακα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο για την κατασκευή ενός αρνητικού ηλεκτροδίου υπερπυκνωτών. Σε αυτόν τον τύπο μπαταρίας, το θετικό ηλεκτρόδιο υφίσταται την ίδια χημική διαδικασία, αλλά το αρνητικό ηλεκτρόδιο όχι. Αυτή η διαδικασία προκαλεί λιγότερη διάβρωση ηλεκτροδίων, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη απόδοση από την παραδοσιακή τεχνολογία μολύβδου οξέος.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι οι κοινές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος μπορούν να είναι τύπου 6V ή 12V σε σκληρό πλαστικό δοχείο. Οι μπαταρίες μπορούν να είναι τύπου flooded cell ή sealed/gel type.

#### 5.6.1.1 Μπαταρία τύπου “πλημμυρισμένης” κυψέλης (Flooded cell type battery)

Στη σημερινή εποχή ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας χρησιμοποιείται πολύ συχνά για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο τύπος σωληνοειδούς πλάκας αποτελεί έκδοση των πλημμυρισμένων μπαταριών. Στις πλημμυρισμένες μπαταρίες τα ηλεκτρόδια είναι πλήρως βυθισμένα στον ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια φόρτισης των πλημμυρισμένων μπαταριών, τα αέρια υδρογόνου και οξυγόνου που προκύπτουν από το νερό, από τη χημική αντίδραση σε αρνητικές και θετικές πλάκες απελευθερώνονται διαμέσω των αεραγωγών της μπαταρίας. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την περιοδική προσθήκη νερού στην μπαταρία.

#### 5.6.1.2 Σφραγισμένη/τύπου γέλης μπαταρία (Sealed /Gel type battery)

Οι μπαταρίες του συγκεκριμένου τύπου έχουν ακινητοποιημένη μορφή ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, οι σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος χωρίς συντήρηση χαρακτηρίζονται επίσης ως μπαταρίες μολύβδου οξέος με ρύθμιση βαλβίδας (VRLA) ή μπαταρίες μολύβδου οξέος με δέσμευση ηλεκτρολύτη. Οι σφραγισμένες μπαταρίες διακρίνονται σε δύο τύπους, ο πρώτος είναι τύπου πηκτωματοποιημένου ηλεκτρολύτη και τύπου απορροφούμενου γυάλινου χαλιού.

Οι ακινητοποιημένες μπαταρίες ηλεκτρολυτών είναι πιθανόν να οδηγούν σε λιγότερα προβλήματα απελευθέρωσης ηλεκτρολυτών σε σύγκριση με τις πλημμυρισμένες μπαταρίες ηλεκτρολυτών. Κατά τη διαδικασία φόρτισης, αέρια υδρογόνου και οξυγόνου παράγονται από το νερό λόγω χημικών αντιδράσεων στις αρνητικές και θετικές πλάκες. Αυτά τα αέρια ανασυνδυάζονται για να σχηματίσουν νερό, γι' αυτό το λόγο ως φυσικό επακόλουθο η ανάγκη για προσθήκη νερού εξαλείφεται.

Αυτός ο τύπος μπαταριών μολύβδου οξέος είναι κατάλληλος για εφαρμογές φωτοβολταϊκών για τους ακόλουθους λόγους:

1. Εύκολη μεταφορά.
2. Κατάλληλο για απομακρυσμένες εφαρμογές λόγω λιγότερων απαιτήσεων συντήρησης.
3. Δεν χρειάζονται προσθήκες νερού.

#### 5.6.1.3 Μπαταρίες με τζελ (Gelled batteries)

Η προσθήκη διοξειδίου του πυριτίου στον ηλεκτρολύτη σχηματίζει ένα ζεστό υγρό το οποίο προστίθεται στην μπαταρία και γίνεται γέλη μετά την ψύξη. Η μεταφορά του υδρογόνου και του οξυγόνου που παράγονται κατά τη διαδικασία φόρτισης γίνεται μεταξύ θετικών και αρνητικών πλακών μέσω των ρωγμών και των κενών στον πηκτωματοποιημένο ηλεκτρολύτη κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης.

#### 5.6.1.4 Απορροφημένες μπαταρίες GAS MAT [AGM] (Absorbed GAS MAT [AGM] batteries)

Στις μπαταρίες AGM η τοποθέτηση των γυάλινων μπαταριών γίνεται μεταξύ των πλακών. Αυτές οι γυάλινες πλάκες έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν τον ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, τα μόρια οξυγόνου από τη θετική πλάκα κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη στα γυάλινα στρώματα και ανασυνδυάζουν το υδρογόνο στην αρνητική πλάκα για να σχηματίσουν νερό.

Οι μπαταρίες gel όπως ακριβώς και οι μπαταρίες AGM απαιτούν ελεγχόμενη φόρτιση. Σε αυτές τις μπαταρίες χρησιμοποιούνται γενικά ηλεκτρόδια ασβεστίου μολύβδου για την ελαχιστοποίηση των αερίων και της απώλειας νερού. Τόσο η τάση όσο και το ρεύμα πρέπει να ελέγχονται κάτω από το ρυθμό C/20.

Χαρακτηριστικά των μπαταριών μολύβδου οξέος:

Ειδική ενέργεια : 25 – 35 Wh/kg

Διάρκεια ζωής: 250 -750 κύκλοι

Πλεονεκτήματα: χαμηλό κόστος, αυξημένη απόδοση, απλή λειτουργία

Μειονεκτήματα: σχετικά χαμηλή διάρκεια ζωής

#### 5.6.2 Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Ni - Cd)

Οι μπαταρίες NiCd είναι ευρέως διαδεδομένες λόγω του χαμηλού κόστους τους και λόγω του ότι είναι στιβαρές. Ο θετικός πόλος νικελίου είναι μια ένωση υδροξειδίου του νικελίου/οξυδροξειδίου του νικελίου ( $\text{Ni(OH)}_2/\text{NiOOH}$ ), ενώ το αρνητικό ηλεκτρόδιο καδμίου περιέχει μεταλλικό κάδμιο (Cd) και υδροξείδιο του καδμίου ( $\text{Cd(OH)}_2$ ). Ο ηλεκτρολύτης αποτελεί ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Αυτή η

τεχνολογία χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος. Επιπλέον, παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος ανά κύκλο, έναντι άλλων μπαταριών. Μερικά από τα μειονεκτήματα των μπαταριών NiCd είναι το φαινόμενο μνήμης, οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του καδμίου και το υψηλό κόστος. Ως συνέπεια των παραπάνω, οι μπαταρίες αυτές δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές για ΑΠΕ.

Στη μπαταρία Ni-Cd το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από κάδμιο και το αρνητικό ηλεκτρόδιο από υδροξείδιο του νικελίου που διαχωρίζεται από διαχωριστές νάιλον βυθισμένους σε ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου που τοποθετείται σε ένα περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα. Διαθέτει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε βάθος και ανεκτική θερμοκρασία σε αντίθεση με την μπαταρία μολύβδου-οξέος. Η αντικατάσταση του καδμίου μπορεί να γίνει από υδρίδια μετάλλων λόγω περιβαλλοντικών κανονιστικών κανόνων. Το εφέ μνήμης προκαλεί υποβάθμιση της χωρητικότητας της μπαταρίας όταν η μπαταρία βρίσκεται σε αδράνεια για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο μνήμης είναι η διαδικασία ανάμνησης του βάθους εκφόρτισης στο παρελθόν. Εάν η μπαταρία αποφορτιστεί στο 25% επανειλημμένα, θα το θυμάται και εάν η εκφόρτιση είναι μεγαλύτερη από 25%, η τάση του στοιχείου θα μειωθεί. Για να ανακτήσει την πλήρη χωρητικότητα της μπαταρίας, θα πρέπει να επισκευαστεί πλήρως αποφόρτιση και στη συνέχεια πλήρη φόρτιση μία φορά σε λίγους μήνες.

### 5.6.3 Μπαταρίες νικελίου υδρογόνου

Οι μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου έχουν πλεονεκτήματα όπως μεγάλη διάρκεια ζωής και αντοχή στην υπερφόρτιση. Γενικά, είναι κατάλληλο για διαστημικές εφαρμογές όπως διαστημόπλοια και σε δορυφόρους επικοινωνίας. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτού του είδους μπαταρίας σε εγκαταστάσεις ΑΠΕ περιορίζεται από πολλά μειονεκτήματα όπως το υψηλό αρχικό κόστος, η υψηλή πίεση κυψέλης και η χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας.

#### 5.6.4 Μπαταρίες Νικελεζάργυρου

Το θετικό ηλεκτρόδιο είναι οξειδίο του νικελίου και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι ο ψευδάργυρος. Εκτός από τις καλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυτός ο τύπος μπαταρίας έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (25% υψηλότερη από το NiCad). Οι μπαταρίες NieZn έχουν χαμηλότερο κόστος από τις μπαταρίες NieCd και κοστολογούνται μεταξύ των τεχνολογιών NieCd και Lead acid. Η μπαταρία NieZn έχει υψηλότερο λόγο ενέργειας προς μάζα και υψηλότερο λόγο ισχύος προς μάζα από την μπαταρία μολύβδου. Χάρη στα παραπάνω, η τεχνολογία NieZn έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντί για μπαταρίες NieCd και μολύβδου.

#### 5.6.5 Μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS)

Σε μια μπαταρία θείου νατρίου, το νάτριο και το θείο είναι σε υγρή μορφή και είναι τα ηλεκτρόδια, το νάτριο είναι η κάθοδος και το θείο είναι η άνοδος. Τα χωρίζει η αλουμίνια που παίζει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Αυτό επιτρέπει μόνο τα θετικά ιόντα νατρίου να κινηθούν μέσα από αυτό και να συνδυαστούν με το θείο για να σχηματίσουν πολυσουλφίδιο του νατρίου. Αυτός ο τύπος μπαταρίας έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης (89e92%) και μεγάλη διάρκεια ζωής και κατασκευάζεται από φθηνά υλικά. Το νάτριο-θείο απαιτεί υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (350 C), γεγονός που καθιστά δύσκολη τη χρήση των μπαταριών θείου για οικιακές εφαρμογές [80]. Σε υψηλότερο επίπεδο ισχύος, το νάτριο-θείο ήταν η κορυφαία τεχνολογία της αγοράς, αλλά στην πραγματικότητα πρέπει να ανταγωνιστεί την μπαταρία ιόντων λιθίου.

#### 5.6.6 Μπαταρίες χλωριούχου νατρίου νικελίου

Η μπαταρία χλωριούχου νικελίου νατρίου είναι επίσης γνωστή ως μπαταρία ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activity) και είναι ένα σύστημα που λειτουργεί από περίπου 270 °C έως 350 °C. Μια χημική αντίδραση στο εσωτερικό της μπαταρίας μετατρέπει το χλωριούχο νάτριο και το νικέλιο σε χλωριούχο νικέλιο και νάτριο κατά τη φάση φόρτισης. Η εκκένωση αλλάζει την απόκριση. Κάθε κελί τοποθετείται σε μια ισχυρή θήκη από χάλυβα. Για εμπορικές εκδόσεις, συνιστούμε μπαταρίες με ελάχιστη ισχύ 1 MW. Οι

μπαταρίες Zebra έχουν τυπική μεγάλη διάρκεια ζωής 4500 κύκλων με απόδοση 75%. Οι μπαταρίες νανονικελίου είναι κατάλληλες για αποθήκευση μεγάλου όγκου σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω του μεγάλου χρόνου εκφόρτισης, της μεγάλης διάρκειας ζωής και της γρήγορης απόκρισής τους [81]. Ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται σημαντικά από το γεγονός ότι απαιτείται θερμότητα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της λιωμένης κατάστασης. Επίσης, το λιωμένο νάτριο αντιδρά με το νερό και προκαλεί πυρκαγιές σε αναφερόμενα περιστατικά, κάτι που καθιστά αυτή τη λύση επικίνδυνη.

#### 5.6.7 Μπαταρίες νικελίου – υδριδίου μετάλλου (Ni MH)

Είναι μια επέκταση μπαταριών NiCd με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Η άνοδος αποτελείται από υδρίδιο μετάλλου αντί για NiCd. Έχει λιγότερο εφέ μνήμης και παρέχει υψηλή ισχύ αιχμής. Είναι ακριβότερο από τις μπαταρίες NiCd και η υπερφόρτιση μπορεί να επιφέρει την γρήγορη καταστροφή της μπαταρίας.

Χαρακτηριστικά των μπαταριών νικελίου-υδριδίου μετάλλου:

Ειδική ενέργεια : 65 – 75 Wh/kg

Διάρκεια ζωής: 700 κύκλοι

Πλεονεκτήματα: υψηλή ειδική ενέργεια, καλή βαθιά εκφόρτιση, φιλική προς το περιβάλλον

Μειονεκτήματα: Υψηλό κόστος, υψηλή αυτοεκφόρτιση και χαμηλή αποδοτικότητα

#### 5.6.8 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Η λειτουργία των μπαταριών ιόντων λιθίου βασίζεται στην κίνηση των ιόντων λιθίου από το θετικό ηλεκτρόδιο στο αρνητικό κατά τη φόρτιση και στην κίνηση των ιόντων λιθίου κατά την εκφόρτιση. Το θετικό ηλεκτρόδιο μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου αποτελείται από

ένα από τα πολλά οξείδια λιθίου που είναι ικανά να αποθηκεύουν ιόντα λιθίου και το αρνητικό ηλεκτρόδιο μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι ένα ηλεκτρόδιο άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από άλας λιθίου διαλυμένο σε ένα οργανικό ανθρακικό. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου απαιτούν έλεγχο θερμοκρασίας για ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η πιο δημοφιλής μορφή αποθήκευσης στον κόσμο και αντιπροσωπεύουν το 85,6% του ανεπτυγμένου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας το 2015. Η μεγάλη ζήτηση για λίθιο λόγω φορητών συσκευών, υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων και ηλεκτρικών οχημάτων, είναι πιθανόν να οδηγήσει σε δραματικά ακριβά συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας [82]. Παρόλο που αυτός ο τύπος μπαταρίας έχει το υψηλότερο κόστος, παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ επειδή παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος ανά κύκλο.

Η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι τριπλάσια από εκείνη των μπαταριών Pb-acid. Η τάση της κυψέλης θα είναι 3,5 V και λίγες κυψέλες σε σειρά θα δώσουν την απαιτούμενη τάση μπαταρίας. Το ηλεκτρόδιο λιθίου αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη και δημιουργεί ένα φιλμ παθητικοποίησης κατά τη διάρκεια κάθε λειτουργίας εκφόρτισης και φόρτισης. Αυτό αντισταθμίζεται με τη χρήση παχύρρευστων ηλεκτροδίων. Λόγω αυτού του γεγονότος το κόστος της μπαταρίας Li-ion είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις μπαταρίες NiCd. Η περαιτέρω υπερφόρτωση μπορεί να καταστρέψει πλήρως την μπαταρία.

#### 5.6.9 Μπαταρίες πολυμερούς λιθίου

Σε αυτήν την μπαταρία, ο στερεός ηλεκτρολύτης πολυμερούς λειτουργεί και ως ηλεκτρολύτης και ως διαχωριστής και η αντίδραση ηλεκτροδίου λιθίου με τον ηλεκτρολύτη είναι μικρότερη.

Χαρακτηριστικά των μπαταριών λιθίου:

Ειδική ενέργεια: 100-150 Wh/kg

Διάρκεια ζωής: 1000 κύκλοι



Πλεονεκτήματα: υψηλή ειδική ενέργεια, μεγάλη διάρκεια ζωής

Μειονεκτήματα: Υψηλό κόστος, χαμηλή ασφάλεια

## 5.7 Παράγοντες γήρανσης μπαταριών

### 5.7.1 Διαστρωμάτωση με οξύ

Στις μπαταρίες μολύβδου οξέος διακρίνεται μια μικρή διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ νερού και οξέος. Εάν η μπαταρία παραμείνει σε αδράνεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, το μείγμα νερού και οξέος θα διαχωριστεί σε στρώματα με το νερό να ανεβαίνει και το οξύ να βυθίζεται εξαιτίας βαρομετρικών επιδράσεων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των πλακών στην κάτω πλευρά.

Η στρωματοποίηση μπορεί να αφαιρεθεί με ανάδευση του ηλεκτρολύτη με αντλίες αέρα ή με φυσικό αέριο της μπαταρίας σε υψηλές τάσεις.

### 5.7.2 Θείωση

Σχηματίζεται θείωση κατά την κανονική λειτουργία της μπαταρίας. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα θειικού άλατος στις πλάκες της μπαταρίας. Το στρώμα διαλύεται στο οξύ της μπαταρίας κατά τη φόρτιση. Όταν σχηματίζεται ένα σκληρό κρυσταλλικό στρώμα δεν μπορεί να διαλυθεί κατά τη φόρτιση. Όταν οι κρύσταλλοι θειικού καλύπτουν την επιφάνεια των πλακών, θα υπάρξει μείωση της απόδοσης της μπαταρίας διατηρώντας λιγότερο φορτίο. Η θείωση συμβαίνει εάν η μπαταρία παραμένει σε αδράνεια για μεγάλη χρονική διάρκεια ή εάν η φόρτιση αρκεί ώστε να διαλυθεί το θειικό άλας που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης. Η ατελής φόρτιση για μεγάλο χρονικό διάστημα και η υψηλή θερμοκρασία θα οδηγήσει επιπλέον σε θείωση.

Η αποθείωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με εξισορρόπηση που είναι η διαδικασία υπερφόρτισης της μπαταρίας. Η αποθείωση μπορεί επίσης να γίνει εφικτή με ρύθμιση παλμών ελέγχοντας απλώς τους παλμούς ή τις συνιστώσες συχνότητας της συχνότητας που κυμαίνεται από 2-6 MHz.

### 5.7.3 Διάβρωση

Η εφαρμογή υψηλού θετικού δυναμικού στο θετικό ηλεκτρόδιο οδηγεί στη διάβρωση του πλέγματος μολύβδου. Είναι μια μη αναστρέψιμη διαδικασία και έχει ως αποτέλεσμα τη ελάττωση της διατομής του πλέγματος που καταλήγει σε αύξηση της αντίστασης του πλέγματος. Ο περαιτέρω σχηματισμός στρωμάτων οξειδίου του μολύβδου και θεικών αλάτων μεταξύ του πλέγματος και του ενεργού υλικού αυξάνει την αντίσταση επαφής που οδηγεί σε αυξημένη πτώση τάσης κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η διάβρωση είναι το δυναμικό του ηλεκτροδίου, η θερμοκρασία, το κράμα πλέγματος και η ποιότητα του πλέγματος. Επιπλέον, οι μπαταρίες με παχύτερο πλέγμα αποτελούν τις καταλληλότερες μπαταρίες για να ελαχιστοποιήσουν το φαινόμενο της διάβρωσης και να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής, για εφαρμογές φωτοβολταϊκών.

Τα ηλεκτρόδια υπόκεινται σε ισχυρά μηχανικά φορτία κατά τη λειτουργία του κύκλου λόγω της μετατροπής του ενεργού υλικού σε θειικό μόλυβδο κατά την εκφόρτιση. Ο θειικός μόλυβδος έχει 1,94 φορές μεγαλύτερο όγκο από το διοξείδιο του μολύβδου ανά mole. Λόγω της αλλαγής του όγκου, το ενεργό υλικό χαλαρώνει και διαχωρίζεται από το ηλεκτρόδιο και σχηματίζει λάσπη στη βάση της μπαταρίας. Στην περίπτωση που ο όγκος της λάσπης γίνει μεγάλος, τότε μπορεί να προκληθεί βραχυκύκλωμα μεταξύ των ηλεκτροδίων.

### 5.7.4 Βραχυκύκλωμα

Οι συνδετήρες πλάκας από τα θετικά ηλεκτρόδια μπορούν επίσης να υποστούν διάβρωση και να προκαλέσουν αποκόλληση μικρών στρωμάτων των συνδετήρων, τα οποία όταν πέσουν πάνω στα ηλεκτρόδια θα δημιουργήσουν βραχυκύκλωμα. Για την αποφυγή αυτών των δυσάρεστων περιπτώσεων, οι διαχωριστές πρέπει να εκτείνονται προς τα πάνω πάνω από τα ηλεκτρόδια. Στην περίπτωση μπαταριών μολύβδου οξέος δενδρίτες αυξάνονται από θετικό σε αρνητικό ηλεκτρόδιο μέσω των διαχωριστών. Αυτή η ανάπτυξη είναι εφικτό να επιταχυνθεί με χαμηλή κατάσταση φόρτισης για μεγάλες περιόδους που οδηγεί σε

χαμηλές συγκεντρώσεις οξέος. Αυτή η ανάπτυξη δενδρίτη προκαλεί ένα μικροσκοπικό βραχυκύκλωμα που θα οδηγήσει σε ξαφνική και πλήρη καταστροφή της μπαταρίας.

#### 5.7.5 Χαμηλή θερμοκρασία

Η χαμηλή θερμοκρασία δεν θα προκαλέσει καμία μη αναστρέψιμη επίδραση γήρανσης. Πρέπει να αποτραπεί ο σχηματισμός πάγου. Στη περίπτωση που σχηματιστεί πάγος, τότε κρίνεται αρκετά δύσκολο να λειτουργήσει η μπαταρία και το περιβάλλον της κυψέλης μπορεί να σκάσει εξαιτίας του αυξημένου όγκου και το περιβάλλον θα επηρεαστεί από τη διασπορά του θειικού οξέος.

#### 5.7.6 Υψηλή θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας από υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος ή με υψηλό ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης αυξάνει τη διάβρωση, τη θείωση, την εκτόξευση αερίων και την αυτοεκφόρτιση κ.λπ. Για κάθε 10°K αύξηση της θερμοκρασίας ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μειώνεται κατά 50%. Η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας για τις μπαταρίες εκτείνεται μεταξύ 10° - 20° C.

### 5.8 Προστασία και ρύθμιση μπαταριών

Κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιείται κατάλληλο κύκλωμα ρύθμισης τάσης για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση και η υπερβολική εκφόρτιση της μπαταρίας. Η πολύ γρήγορη ή πολύ μεγάλη φόρτιση της μπαταρίας θα οδηγήσει σε μόνιμη βλάβη στην μπαταρία. Το αέριο συμβαίνει ενώ επιτρέπει υψηλότερο ρεύμα φόρτισης σε μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Θα πρέπει επίσης να γίνει αποφυγή υπερβολικής εκφόρτισης για να αποφευχθεί η αποσύνθεση των πλακών. Ως εκ τούτου, η χρήση κυκλωμάτων ρύθμισης τάσης για τη διατήρηση της τάσης της μπαταρίας εντός του καθορισμένου εύρους καθίσταται απαραίτητη.

#### 5.8.1 Ρυθμιστής διακλάδωσης

Ο συγκεκριμένος ρυθμιστής θα συνδεθεί παράλληλα με τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια για να διαχέει την περίσσεια ενέργειας. Η φόρτιση της μπαταρίας δεν θα επηρεαστεί από την αστοχία του ρυθμιστή. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μη ρύθμισης δεν υπάρχει πτώση τάσης στη μονάδα φόρτισης και ως εκ τούτου η κατανάλωση ρεύματος είναι αμελητέα.

#### 5.8.2 Ρυθμιστής σειράς

Ο ρυθμιστής θα συνδεθεί σε σειρά με τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μη ρύθμισης επίσης θα παρατηρηθεί μια πτώση τάσης στον ρυθμιστή η οποία θα προκαλέσει κατανάλωση ρεύματος στο κύκλωμα.

#### 5.8.3 Ρυθμιστής ηλεκτρομαγνητικής σειράς

Η φόρτιση της μπαταρίας σταματά με ηλεκτρομηχανική συσκευή όταν η τάση φτάσει στο μέγιστο αποδεκτό επίπεδο και επαναφέρεται αυτόματα όταν επιστρέψει το επίπεδο κατωφλίου.

#### 5.8.4 Αυτόματος διακόπτης κυκλώματος

Λόγω της ασθενούς ηλιοφάνειας και της υπερφόρτωσης, θα καταστεί απαραίτητο να διακοπεί το φορτίο για να περιοριστεί το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας. Αυτός ο ρυθμιστής διακόπτει το φορτίο σε συγκεκριμένο επίπεδο τάσης κατωφλίου και επαναφέρει αυτόματα ενώ ταυτόχρονα η μπαταρία φορτίζεται στο απαιτούμενο επίπεδο.

#### 5.8.5 Εγκατάσταση μπαταρίας

Η πιο διαδεδομένη μπαταρία για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι οι μπαταρίες flooded. Η πλημμυρισμένη μπαταρία πρέπει να εγκατασταθεί σε ξεχωριστό δωμάτιο με επαρκή αερισμό και μέτρια θερμοκρασία για την αποφυγή ατυχημάτων λόγω του σχηματισμού επικίνδυνων αερίων. Για τις μπαταρίες αυτές, μπορεί να γίνει τοποθέτηση πάνω από ξύλινες ή πλαστικές σανίδες στο πάτωμα. Οι σφραγισμένες μπαταρίες χωρίς

συντήρηση μπορούν να εγκατασταθούν στον χώρο εργασίας με κανονικό αερισμό σε σχάρες σιδήρου με σχισμές. Το ευρωπαϊκό πρότυπο IEC μπορεί να αναφέρεται.

## **5.9 Σύγκριση τεχνικών παραμέτρων μπαταριών μολύβδου οξέος και ιόντων λιθίου**

### **5.9.1 Χρόνος φόρτισης**

Ο χρόνος φόρτισης διαφέρει ανάλογα με το είδος της μπαταρίας. Για μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) ο χρόνος φόρτισης είναι περίπου 2-3 ώρες. Για μπαταρίες μολύβδου οξέος ο ανάλογος χρόνος είναι περίπου 12-16 ώρες.

Απαιτούνται περίπου 2-3 ώρες για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας Li-ion ενώ για την μπαταρία μολύβδου οξέος αυτός ο χρόνος είναι σχεδόν 12-16 ώρες.

Η διαδικασία φόρτισης των μπαταριών μολύβδου οξέος περιλαμβάνει 3 στάδια φόρτισης. Αυτά είναι:

- Φόρτιση σταθερού ρεύματος
- Φόρτιση συμπλήρωσης
- Φόρτιση επίπλευσης

Μετά την πλήρη φόρτιση των μπαταριών αυτών, πρέπει να συνεχίζεται η φόρτιση για τη διατήρηση της πλήρους φόρτισης.

Ενώ οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος έχουν την δυνατότητα να φορτίζονται πλήρως, αυτό δεν ισχύει για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion), το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την χρήση τους σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτό ισχύει, καθώς όταν η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται, λόγω φαινομένων σκίασης ή κατά τη διάρκεια της

ημέρας, μειώνεται και η παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας. Η μειωμένη ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών καθιστά την φόρτιση των μπαταριών μολύβδου οξέος αδύνατη. Η επανάληψη αυτού του φαινομένου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης της μπαταρίας, λόγω θείωσης των ηλεκτροδίων. Αντίθετα η χαμηλότερη στάθμη φόρτισης (state of charge- soc) δεν αποτελεί πρόβλημα για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion).

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται πως στην περίπτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων η χρήση μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι καταλληλότερη επιλογή.

### 5.9.2 Κύκλος Ζωής

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των μπαταριών αποτελεί ο κύκλος ζωής τους. Για μπαταρίες μολύβδου, τύπου Absorbent Glass Mat (AGM), η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται από 500 έως 1000 κύκλους φόρτισης. Αντίθετα, η διάρκεια ζωής για μπαταρίες  $\text{LiFeSO}_4\text{H}$  κυμαίνεται μεταξύ 2000 και 5000 κύκλων φόρτισης. Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι το βάθος εκφόρτισης (Depth of discharge - DOD), ο ρυθμός εκφόρτισης και η θερμοκρασία. Ωστόσο κάθε τύπος μπαταρίας επηρεάζεται διαφορετικά από τον εκάστοτε παράγοντα. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από το DOD για ίδιο μέγεθος μπαταρίας. Μία μπαταρία μολύβδου οξέος με 30% DOD μπορεί να αποδώσει την ίδια διάρκεια ζωής με μία μπαταρία Li-ion με 75% DOD. Από αυτό προκύπτει πως η μπαταρία μολύβδου οξέος πρέπει να έχει 2-3 φορές μεγαλύτερο μέγεθος από αυτό της Li-ion για να έχουν όμοια διάρκεια ζωής.

### 5.9.3 Ασφάλεια

Τόσο η μπαταρία μολύβδου-οξέος όσο και η μπαταρία ιόντων λιθίου έχουν προβλήματα ασφάλειας. Όσον αφορά τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μετά τη πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, σχηματίζεται αέριο  $\text{O}_2$  στο θετικό ηλεκτρόδιο και αέριο  $\text{H}_2$  σχηματίζεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Το μείγμα αυτό είναι γνωστό ως εκρηκτικό αέριο που παρουσιάζει εκρηκτικότητα από 4 έως 72%. Εξαιτίας αυτού, η τάση φόρτισης θα πρέπει να είναι

περιορισμένη και ο χώρος της τράπεζας μπαταριών πρέπει να αερίζεται κατάλληλα για να διατηρείται η συγκέντρωση  $H_2$  σε χαμηλά επίπεδα και να αποφευχθεί πιθανή έκρηξη.

Στο SHS, χρησιμοποιούνται συνήθως πλημμυρισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος.

Αυτές οι μπαταρίες περιέχουν υδατικούς ηλεκτρολύτες και λειτουργούν σε πλήρη τάση, στο τέλος της φόρτισης. Ως εκ τούτου, σχηματίζει αναπόφευκτα μια μικρή ποσότητα αερίου και σταδιακά χάνει την υγρασία. Η συνεχής υπερφόρτιση επιταχύνει την απώλεια νερού, επιταχύνει τη διάβρωση των ηλεκτροδίων και μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Αντίθετα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ασφαλείς μέσα στο εύρος της τάσης λειτουργίας, ωστόσο μπορούν να γίνουν ασταθείς εάν φορτιστούν σε τάση που είναι μεγαλύτερη από την καθορισμένη. Τα ιόντα λιθίου δεν είναι δυνατόν να απορροφήσουν την υπερφόρτιση και το ρεύμα φόρτισης πρέπει να διακοπεί όταν η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Η συνεχόμενη φόρτιση πάνω από 4,3 V/κελί σχηματίζει μία στρώση μεταλλικού λιθίου στην άνοδο, ενώ το υλικό της καθόδου γίνεται οξειδωτικός παράγοντας. Αυτό κάνει την μπαταρία μη σταθερό παράγοντας αερίου διοξειδίου το άνθρακα ( $CO_2$ ). Το  $CO_2$  αυξάνει την πίεση της κυψέλης και αν φορτιστεί πλήρως συνεχίζει η τρέχουσα συσκευή διακοπής είναι υπεύθυνη για την αποσύνδεση του ρεύματος σε συγκεκριμένη πίεση. Στα συστήματα μπαταριών μολύβδου οξέος, ο ελεγκτής φόρτισης πραγματοποιεί τον έλεγχο φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών. Σε συστήματα μπαταριών Li-ion, το (Battery Management System-BMS) χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση των προδιαγραφών ασφαλείας του συστήματος μπαταρίας.

#### 5.9.4 Συντήρηση

Για την συντήρηση της μπαταρίας μολύβδου οξέος πρέπει να συμπληρώνεται περιοδικά η μπαταρία με απεσταγμένο νερό. Στις μπαταρίες που είναι ιόντων λιθίου εξασφαλίζεται ότι είναι όμοια φορτισμένη σε κάθε στοιχείο και ότι υπάρχει ισορροπία τάσης στις

μπαταρίες της εγκατάστασης. Η παραπάνω λειτουργία εξασφαλίζεται από το σύστημα διαχείρισης των μπαταριών (BMS) το οποίο είναι εγκατεστημένο στο σύστημα αποθήκευσης.

#### 5.9.5 Ανακύκλωση

Για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, η ανακύκλωση κοστίζει περισσότερο, σε σχέση με αυτές που είναι μολύβδου οξέος. Επιπρόσθετα, η απόδοση της ανακύκλωσης των μπαταριών ιόντων λιθίου αντιστοιχεί στο 50% ενώ για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος το ποσοστό ξεπερνάει το 95%.

#### 5.9.6 Κεφάλαιο Κόστος

Μέχρι σήμερα, το κόστος επένδυσης για μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, αντίστοιχης χωρητικότητας. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, οι οποίες είναι βαθέως κύκλου επικρατούν στην αγορά και η χρήση τους απαντάται σε πλήθος εφαρμογών. Αντίθετα, οι μπαταρίες LiFeSO<sub>4</sub> βαθέως κύκλου χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Για εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν καλύτερη επιλογή καθώς διαθέτουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος από τις μολύβδου οξέος. Σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, στα οποία ο χώρος είναι σημαντικό ζήτημα, οι μπαταρίες LiFeSO<sub>4</sub> μπορούν να μειώσουν τον απαιτούμενο χώρο έως και 50%, σε σχέση με τις μολύβδου οξέος. Το κόστος είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται ανά τους διάφορους κατασκευαστές και διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία καθώς και τις διαφορές στην ποιότητα της μπαταρίας.

### 5.10 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιδράσεων

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος περιέχουν διάλυμα μολύβδου και θειικού οξέος. Ο μολύβδος αποτελεί ένα ιδιαίτερα τοξικό παράγοντα και το θειικό οξύ είναι διαβρωτικός ηλεκτρολύτης. Για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος δεν συνιστάται ποτέ η απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής στερεών απορριμμάτων. Ρύποι όπως ο μολύβδος και το



θεικό οξύ μπορούν να διεισδύσουν στη βλάστηση, να μολύνουν το έδαφος και να επηρεάσουν τα υπόγεια ύδατα. Ο μόλυβδος και το θεικό οξύ μπορούν επίσης να αποτελέσουν απειλή για την υδρόβια ζωή εάν αυτές οι μπαταρίες βρίσκονται κοντά σε ποτάμια, ρυάκια, λίμνες ή παράκτια ύδατα. Από την άλλη πλευρά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου περιέχουν μεγάλες ποσότητες αλουμινίου, κοβαλτίου, χαλκού και λιθίου. Ο χαλκός και το αλουμίνιο χρησιμοποιούνται ως αγωγοί ρεύματος στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, ενώ το  $\text{LiCoO}_2$  χρησιμοποιείται ως υλικό καθόδου. Αυτά τα υλικά δεν είναι τόσο τοξικά όσο ο μόλυβδος στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Αν και στη μελέτη οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι όλες οι μπαταρίες ιόντων λιθίου πρέπει να ταξινομούνται ως επικίνδυνα απόβλητα, κυρίως λόγω της περίσσειας περιεκτικότητας σε κοβάλτιο και χαλκό, και μερικές φορές νικέλιο. Αυτοί οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την απόρριψη της μπαταρίας καθιστούν την ανάγκη απόρριψης ακόμη πιο σημαντική.

### **5.11 Δικατευθυντήριος μετατροπέας Buck-Boost**

Ένας μετατροπέας DC-DC χρησιμοποιείται συνήθως για τη μεταφορά τάσης συνεχούς ρεύματος ενός εύρους τάσεων σε ένα άλλο, στο οποίο η τάση εισόδου λαμβάνεται από πηγή τάσης. Οι μετατροπείς αυτοί αποτελούν δυναμικά συστήματα στα οποία τα επίπεδα ισχύος διαφέρουν, ανάλογα με την εφαρμογή, από ιδιαίτερα χαμηλά μέχρι και υψηλότερα. Εξαιτίας των μεταβολών στις τάσεις ποικίλων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως π.χ. στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, ο μετατροπέας καθίσταται αναγκαίος για την παροχή της ακριβούς τάσης για κάθε συσκευή [83].

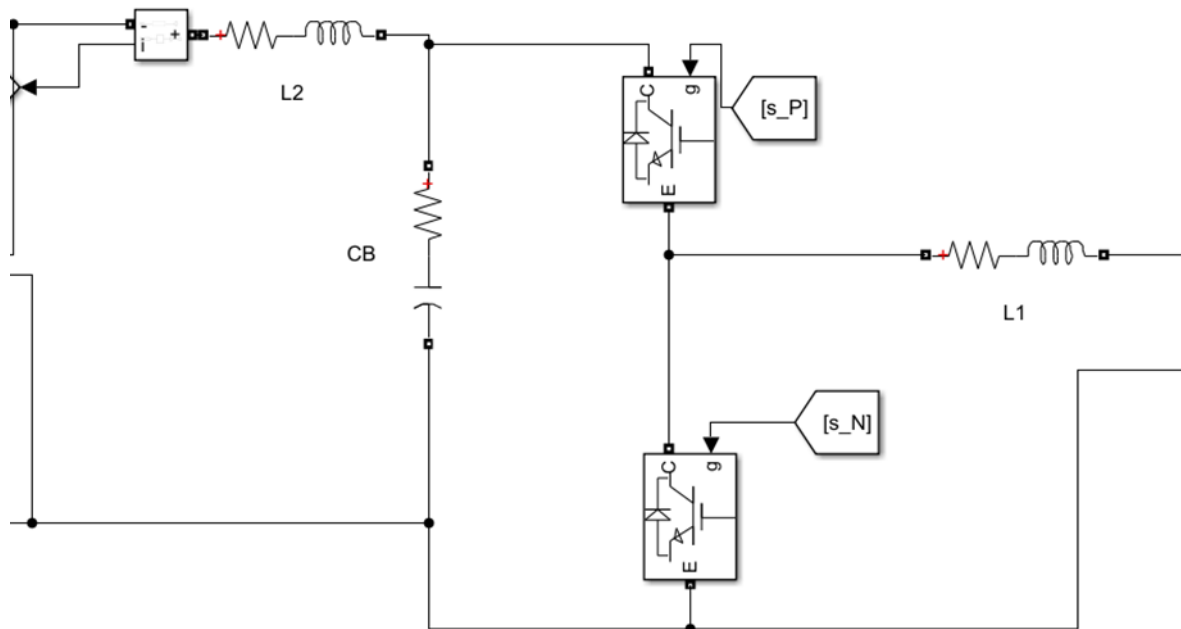
Ο μετατροπέας DC-DC buck εφαρμόζεται για τον υποβιβασμό μίας τάσης σε ένα χαμηλότερο επίπεδο από αυτό της εισόδου. Αντίθετα, ο μετατροπέας buck/boost δύναται να υποβιβάζει ή να ανυψώνει την τάση της εισόδου και έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί και τις δύο λειτουργίες, ανάλογα με την πλευρά τροφοδοσίας του. Ο μετατροπέας buck/boost λειτουργεί είτε ως buck είτε ως boost [84]. Η χρήση ενός μετατροπέα buck/boost παρουσιάζει μικρότερη απόδοση από την χρήση ενός μετατροπέα buck [85]. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς buck εφαρμόζονται συνηθέστερα για να

εξασφαλιστεί η λήψη μίας απαιτούμενης τάσης εξόδου από μία πηγή υψηλότερης πηγής τάσης. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να χρειάζεται αρνητική τάση από μια θετική πηγή τάσης εισόδου. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να απαιτείται σε συσκευές, όπως οι ενισχυτές ήχου, τα προγράμματα οδήγησης γραμμής και οι δέκτες ή οι ενισχυτές. Ανεξάρτητα από την τάση εξόδου, σε σύγκριση με την τάση εισόδου, η πολικότητα της τάσης εξόδου θα παραμένει πάντα ίδια με την τάση εισόδου.

Ο μετατροπέας DC-DC buck/boost δημιουργείται χρησιμοποιώντας μια τάση εισόδου DC, ένα διακόπτη MOSFET, 2 πηνία, διόδους και έναν πυκνωτή εξόδου.

Το ρεύμα του πηνίου εισόδου είναι συνεχές και για τις δύο λειτουργίες του μετατροπέα (ανύψωση και υποβιβασμός τάσης. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό προτέρημα του buck/boost, έναντι των buck και boost.

#### 5.11.1 Λειτουργία



Σχήμα 5.1 Δικατευθυντήριος μετατροπέας

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η τοπολογία του μετατροπέα ισχύος που περιλαμβάνει την τροφοδοσία DC από την έξοδο του φωτοβολταϊκού, διακόπτες συνδεδεμένους σε σειρά, δύο πηνία και πυκνωτές. Προκειμένου να επιτευχθεί περισσότερο σταθερή τάση εξόδου, απαιτούνται πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας. Ωστόσο σε πραγματική κατασκευή ενός μετατροπέα, αυτό θα τον καταστήσει περισσότερο ογκώδες αλλά και κοστοβόρο.

Ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει σε δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Ο μετατροπέας λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα μεταγωγής. Επίσης το πηνίο πρέπει να σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε λειτουργία συνεχούς αγωγιμότητας

.

Κατά τη μία λειτουργία, ο ένας διακόπτης άγει, ενώ ο δεύτερος όχι. Το τμήμα του ρεύματος του πηνίου  $IL$  ρέει μέσω της διόδου  $D$ . Ταυτόχρονα, ο μετατροπέας buck δέχεται την τάση εισόδου. Το ολικό ρεύμα του πηνίου  $IL1$  αποτελείται από το ρεύμα της διόδου και του ρεύματος του πηνίου του buck. Το ρεύμα στην είσοδο του κυκλώματος αυξάνεται και η τάση του διακόπτη επίσης αυξάνεται λόγω της προσθήκης φορτίου. Έτσι δύο διακόπτες συνδέονται σε σειρά προκειμένου να μην υπάρξει μεγαλύτερη επιβάρυνση.

Στη τρίτη λειτουργία, ο πρώτος διακόπτης δεν άγει, ενώ ο δεύτερος άγει. Το ρεύμα του πηνίου  $IL2$  διέρχεται από τον διακόπτη  $S2$ . Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας, τα πηνία  $L1$  και  $L2$  αποφορτίζονται.

## Κεφάλαιο 6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα Κεφάλαια, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η διασύνδεση ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και από μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Η διασύνδεση του συστήματος αυτού γίνεται σε ένα μικροδίκτυο DC. Για την υλοποίηση αυτής της διασύνδεσης χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ένας δικατευθυντήριο μετατροπέας buck-boost. Στον μετατροπέα ανύψωσης εφαρμόζεται έλεγχος MPPT, προκειμένου να επιτευχθεί ο προσδιορισμός του σημείου μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού, ενώ στον μετατροπέα buck-boost χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής PI διπλού βρόχου με έλεγχο ρεύματος, για τον έλεγχο του ρεύματος της μπαταρίας. Η μπαταρία που χρησιμοποιείται είναι ιόντων λιθίου.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συγκεκριμένου συστήματος είναι το Simulink, το οποίο είναι το γραφικό περιβάλλον του MATLAB.

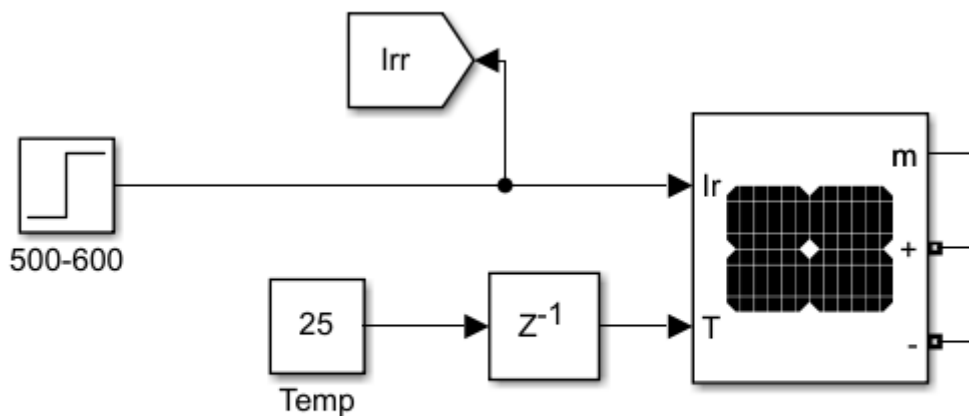
### 6.2 Ανάλυση μοντέλου Simulink

Για την καλύτερη ανάλυση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, παρακάτω χωρίζεται στις υποενότητες:

- Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής συστοιχίας
- Μοντελοποίηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter)
- Έλεγχος MPPT
- Μοντελοποίηση δικατευθυντήριου μετατροπέα buck-boost
- Ελεγκτής PI
- Σύστημα μπαταρίας
- DC μικροδίκτυο-σύστημα αντιστάσεων

### 6.2.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

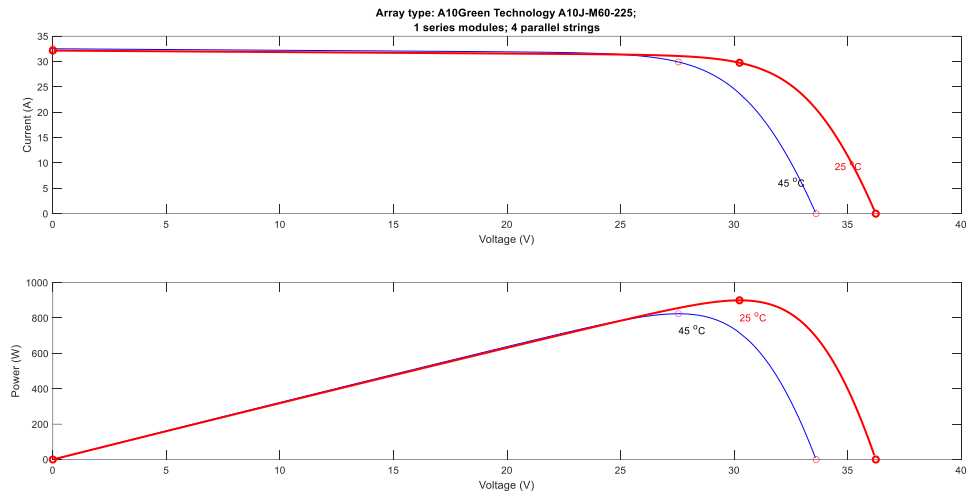
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται σε ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο αποτελείται από μια Φωτοβολταϊκή συστοιχία και ένα σύστημα μπαταρίας. Στο Σχήμα 6.1 απεικονίζεται το block που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού, καθώς και τα σήματα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται.



Σχήμα 6.1 Block διάγραμμα φωτοβολταϊκού

Συγκεκριμένα, το block του φωτοβολταϊκού προσομοιώνει το εμπορικό μοντέλο A10 Green Technology A10J-M60-225. Τα χαρακτηριστικά για κάθε module αυτού του φωτοβολταϊκού είναι:

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης: 8.04 A
- Ρεύμα στο MPP: 7.44 A
- Τάση ανοιχτοκύκλωσης: 36.24 V
- Τάση στο MPP: 30.24 V
- Μέγιστη ισχύς: 224.9856 W

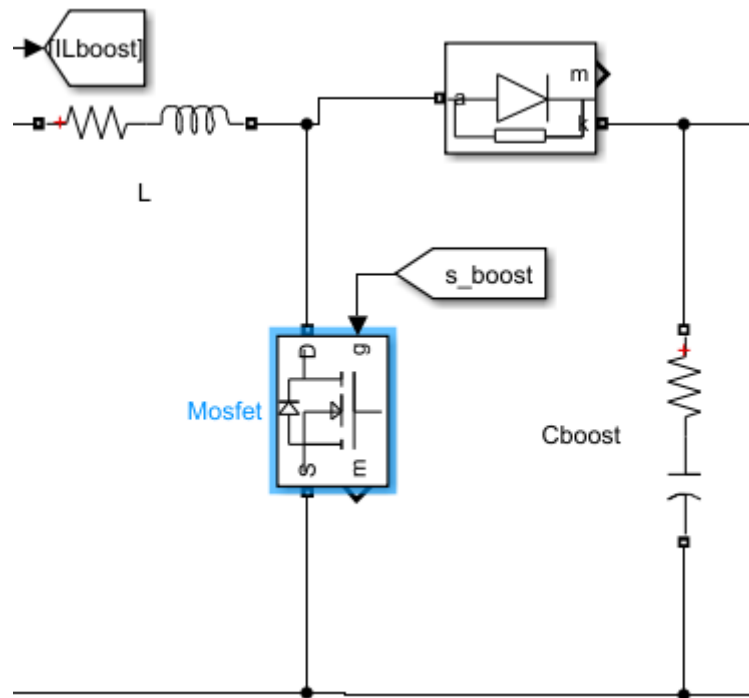


Σχήμα 6.2 Χαρακτηριστικές I-V και P-V αντίστοιχα

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V καμπύλες, για θερμοκρασίες 25°C και 45°C του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού. Η συστοιχία που προσομοιώνεται αποτελείται από 4 παράλληλα string και το κάθε string αποτελείται από 1 module σε κάθε σειρά.

### 6.2.2 Μοντελοποίηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter)

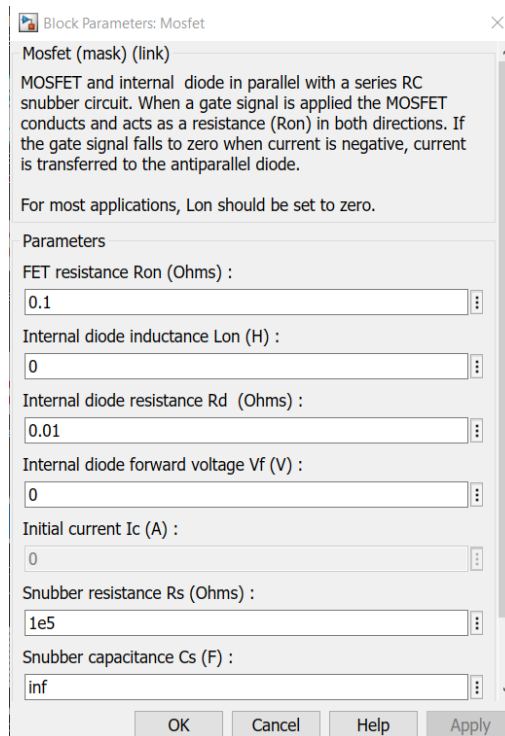
Ο μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση που χρησιμοποιείται, είναι ο μετατροπέας boost, ο οποίος αναλύεται στο Κεφάλαιο 4. Η τοπολογία του μετατροπέα που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost)

Ο μετατροπέας τροφοδοτείται από την έξοδο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και η έξοδος του συνδέεται σε έναν ζυγό συνεχούς τάσης. Αποτελείται, από ένα πηνίο, από έναν ημιαγωγικό διακόπτη τύπου mosfet, μία δίοδο και έναν πυκνωτή στην έξοδο, προκειμένου να επιτυγχάνεται η εξομάλυνση της τάσης. Επίσης, στην είσοδο του μετατροπέα έχει τοποθετηθεί ένας ακόμα πυκνωτής για την εξομάλυνση της τάσης εισόδου. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι:

- Πηνίο με αντίσταση: 10 mH και 0.1 Ω
- Πυκνωτής εισόδου με εσωτερική αντίσταση: 10μF και 10mΩ
- Πυκνωτής εξόδου με εσωτερική αντίσταση: 2,000μF και 1μΩ
- Mosfet: (Σχήμα 6.4)



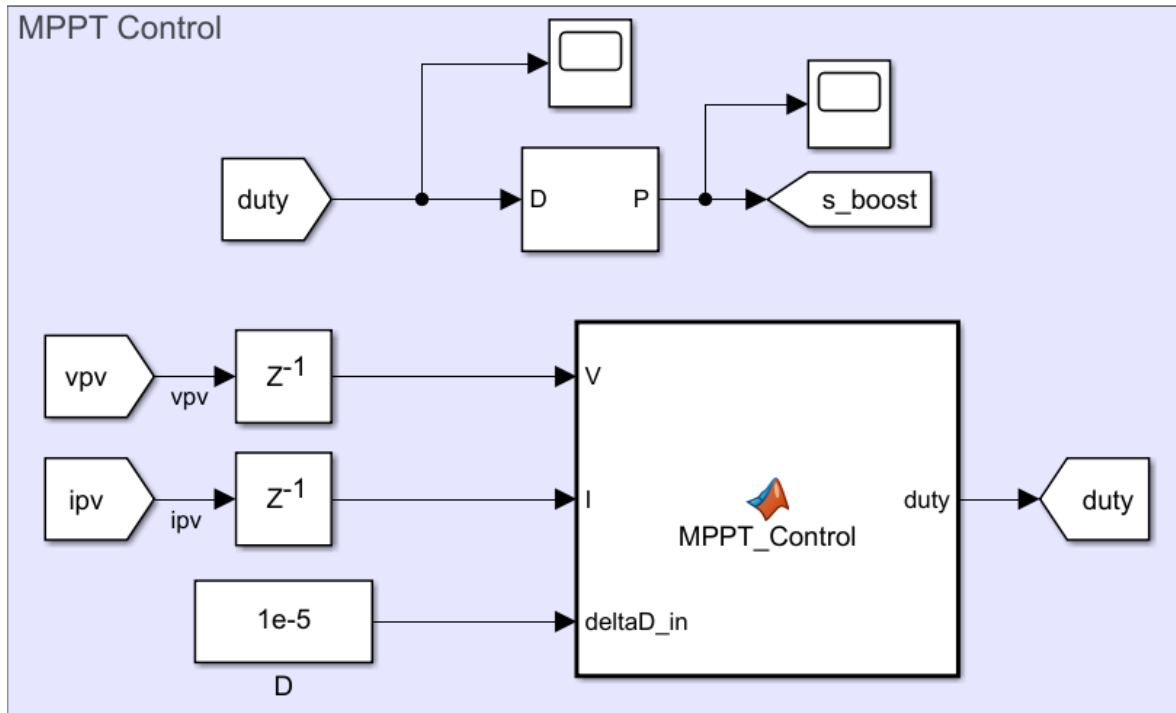
Σχήμα 6.4 Χαρακτηριστικά mosfet

Ο έλεγχος του μετατροπέα γίνεται με το σήμα που έρχεται από την έξοδο του αλγορίθμου MPPT, η λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. Ο μετατροπέας πρέπει να έχει στην έξοδό του την μέγιστη ισχύ από τα PV.

### 6.2.3 Έλεγχος MPPT

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε εκτενής αναφορά στους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους MPPT. Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος ο οποίος θα υλοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο αλγόριθμος P&O. Η υλοποίηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται με τη χρήση ενός block MATLAB function, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.





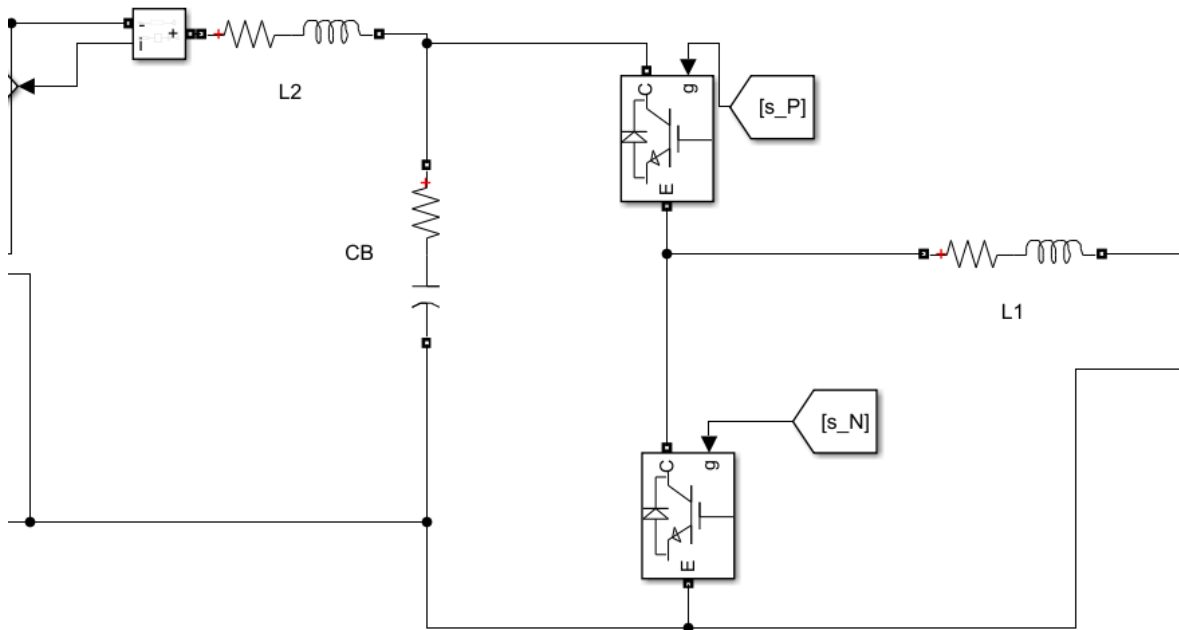
Σχήμα 6.5 Block ελέγχου MPPT

Για το παρόν σύστημα, δεν μελετάται το φαινόμενο της μερικής σκίασης ή άλλων φαινομένων που θα καθιστούσαν απαραίτητη την ανάπτυξη ενός πιο σύνθετου ελέγχου MPPT. Οι μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης προέρχονται αποκλειστικά από τις μεταβολές των φορτίων. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου P&O, πραγματοποιείται μια διαταραχή της τάσης εξόδου, λόγω της μεταβολής του λόγου κατάτμησης D. Αυτή η διαταραχή έχει ως αποτέλεσμα, την μεταβολή του ρεύματος και κατά συνέπεια την μεταβολή της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού. Κατόπιν, με τον υπολογισμό της ισχύος εκ νέου, γίνεται η σύγκριση με την ισχύ πριν την μεταβολή. Αν η νέα ισχύς είναι μεγαλύτερη, τότε ο λόγος κατάτμησης μεταβάλλεται προς την ίδια κατεύθυνση. Αν η νέα ισχύς είναι μικρότερη, τότε ο λόγος κατάτμησης μεταβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Στον κώδικα που αναπτύχθηκε, έχει επιλεγθεί ως βήμα μεταβολής  $1^{-5}$ .

#### 6.2.4 Μοντελοποίηση δικατευθυντήριου μετατροπέα buck-boost

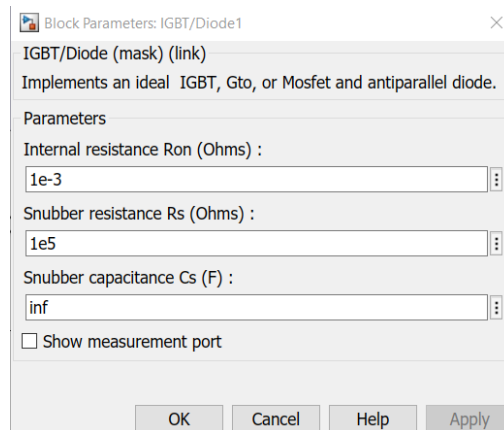
Για την διασύνδεση της μπαταρίας στον DC ζυγό, έχει χρησιμοποιηθεί ένας δικατευθυντήριος μετατροπέας buck-boost. Ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας, ανάλογα με την παραγωγή του φωτοβολταϊκού και τη ζήτηση του φορτίου. Ο μετατροπέας που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 Δικατευθυντήριος μετατροπέας buck-boost

Αποτελείται από δύο ημιαγωγικούς διακόπτες IGBT, οι οποίοι έχουν μια αντιπαράλληλη δίοδο ο καθένας. Επίσης, το κύκλωμα του μετατροπέα περιλαμβάνει ένα πηνίο στην είσοδο, ένα στην έξοδο και έναν πυκνωτή. Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα είναι:

- Πηνίο με αντίσταση (είσοδος): 2mH και 0.05 Ω
- Πυκνωτής με αντίσταση: 47μF και 0.01Ω
- Πηνίο με αντίσταση (έξοδος): 1mH και 0.05Ω
- IGBT: Σχήμα 6.7

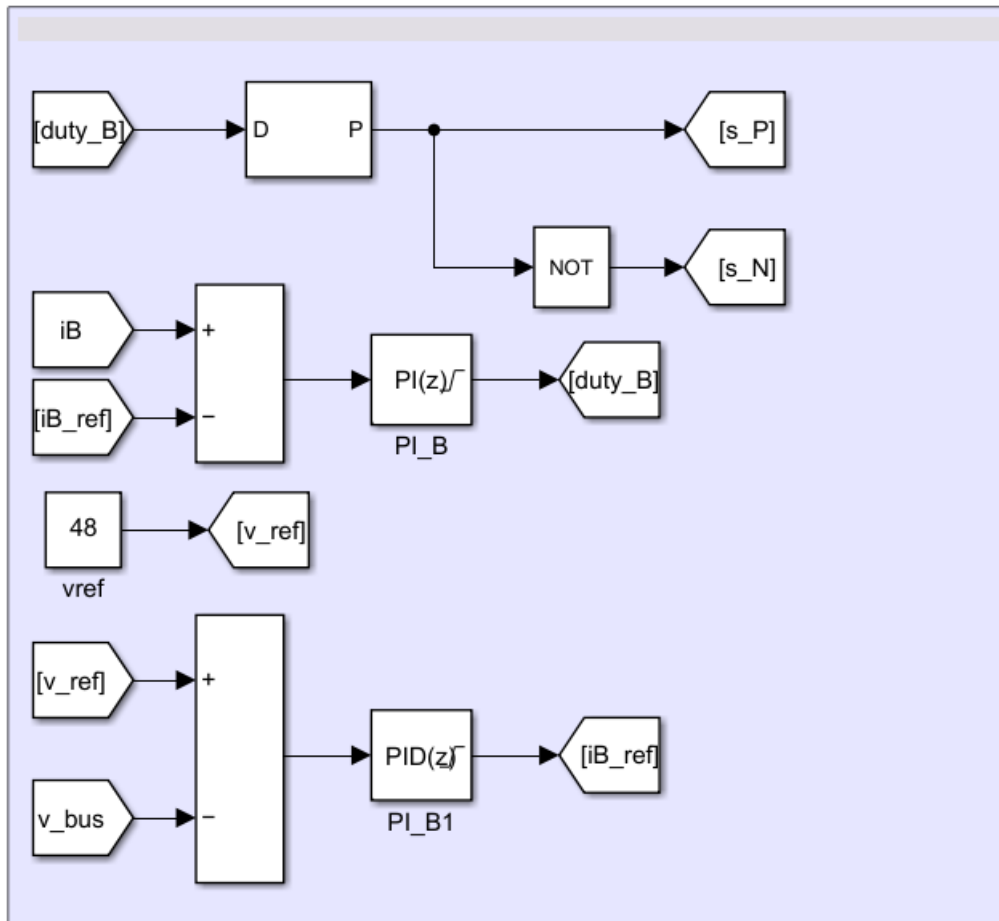


Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστικά των διακοπών IGBT

Ο έλεγχος και η παλμοδότηση του μετατροπέα γίνεται από τον ελεγκτή PI διπλού βρόχου, με έλεγχο του ρεύματος της μπαταρίας.

#### 6.2.5 Ελεγκτής PI

Ο έλεγχος που εφαρμόζεται είναι ένας PI διπλού βρόχου. Ο εσωτερικός βρόχος λαμβάνει δύο σήματα τάσης ως είσοδο και βγάζει ως έξοδο ένα σήμα ρεύματος της μπαταρίας. Τα σήματα εισόδου είναι μία τάση αναφοράς η οποία αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση του ζυγού και το άλλο σήμα είναι η πραγματική τάση του ζυγού. Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του εσωτερικού βρόχου, δηλαδή το σήμα ρεύματος της μπαταρίας, εισέρχεται ως σήμα αναφοράς στον εξωτερικό βρόχο. Επίσης, ως σήμα αναφοράς στον εξωτερικό βρόχο είναι το σήμα του πραγματικού ρεύματος της μπαταρίας. Τα block που αποτελούν τον ελεγκτή PI παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8



Σχήμα 6.8 Block ελέγχου PI διπλού βρόχου

Τέλος, το τελικό σήμα του ελεγκτή πηγαίνει αυτούσιο στο πρώτο IGBT, ενώ για το δεύτερο περνάει μέσα από μια πύλη NOT ώστε τα δύο σήματα να είναι συμπληρωματικά. Σημειώνεται πως λόγω του ιδανικού περιβάλλοντος μιας προσομοίωσης δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη dead-time, όπως θα ήταν σε πραγματικές συνθήκες.

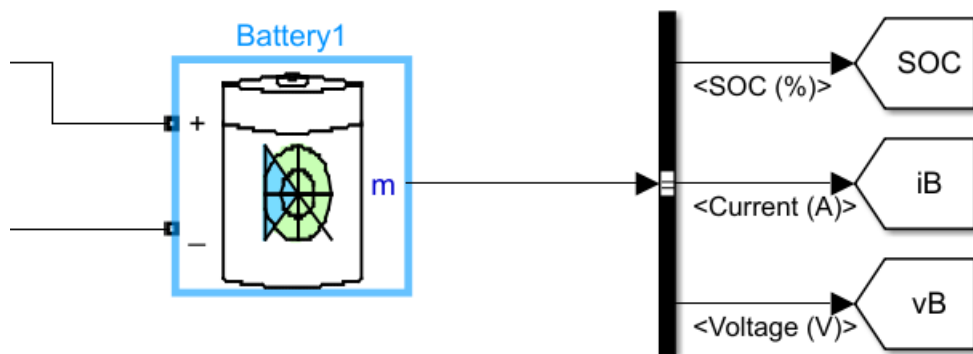
Μέσω του ελέγχου του δικατευθυντήριου μετατροπέα επιτυγχάνεται ο έλεγχος της μπαταρίας, έτσι ώστε αυτή να φορτίζεται όταν η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος επαρκεί και αντίστροφα αυτή να παρέχει ισχύ στο δίκτυο, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή ή κατά την διάρκεια της νύχτας όπου τα φωτοβολταϊκά δεν λειτουργούν. Επίσης, με τον ελεγκτή PI επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης, στον ζυγό συνεχούς τάσης στα 48V.

### 6.2.6 Σύστημα μπαταρίας

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης του συστήματος έχει χρησιμοποιηθεί έτοιμο block μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Χωρητικότητα: 50 Ah
- Ονομαστική τάση: 30V
- Τάση αποκοπής: 22,5V
- Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης: 21,74 A

Η μπαταρία έχει ως έξοδο τρία σήματα, τα οποία είναι η στάθμη φόρτισης, το ρεύμα της μπαταρίας και η τάση. Το block της μπαταρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας – μπαταρία ιόντων λιθίου

Καθώς η ανάπτυξη της προσομοίωσης, δεν προσομοιώνει τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος, η χωρητικότητα της μπαταρίας έχει επιλεγθεί ενδεικτικά.

### 6.2.7 DC μικροδίκτυο – σύστημα αντιστάσεων

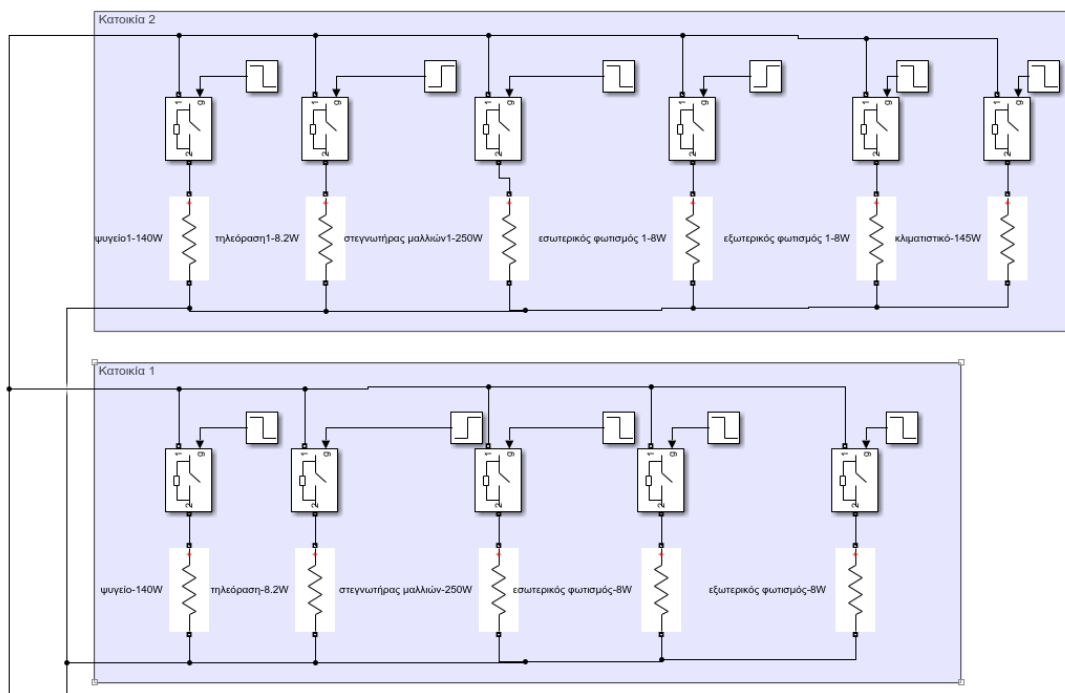
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα Κεφάλαια, ο σκοπός της προσομοίωσης είναι η τροφοδότηση ενός μικροδικτύου συνεχούς τάσης, το οποίο αποτελείται από τα φορτία δυο κατοικιών.

Για τις δυο κατοικίες, έχουν επιλεγθεί ενδεικτικά μερικά φορτία, τα οποία αντιστοιχούν στην τροφοδοσία ενός ψυγείου, μιας τηλεόρασης, ενός στεγνωτήρα μαλλιών, έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό φωτισμό, καθώς και ενός κλιματιστικού. Οι τιμές των αντιστάσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της προσομοίωσης δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά μεγέθη, αλλά αποτελούν υπό κλίμακα τιμές των πραγματικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, οι τιμές της ισχύος και της αντίστοιχης τιμής της αντίστασης για κάθε φορτίο παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1 Φορτία κατοικιών

<b>Φορτίο</b>	<b>Κατοικία 1</b>	<b>Κατοικία 2</b>
Ψυγείο	140W	140W
Τηλεόραση	8.2W	8.2W
Στεγνωτήρας μαλλιών	250W	250W
Εσωτερικός φωτισμός	8W	8W
Εξωτερικός φωτισμός	8W	8W
Κλιματιστικό	-	145W

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.10, η ζεύξη και η απόζευξη των φορτίων στον ζυγό συνεχούς τάσης, πραγματοποιείται με τη χρήση ελεγχόμενων διακοπών (ideal switches), οι οποίοι ελέγχονται μέσω βηματικών παλμών. Αυτό συμβαίνει για την προσομοίωση του συστήματος σε δυναμικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του ελέγχου.



Σχήμα 6.10 Block αντιστάσεων για τα φορτία των κατοικιών

### 6.3 Αυτονομία μπαταρίας

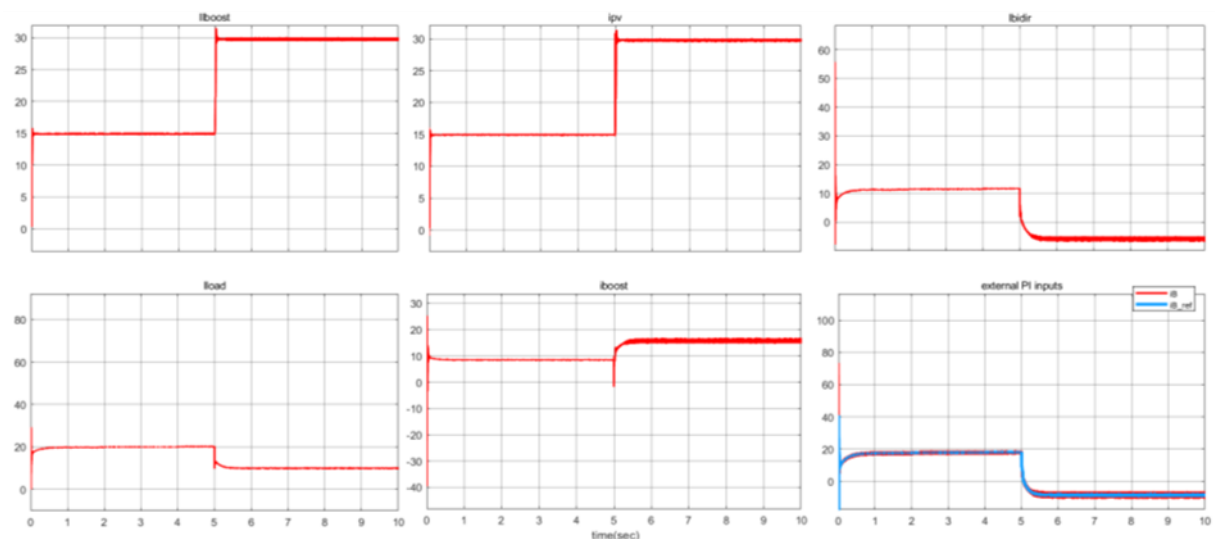
Όπως έχει γίνει η περιγραφή και σε προηγούμενη ενότητα, η χωρητικότητα της μπαταρίας για το σύστημα της προσομοίωσης αντιστοιχεί σε 50 Ah. Η χρήση της μπαταρίας γίνεται για τα διαστήματα στα οποία η παραγωγή του φωτοβολταϊκού δεν επαρκεί για την κάλυψη των φορτίων, καθώς και για τις ώρες όπου τα φωτοβολταϊκά έχουν μηδενική παραγωγή. Το συνολικό φορτίο για την κάθε κατοικία αντιστοιχεί σε αντιστάσεις συνολικής ισχύος 414.2W και 559.2W αντίστοιχα για την κάθε κατοικία ενώ η συνολική ισχύς είναι 973.4W. Για την τάση ζυγού η οποία είναι στα 48V το μέγιστο ρεύμα φορτίου είναι 20.27A. Ως εκ τούτου στην περίπτωση ζήτησης πλήρους φορτίου και από τις δύο κατοικίες η μπαταρία μπορεί να το τροφοδοτήσει για το χρονικό διάστημα των περίπου 2.5 ωρών. Ωστόσο, αυτό το χρονικό διάστημα αποτελεί την ελάχιστη δυνατή αυτονομία, καθώς αφορά το πλήρες φορτίο. Δεδομένου ότι τα φορτία δε θα είναι όλα μαζί συνδεδεμένα στο σύστημα, η αυτονομία της μπαταρίας θα είναι αυξημένη. Αν για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν λειτουργεί το φωτοβολταϊκό, η ζήτηση του

φορτίου είναι η μισή της συνολικής τότε η αυτονομία της μπαταρίας αντιστοιχεί σε 5 ώρες. Επίσης, μία ακόμα περίπτωση χρήσης της μπαταρίας είναι όταν το φωτοβολταϊκό δεν λειτουργεί σε ονομαστικές συνθήκες λόγω σκίασης ή μειωμένης ακτινοβολίας. Σε αυτήν την περίπτωση το χρονικό διάστημα το οποίο η μπαταρία μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα εξαρτάται από τα τρέχοντα φορτία και την τρέχουσα παραγωγή του φωτοβολταϊκού.

## 6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αναλύονται παραπάνω.

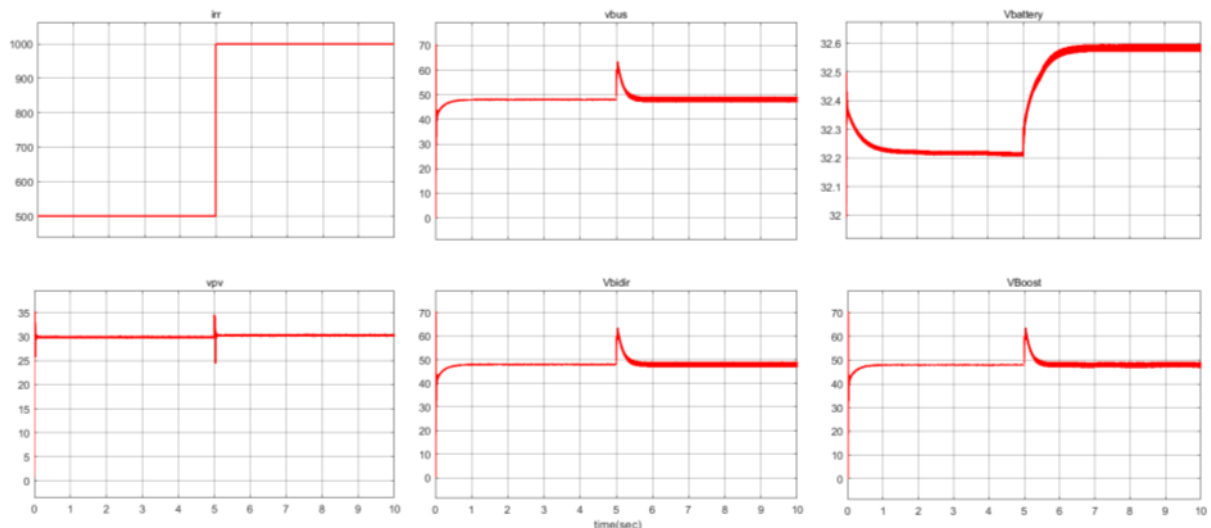
Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται τα ρεύματα  $I_{lboost}$ ,  $I_{load}$ ,  $I_{pv}$ ,  $I_{boost}$ ,  $I_{bidir}$ , καθώς και τα σήματα ρεύματος που έχει ως είσοδο ο εξωτερικός βρόχος του PI. Το  $I_{bidir}$  μετά την χρονική στιγμή των 5 δευτερολέπτων έχει αρνητικές τιμές, καθώς όπως θα παρουσιαστεί στο Σχήμα 6.11, από το 5<sup>ο</sup> ως το 10<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο η ροή ισχύος του δικατευθυντήριου μετατροπέα είναι προς την μπαταρία.



Σχήμα 6.11 Κυματομορφές ρευμάτων

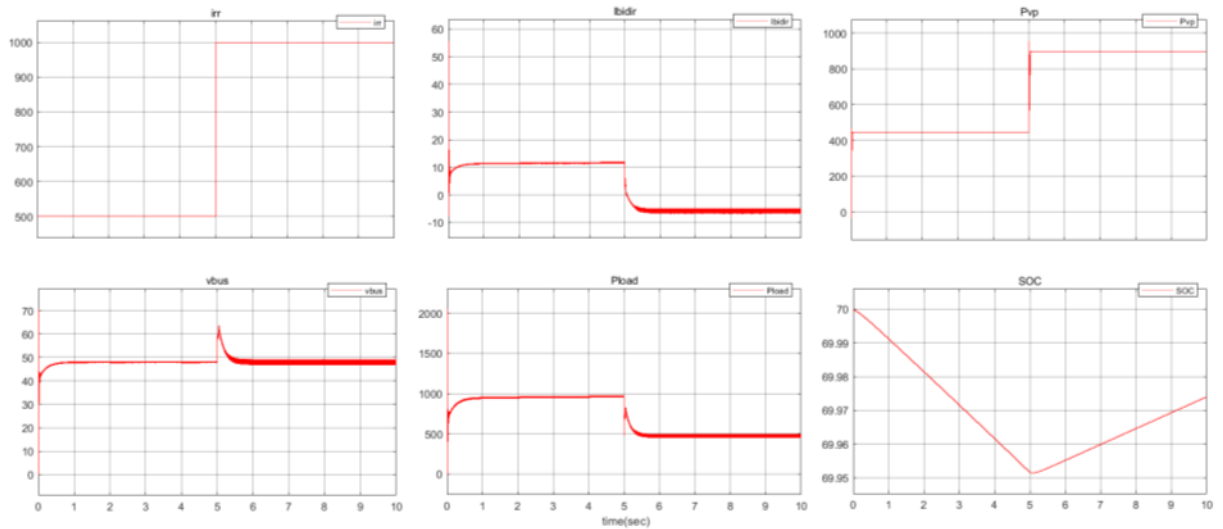


Στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται το σήμα της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και οι κυματομορφές των τάσεων  $V_{pv}$ ,  $V_{bus}$ ,  $V_{bidir}$ ,  $V_{battery}$  και  $V_{boost}$ . Από τις κυματομορφές των τάσεων παρατηρείται ότι η τάση στο ζυγό συνεχούς τάσης διατηρείται στα 48V, όπως έχει οριστεί στον έλεγχο PI. Την χρονική στιγμή της αλλαγής της ακτινοβολίας από τα  $500W/m^2$  στα  $1000W/m^2$  παρατηρείται ένα μεταβατικό φαινόμενο μικρής διάρκειας, το οποίο όμως εξασθενεί λόγω του ελεγκτή PI, ο οποίος επαναφέρει την τάση του ζυγού στα 48V. Επίσης, από την κυματομορφή της τάσης της μπαταρίας φαίνεται η αρχική εκφόρτιση της μπαταρίας και στη συνέχεια η φόρτισή της. Συγκεκριμένα, μέχρι την χρονική στιγμή των 5 δευτερολέπτων η τάση της μπαταρίας μειώνεται, ενώ από το χρονικό σημείο αυτό και μετά η τάση αυξάνεται το οποίο υποδηλώνει την φόρτιση της μπαταρίας.



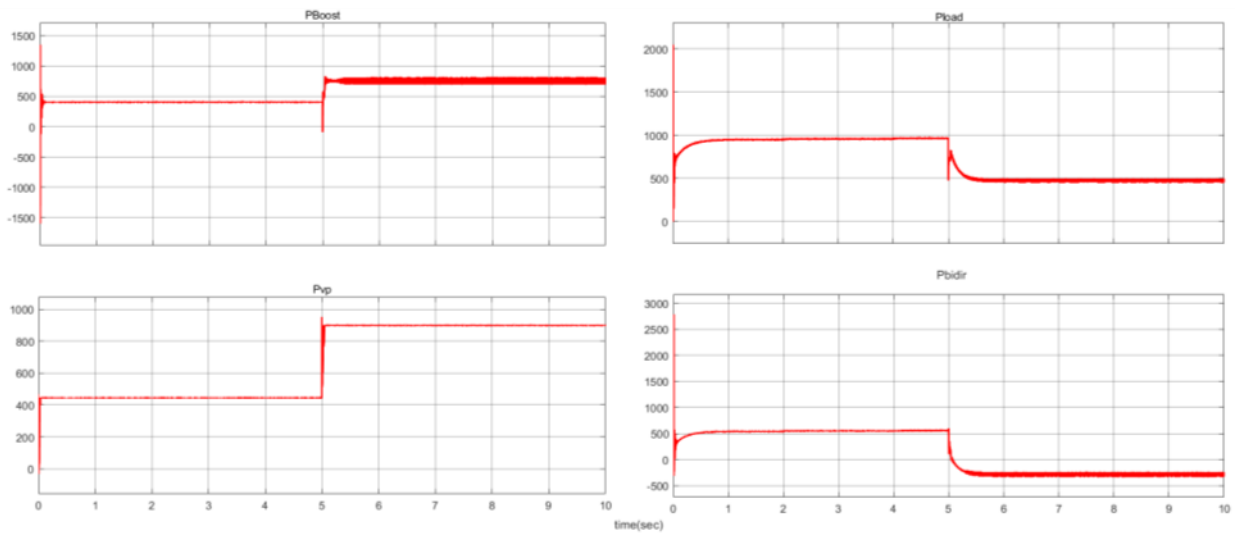
Σχήμα 6.12 Κυματομορφές τάσεων

Στο Σχήμα 6.13 Κυματομορφές ισχύος, τάσεων και στάθμης φόρτισης απεικονίζονται η ακτινοβολία, το ρεύμα του δικατευθυντήριου μετατροπέα, η ισχύς του φωτοβολταϊκού, η τάση του ζυγού, η ισχύς φορτίου και η στάθμη φόρτισης. Στην ισχύ φορτίου παρατηρείται ότι στα 5 δευτερόλεπτα αυτή μειώνεται στο μισό, καθώς εκείνη τη στιγμή αποσυνδέονται φορτία αντίστοιχης ισχύος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας την ίδια χρονική στιγμή, καθιστά δυνατή την πλήρη κάλυψη του φορτίου από το φωτοβολταϊκό, καθώς και την τροφοδότηση της μπαταρίας με την περίσσεια ενέργεια. Η φόρτιση της μπαταρίας αποτυπώνεται στην κυματομορφή της στάθμης της (soc).



Σχήμα 6.13 Κυματομορφές ισχύος, τάσεων και στάθμης φόρτισης

Στο Σχήμα 6.14 απεικονίζονται οι ισχείς  $P_{boost}$ ,  $P_{pv}$ ,  $P_{load}$  και  $P_{bidir}$ . Η ισχύς του δικατευθυντήριου μετατροπέα buck-boost είναι αρνητική εξαιτίας του αρνητικού ρεύματος που εξηγήθηκε παραπάνω.



Σχήμα 6.14 Κυματομορφές ισχύος

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την ορθή λειτουργία του συστήματος, καθώς και των τεχνικών ελέγχου των μετατροπέων (MPPT, PI). Επιτυγχάνεται η σύνδεση του συστήματος παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης μέσω ενός ζυγού του οποίου η τάση είναι 48V. Οι διακυμάνσεις της τάσεως λόγω των μεταβάσεων στα φορτία και στην αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας παρέρχονται σε

μικρό χρονικό διάστημα λόγω του ελέγχου. Έτσι το μικροδίκτυο τροφοδοτείται αποτελεσματικά, τόσο όταν η παραγωγή του φωτοβολταϊκού επαρκεί, όσο και από την μπαταρία, η οποία φορτίζεται με την περίσσεια ενέργεια του φωτοβολταϊκού.

## Κεφάλαιο 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια η ανθρωπότητα έχει στρέψει την προσοχή της στην ενσωμάτωση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και στην διεύρυνση της αξιοποίησης των ΑΠΕ αλλά και άλλων τεχνολογιών φιλικότερων προς το περιβάλλον, έτσι ώστε να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Επιπλέον η εξέλιξη των τεχνολογιών σχετικά με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και την ενσωμάτωση σε αυτά έξυπνα συστήματα έχει συνεισφέρει στην περαιτέρω αξιοποίηση των ΑΠΕ. Στο πλαίσιο αυτής της κατεύθυνσης, πλέον, αναπτύσσονται ιδιαίτερα υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, αποτελούμενα από Φ/Β γεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, με σκοπό την τροφοδότηση ενός μικροδικτύου.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε η μελέτη και η προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος. Συγκεκριμένα το σύστημα πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση ενός συστήματος, το οποίο με τη χρήση φ/β γεννήτριας και μίας μπαταρίας τροφοδότησε ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης μέσω ενός ζυγού. Συγκεκριμένα, το μοντέλο προσομοίωσης εστιάζει στην διασύνδεση του αναφερθέντος συστήματος με την σχεδίαση των επιμέρους συστημάτων, τα οποία είναι δύο μετατροπείς συνεχούς τάση σε συνεχή τάση, καθώς και των κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου τους. Όσον αφορά τους μετατροπείς, έχει σχεδιασθεί ένας μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost) και ένας δικατευθυντήριος μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης. Οι στρατηγικές ελέγχου για τους δύο μετατροπείς είναι ένας αλγόριθμος MPPT και ένας PI διπλού βρόχου, με έλεγχο ρεύματος αντίστοιχα.

Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου της φ/β γεννήτριας χρησιμοποιείται ο μετατροπέας boost, ο οποίος μέσω του ελέγχου MPPT διατηρεί την ισχύ εξόδου του φ/β στο σημείο μέγιστης ισχύος. Παράλληλα ο δικατευθυντήριος μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης πραγματοποιεί τη διασύνδεση της μπαταρίας με τον κοινό ζυγό συνεχούς τάση,

προκειμένου να επιτευχθεί η τροφοδότηση των φορτίων. Μέσω του δικατευθυντήριου μετατροπέα και του ελεγκτή PI επιτυγχάνεται η διατήρηση της τάσης αναφοράς στο ζυγό. Ο ελεγκτής PI αποτελείται από δύο βρόχους, εκ των οποίων ο εσωτερικός διατηρεί την τάση του ζυγού στην επιθυμητή τάση των 48 V. Αυτό επιτυγχάνεται επίσης μέσω του εξωτερικού βρόχου, ο οποίος είναι έλεγχος του ρεύματος της μπαταρίας.

Τα μεγέθη του συστήματος αφορούν υπό κλίμακα εφαρμογή. Η διαμόρφωση της φ/β γεννήτριας αποτελείται από 4 στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της γεννήτριας αποτυπώνονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο της προσομοίωσης. Βασικός στόχος αυτής της εφαρμογής είναι η αξιολόγηση του συστήματος τροφοδότησης και ελέγχου των φορτίων ενός μικροδικτύου με την χρήση ΑΠΕ, συγκεκριμένα φ/β και ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία στα διαστήματα απουσίας ηλιοφάνειας.

Η υλοποίηση του συστήματος απαιτεί την εύρεση κατάλληλων τοπολογιών μετατροπέων και ελέγχου τους καθώς και την μελέτη των μικροδικτύων, των έξυπνων δικτύων και των ΑΠΕ. Μέσω της προσομοίωσης του συστήματος αποδεικνύεται ότι με το παρόν σύστημα και με τις τοπολογίες και τις στρατηγικές ελέγχου αυτές, είναι δυνατό να επιτευχθεί η διασύνδεση του υβριδικού συστήματος με ένα μικροδίκτυο συνεχούς τάσης.

Συμπερασματικά, με την παρούσα διπλωματική εργασία κρίνεται πως το προτεινόμενο σύστημα το οποίο αποτελείται από ΑΠΕ, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μικροδίκτυο κατοικιών μπορεί να διασυνδεθεί αποτελεσματικά. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται η επαρκής τροφοδότηση των κατοικιών τόσο από τις ΑΠΕ του μικροδικτύου, όσο και από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο φορτίζεται όταν υπάρχει περίσσεια ενέργεια από την παραγωγή των ΑΠΕ. Κρίσιμο ρόλο σε αυτό διαδραματίζει ο έλεγχος του συστήματος. Ως εκ τούτου, διαπιστώνεται ότι με τις προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου (MPPT, PI), οι οποίες αναπτύσσονται στην προσομοίωση του συστήματος, είναι δυνατή η αποτελεσματική υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Τέλος, με την συνεισφορά της παρούσας εργασίας αποδεικνύεται πως με ένα σύστημα, όπως αυτό που αναπτύσσεται

στην προσομοίωση είναι εφικτή η ηλεκτροδότηση κατοικιών. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί, πως με την ανάπτυξη του παρόντος συστήματος με φυσικά μεγέθη (και όχι υπό κλίμακα σε επίπεδο προσομοίωσης) είναι εφικτή η τροφοδότηση και περισσότερων φορτίων ενός μικροδικτύου.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η διασύνδεση των ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής σε ένα μικροδίκτυο αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία, εξαιτίας της ποιότητας του δικτύου που πρέπει να διατηρηθεί, προκειμένου η ανακτώμενη ενέργεια να μεταφερθεί αποδοτικά. Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι η έρευνα που πραγματοποιείται πάνω στο συγκεκριμένο πεδίο είναι ιδιαίτερα σημαντική και συνεχίζεται με έντονους ρυθμούς.

Όπως αναλύθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία απαιτείται η χρήση μετατροπένων ηλεκτρονικών ισχύος και κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου, ώστε να επιτευχθεί τελικά η διασύνδεση του συστήματος στο μικροδίκτυο, με τον βέλτιστο τρόπο.

Το προτεινόμενο σύστημα, το οποίο αναλύθηκε και προσομοιώθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, δίνει δυνατότητες για περαιτέρω διερεύνηση, ως προς τα ακόλουθα:

- Την τοπολογία των μετατροπένων ισχύος, οι οποίες είναι διατάξεις απαραίτητες για την διατήρηση της παραγόμενης τάσης στο επίπεδο του δικτύου και για τη φόρτιση συσσωρευτών για την αποθήκευση της ενέργειας.
- Δοκιμή προηγμένων τεχνικών ελέγχου του συνολικού συστήματος, που στόχο θα έχουν τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της διάταξη.
- Υλοποίηση πειραματικών μετρήσεων για περαιτέρω αξιολόγηση του υφιστάμενου συστήματος.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Chadjivassiliadis, "Solar photovoltaic and wind power in Greece," *IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, vol. 134, no. 5, p. 457, 1987, doi: 10.1049/ip-a-1.1987.0070.
- [2] [2] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1263–1273, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.003.
- [3] E. Unamuno and J. A. Barrena, "Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1251–1259, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.194.
- [4] B. Patnaik, M. Mishra, R. C. Bansal, and R. K. Jena, "MODWT-XGBoost based smart energy solution for fault detection and classification in a smart microgrid," *Appl Energy*, vol. 285, p. 116457, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116457.
- [5] International Electrotechnical Commission and International Electrotechnical Commission. Technical Committee 8, Microgrids. Part 1, Guidelines for microgrid projects planning and specification.
- [6] M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, and F. Blaabjerg, "Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 160–186, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.038.
- [7] H. J. Laaksonen, "Protection Principles for Future Microgrids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 25, no. 12, pp. 2910–2918, Dec. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2066990.
- [8] P. Wei and W. Chen, "Microgrid in China: A review in the perspective of application," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 6601–6606, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.059.
- [9] H. Lotfi and A. Khodaei, "AC Versus DC Microgrid Planning," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 296–304, Jan. 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2457910.



- [10] B. Yuan, A. Chen, C. Du, and C. Zhang, "Hybrid AC/DC microgrid energy management based on renewable energy sources forecasting," in 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), Jul. 2017, pp. 2870–2875. doi: 10.23919/ChiCC.2017.8027801.
- [11] T. H. Pham, I. Prodan, D. Genon-Catalot, and L. Lefèvre, "Economic constrained optimization for power balancing in a DC microgrid: A multi-source elevator system application," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105753, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105753.
- [12] H. Yu, S. Niu, Y. Zhang, and L. Jian, "An integrated and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid architecture with autonomous power flow control for nearly/net zero energy buildings," *Appl Energy*, vol. 263, p. 114610, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114610.
- [13] C. B. Robledo, V. Oldenbroek, F. Abbruzzese, and A. J. M. van Wijk, "Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building," *Appl Energy*, vol. 215, pp. 615–629, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.038.
- [14] Y. Zhang, Q. Sun, J. Zhou, L. Li, P. Wang, and J. M. Guerrero, "Coordinated Control of Networked AC/DC Microgrids With Adaptive Virtual Inertia and Governor-Gain for Stability Enhancement," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 1, pp. 95–110, Mar. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3011223.
- [15] N. Zhi, K. Ding, L. Du, and H. Zhang, "An SOC-Based Virtual DC Machine Control for Distributed Storage Systems in DC Microgrids," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 3, pp. 1411–1420, Sep. 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2975033.
- [16] M. S. Alam, M. A. Abido, and Z. M. Al-Hamouz, "Model Predictive Control Approach for Bridge-Type Fault Current Limiter in VSC-HVDC System," *Arab J Sci Eng*, vol. 44, no. 3, pp. 2079–2089, Mar. 2019, doi: 10.1007/s13369-018-3294-z.
- [17] X. Zhu, F. Meng, Z. Xie, and Y. Yue, "An Inertia and Damping Control Method of DC–DC Converter in DC Microgrids," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 2, pp. 799–807, Jun. 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2952717.
- [18] C. Yin, H. Wu, F. Locment, and M. Sechilariu, "Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor," *Energy*

- Convers Manag, vol. 132, pp. 14–27, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.018.
- [19] B. R. Ravada and N. R. Tummuru, “Control of a Supercapacitor-Battery-PV Based Stand-Alone DC-Microgrid,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 3, pp. 1268–1277, Sep. 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2982425.
- [20] A. Santucci, A. Sorniotti, and C. Lekakou, “Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications,” *J Power Sources*, vol. 258, pp. 395–407, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.118.
- [21] V. Vega-Garita, A. P. Harsarapama, L. Ramirez-Elizondo, and P. Bauer, “Physical integration of PV-battery system: Advantages, challenges, and thermal model,” in *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Apr. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514038.
- [22] F. S. Al-Ismael, “DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 36154–36172, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062840.
- [23] M. Cupelli, A. Monti, E. de Din, and G. Sulligoi, “Case study of voltage control for MVDC microgrids with constant power loads - Comparison between centralized and decentralized control strategies,” in *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Apr. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/MELCON.2016.7495331.
- [24] X. Lu, K. Sun, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and L. Huang, “State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2804–2815, Jun. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2279374.
- [25] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, and J. C. Vasquez, “An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 4, pp. 1800–1812, Apr. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2266419.
- [26] A. Agrawal and R. Gupta, “Distributed coordination control of hybrid energy resources for power sharing in coupled hybrid DC/AC microgrid using paralleled IFCs/ILCs,” *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 89–105, Mar. 2019, doi: 10.1049/iet-stg.2018.0165.

- [27] S. Sahoo, J. C.-H. Peng, S. Mishra, and T. Dragicevic, "Distributed Screening of Hijacking Attacks in DC Microgrids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 7, pp. 7574–7582, Jul. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2957071.
- [28] P. Lin et al., "A Distributed Power Management Strategy for Multi-Paralleled Bidirectional Interlinking Converters in Hybrid AC/DC Microgrids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5696–5711, Sep. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2890420.
- [29] S. Anand, B. G. Fernandes, and J. Guerrero, "Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 4, pp. 1900–1913, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2215055.
- [30] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
- [31] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [32] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, "Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region," *Energy Convers Manag*, vol. 180, pp. 442–472, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.084.
- [33] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, "Multiyear Load Growth Based Techno-Financial Evaluation of a Microgrid for an Academic Institution," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 37533–37555, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2849411.
- [34] A. Kumar et al., "A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 596–609, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [35] R. Singh and R. C. Bansal, "Review of HRESs based on storage options, system architecture and optimisation criteria and methodologies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 7, pp. 747–760, May 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0603.

- [36] R. Singh and R. C. Bansal, "Optimization of an Autonomous Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 1, pp. 399–409, Jan. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2867626.
- [37] R. Singh, R. C. Bansal, A. R. Singh, and R. Naidoo, "Multi-Objective Optimization of Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis for Islanding and Grid Connected Modes of Operation," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47332–47354, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2867276.
- [38] R. Singh, R. C. Bansal, and A. R. Singh, "Optimization of an isolated photo-voltaic generating unit with battery energy storage system using electric system cascade analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 164, pp. 188–200, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.08.005.
- [39] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, "Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region," *Energy Convers Manag*, vol. 180, pp. 442–472, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.084.
- [40] F. M. R. Islam, K. al Mamun, and M. T. O. Amanullah, Eds., *Smart Energy Grid Design for Island Countries*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-50197-0.
- [41] N. R. Merritt, C. Chakraborty, and P. Bajpai, "A control strategy for islanded operation of a Voltage Source Converter (VSC) based distributed resource unit under unbalanced conditions," in *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Jul. 2015, pp. 1550–1555. doi: 10.1109/INDIN.2015.7281964.
- [42] O. Edenhofer et al., Eds., *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press, 2011. doi: 10.1017/CBO9781139151153.
- [43] K. Kaygusuz, "Energy for sustainable development: A case of developing countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1116–1126, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.013.
- [44] T. Abbasi, M. Premalatha, and S. A. Abbasi, "The return to renewables: Will it help in global warming control?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 891–894, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.048.

- [45] S. Asumadu-Sarkodie and P. A. Owusu, "Feasibility of biomass heating system in Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus," *Cogent Eng*, vol. 3, no. 1, p. 1134304, Dec. 2016, doi: 10.1080/23311916.2015.1134304.
- [46] T. Hák, S. Janoušková, and B. Moldan, "Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators," *Ecol Indic*, vol. 60, pp. 565–573, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.08.003.
- [47] P. A. Owusu, S. Asumadu-Sarkodie, and P. Ameyo, "A review of Ghana's water resource management and the future prospect," *Cogent Eng*, vol. 3, no. 1, p. 1164275, Dec. 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1164275.
- [48] T. Abbasi, M. Premalatha, and S. A. Abbasi, "The return to renewables: Will it help in global warming control?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 891–894, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.048.
- [49] Y. Lu, N. Nakicenovic, M. Visbeck, and A.-S. Stevance, "Policy: Five priorities for the UN Sustainable Development Goals," *Nature*, vol. 520, no. 7548, pp. 432–433, Apr. 2015, doi: 10.1038/520432a.
- [50] A. Luque and S. Hegedus, Eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. doi: 10.1002/0470014008.
- [51] N. Kh. M. A. Alrikabi, "Renewable Energy Types," *Journal of Clean Energy Technologies*, pp. 61–64, 2014, doi: 10.7763/jocet.2014.v2.92.
- [52] M. S. Dresselhaus and I. L. Thomas, "Alternative energy technologies," *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 332–337, Nov. 2001, doi: 10.1038/35104599.
- [53] R. K. Niven, "Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 9, no. 6, pp. 535–555, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.rser.2004.06.003.
- [54] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, "DESIGN OF HYBRID-PHOTOVOLTAIC POWER GENERATOR, WITH OPTIMIZATION OF ENERGY MANAGEMENT," *Solar Energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143–157, Feb. 1999, doi: 10.1016/S0038-092X(98)00139-X.
- [55] D. Kejela Geleta, M. Singh Manshahia, and D. Kajela, "Optimization of Renewable Energy Systems: A Review Optimization of Hybrid Wind and Solar Renewable Energy System by Teaching Learning Based Optimization Algorithm View project Congestion Control in WSN View project Optimization of Renewable Energy Systems: A Review," 2017, [Online]. Available: [www.ijrst.com](http://www.ijrst.com)

- [56] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Jun. 2007, pp. 2392–2396. doi: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
- [57] Weidong Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), pp. 1957–1963. doi: 10.1109/PESC.2004.1355417.
- [58] O. Wasynezuk, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3031–3037, Sep. 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.318109.
- [59] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1239–1250, Apr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2049715.
- [60] W. Chen, A. Q. Huang, C. Li, G. Wang, and W. Gu, "Analysis and Comparison of Medium Voltage High Power DC/DC Converters for Offshore Wind Energy Systems," IEEE Trans Power Electron, vol. 28, no. 4, pp. 2014–2023, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2215054.
- [61] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 82–102, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077.
- [62] L. M. Fernandez, P. Garcia, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway," Energy Convers Manag, vol. 52, no. 5, pp. 2183–2192, May 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.12.028.
- [63] "Content Coverage Guide."
- [64] L. F. Costa, S. A. Mussa, and I. Barbi, "Multilevel Buck/Boost-Type DC–DC Converter for High-Power and High-Voltage Application," IEEE Trans Ind Appl, vol. 50, no. 6, pp. 3931–3942, Nov. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2313715.
- [65] G. Sulligoi, D. Bosich, G. Giadrossi, L. Zhu, M. Cupelli, and A. Monti, "Multiconverter Medium Voltage DC Power Systems on Ships: Constant-Power Loads Instability Solution Using Linearization via State Feedback Control," IEEE Trans Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2543–2552, Sep. 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2305904.

- [66] G. J. M. de Sousa and M. L. Heldwein, "Three-phase unidirectional modular multilevel converter," in 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Sep. 2013, pp. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2013.6634676.
- [67] Y. Tang, D. Fu, T. Wang, and Z. Xu, "Hybrid Switched-Inductor Converters for High Step-Up Conversion," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1480–1490, Mar. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2364797.
- [68] C. E. Sheridan, M. M. C. Merlin, and T. C. Green, "Assessment of DC/DC converters for use in DC nodes for offshore grids," in 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 2012, pp. 31–31. doi: 10.1049/cp.2012.1966.
- [69] T. Luth et al., "Choice of AC operating voltage in HV DC/AC/DC system," in 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672913.
- [70] F. C. Schwarz and J. ben Klaassens, "A Controllable Secondary Multikilowatt DC Current Source With Constant Maximum Power Factor in its Three-Phase Supply Line," IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-23, no. 2, pp. 142–150, May 1976, doi: 10.1109/TIECI.1976.351366.
- [71] D. M. Bellur and M. K. Kazimierczuk, "DC-DC converters for electric vehicle applications," in 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Oct. 2007, pp. 286–293. doi: 10.1109/EEIC.2007.4562633.
- [72] I. Roasto, D. Vinnikov, and V. Vodovozov, "Simulation and evaluation of control methods for the rolling stock static auxiliary converter based on three-level NPC inverter topology," in 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Mar. 2009, pp. 593–598. doi: 10.1109/POWERENG.2009.4915176.
- [73] W. Jiang and B. Fahimi, "Maximum solar power transfer in Multi-port Power Electronic Interface," in 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Feb. 2010, pp. 68–73. doi: 10.1109/APEC.2010.5433691.
- [74] H. Fathabadi, "Novel photovoltaic based battery charger including novel high efficiency step-up DC/DC converter and novel high accurate fast maximum power

- point tracking controller,” *Energy Convers Manag*, vol. 110, pp. 200–211, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.025.
- [75] M. E. Baçoğlu and B. Çakır, “Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC–DC converters by using a new approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1100–1113, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.128.
- [76] J. L. Santos, F. Antunes, A. Chehab, and C. Cruz, “A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 7, pp. 772–778, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.014.
- [77] J. M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, and J. M. Andújar, “Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.06.006.
- [78] A. Jossen, J. Garche, and D. U. Sauer, “Operation conditions of batteries in PV applications,” *Solar Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 759–769, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.12.013.
- [79] A. Mohammedi, D. Rekioua, T. Rekioua, and S. Bacha, “Valve Regulated Lead Acid battery behavior in a renewable energy system under an ideal Mediterranean climate,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20928–20938, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.087.
- [80] O. Palizban and K. Kauhaniemi, “Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications,” *J Energy Storage*, vol. 6, pp. 248–259, May 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.02.001.
- [81] S. Behrens, W. J. K. B. A. I, and R. E. L, “Electrical energy storage: technology overview and applications. CSIRO, Australia,” 2015.
- [82] B. L. Ellis and L. F. Nazar, “Sodium and sodium-ion energy storage batteries,” *Curr Opin Solid State Mater Sci*, vol. 16, no. 4, pp. 168–177, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.cossms.2012.04.002.
- [83] K. Chomsuwan, P. Prisuwana, and V. Monyakul, “Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch buck-boost converter,” in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, pp. 1527–1530. doi: 10.1109/PVSC.2002.1190902.



- [84] A. Chakraborty, A. Khaligh, A. Emadi, and A. Pfaelzer, "Digital Combination of Buck and Boost Converters to Control a Positive Buck-Boost Converter," in 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1–6. doi: 10.1109/PESC.2006.1711978.
- [85] S. Cuk and R. D. Middlebrook, "Advances in Switched-Mode Power Conversion Part I," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-30, no. 1, pp. 10–19, Feb. 1983, doi: 10.1109/TIE.1983.356697