



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Εισαγωγή των Φωτοβολταϊκών στο Ελληνικό Σύστημα
Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Λύρου Μαρία

Επιβλέποντες Καθηγητές

Ελευθέριος Τσουκαλάς
Καθηγητής ΠΘ
Διονύσιος Βαβουγιός
Καθηγητής ΠΘ

Βόλος 2018



UNIVERSITY OF THESSALY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Introduction of photovoltaics into the greek electric power
system

DIPLOMA THESIS

Lyrrou Maria

Supervisors

Eleutherios Tsoukalas
Professor UTH
Dionisios Vavougiος
Professor UTH

Volos 2018

Ευχαριστίες

Με αφορμή την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τσουκαλά Ελευθέριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου, καθώς και το συνεπιβλέποντα καθηγητή Διονύσιο Βαβουγιό.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Μπαργιώτα Δημήτριο για τις χρήσιμες συμβουλές και τις διορθώσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Εισαγωγή των φωτοβολταϊκών στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί η εισαγωγή των φωτοβολταϊκών στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το ενεργειακό ζήτημα και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ανάπτυξή τους στη χώρα μας και γίνεται ειδική αναφορά στην ηλιακή ενέργεια και τους τρόπους εκμετάλλευσής της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια ιστορική αναδρομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών κυττάρων και αναφέρονται η δομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και η διάκρισή τους. Τέλος, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Επιπλέον, δίνονται οι πρότυπες και κανονικές συνθήκες λειτουργίας του, ορίζεται η απόδοσή του και η επίδραση της σκίασης σε αυτή, αναλύονται οι τρόποι σύνδεσης και στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και οι συσσωρευτές, ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή και οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Επίσης, αναλύονται οι υποσταθμοί μέσης τάσης και τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η αποκεντρωμένη και κεντροκοποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Επιπλέον, παρατίθενται οι βασικές διαδικασίες αδειοδότησης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων, γίνεται ειδική αναφορά στο net-metering και αναλύεται η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε για τη διεύθυνση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Abstract

This diploma thesis will present the introduction of photovoltaics into the Greek electric power system.

The first chapter presents the energy issue and renewable energy sources. It describes the advantages and disadvantages of renewable energy sources, their development in our country and special reference is made to solar energy and its exploitation.

The second chapter presents a historical overview of the photovoltaic systems, describes the photovoltaic phenomenon, the photovoltaic cell technologies, and the structure of the photovoltaic systems and their distinction. Finally, the advantages and disadvantages of photovoltaics are analyzed.

In the third chapter we present the equivalent electric circuit and the characteristic curve I-V of a photovoltaic element. Moreover, the standard and normal operating conditions of this element are given. It also elaborates on the efficiency and the effect of the shading on it, the ways of connection and support of the photovoltaic panels as well as the accumulators, the battery charging controller and the inverters used in a photovoltaic system. In addition, it further analyzes the mid-voltage substations and the protection means used.

The fourth chapter analyzes the problems that arise when connecting photovoltaic systems to the grid.

The fifth chapter presents the Greek electric power system, the decentralized and centralized production of photovoltaic electricity and the liberalization of the electricity market in Greece. What is more, the basic procedures for the licensing and installation of photovoltaic systems are listed, special reference is made to net-metering and the installed power of photovoltaics in our country in recent years is analyzed.

The final chapter comes to conclusions about the penetration of photovoltaic systems into the Greek electric power system.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
1.Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα.....	8
1.2 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.....	9
1.3 Ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα.....	10
1.4 Ηλιακή ενέργεια.....	10
2.Φωτοβολταϊκό Σύστημα	
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	12
2.3 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων.....	14
2.4 Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.....	18
2.5 Διάκριση φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	19
2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β.....	20
3.Ανάλυση Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Συστήματος	
3.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.....	22
3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου.....	23
3.3 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Η έννοια της ισχύος αιχμής.....	24
3.4 Η ονομαστική ισχύς ενός Φ/Β πλαισίου. Συνθήκες κανονικής λειτουργίας.....	25
3.5 Απόδοση Φ/Β κυττάρου.....	26
3.6 Σκίαση.....	28
3.7 Τρόποι σύνδεσης.....	28
3.8 Στήριξη.....	29

3.9 Συσσωρευτές.....	32
3.10 Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή.....	33
3.11 Μετατροπείς (converters).....	33
3.12 Υποσταθμοί Μέσης τάσης.....	34
3.13 Υπολογισμός μέσων προστασίας στη μέση και χαμηλή τάση.....	35
4.Προβλήματα που προκύπτουν κατά τη σύνδεση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο	
4.1 Βυθίσεις Τάσης.....	36
4.2 Ανυψώσεις (Swell) Τάσης.....	37
4.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις.....	37
4.4 Σφάλματα προς Γη.....	38
4.5 Συνεισφορά στην Ικανότητα Βραχυκυκλώματος.....	39
4.6 Το φαινόμενο της νησιδοποίησης.....	39
4.7 Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος στο Δίκτυο (Από τους αντιστροφείς).....	40
4.8 Αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και συντελεστής ισχύος.....	40
5.Διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	
5.1 Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	43
5.2 Κεντροποιημένη και Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β.....	45
5.3 Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	46
5.4 Διαδικασίες αδειοδότησης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	47
5.5 Net-metering.....	50
5.6 Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών.....	51
6.Συμπεράσματα.....	56
Βιβλιογραφία.....	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Τα τελευταία χρόνια, με τον πληθυσμό της Γης να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο και κατά συνέπεια, δημιουργώντας αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας, έχει προκύψει το ενεργειακό ζήτημα. Σε αυτό φυσικά έχει συμβάλει και η αλματώδης πρόοδος της τεχνολογίας, με την πληθώρα των ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιεί κάθε άνθρωπος πλέον από,τι παλιότερα.

Τί είναι όμως το ενεργειακό ζήτημα; Όπως προαναφέρθηκε, είναι στην ουσία η αύξηση των απαιτήσεων για παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποθέματα όμως των συμβατικών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, άνθρακας), που αποτελούν τη βασική πηγή ενεργειακού εφοδιασμού, εξαντλούνται λόγω της αλόγιστης χρήσης τους και στην καλύτερη των περιπτώσεων επαρκούν για άλλα 60 έως 100 χρόνια. Ταυτόχρονα, όλη αυτή η απαίτηση για ενέργεια οδηγεί στην επέμβαση των προμηθευτριών χωρών σε οικονομικό και πολιτικό επίπεδο στις χώρες που κάνουν εισαγωγή, προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες τους, μη έχοντας κοιτάσματα. Τέλος, πολύ σοβαρό είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνει η χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων, εκλύοντας δις.εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και απειλώντας το μέλλον της διαβίωσης στον πλανήτη μας. Γεγονός, που έχει ανησυχήσει την παγκόσμια κοινότητα, λαμβάνοντας μέτρα (Συμφωνία Παρισίων κλπ) προκειμένου να προλάβει αυτές τις δυσάρεστες συνέπειες. [12]

Όσον αφορά τη χώρα μας, ο ενεργειακός της εφοδιασμός είναι στο μεγαλύτερο μέρος του, εξαρτημένος από τα ορυκτά καύσιμα, μην αποτελώντας εξαίρεση. Πέρα από τις εισαγωγές που πραγματοποιούνται, η κύρια πηγή πλούτου είναι ο λιγνίτης, με σημαντικά κοιτάσματα στην Πτολεμαΐδα, τη Φλώρινα και το Αμύνταιο, τη Δράμα, την Ελασσόνα και την Πελοπόννησο(περιοχή Μεγαλόπολης). Η επάρκεια όμως των κοιτασμάτων αυτών αναμένεται να εξαντληθεί τα επόμενα χρόνια και έτσι, το ενεργειακό πρόβλημα δεν αφήνει ανεπηρέαστη τη χώρα μας και ιδιαίτερα την οικονομία.

Όλα αυτά οδηγούν στην αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας, μετατρέποντας την ενεργειακή πολιτική της χώρας μας σε μη βλαβερή προς το περιβάλλον και συμβάλλοντας στους παγκόσμιους στόχους.

1.2 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μη ορυκτές πηγές ενέργειας που υπάρχουν σε άφθονες ποσότητες στη φύση. Γι'αυτό και είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και εκμεταλλεύονται την ήδη υπάρχουσα ροή ενέργειας στη φύση. Αρχικά, οι άνθρωποι τις χρησιμοποιούσαν πριν στραφούν στα ορυκτά καύσιμα με τη βιομηχανική επανάσταση, οπότε και έκτοτε οδηγήθηκαν σε τέλμα. Τα τελευταία χρόνια όμως με τη συσσώρευση των περιβαλλοντικών προβλημάτων και την ανησυχία που αυτά επιφέρουν, έχουν επιστρέψει στο προσκήνιο και γίνονται πολλές προσπάθειες για την αξιοποίησή τους.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- **ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια:** ενεργητικά, παθητικά και φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα,
- **ο άνεμος - αιολική ενέργεια,**
- **οι υδατοπτώσεις - υδραυλική ενέργεια,** με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
- **η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια:** υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας,
- **η βιομάζα:** θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών, αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- **οι θάλασσες:** ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος. [6]

Οι ΑΠΕ έχουν ποικίλα πλεονεκτήματα, που ενισχύουν την ανάγκη ένταξής τους στον ενεργειακό εφοδιασμό των χωρών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δε βλάπτουν το περιβάλλον και γενικά είναι αποδεκτές. Μπορούν να βοηθήσουν στην απεξάρτηση από τους φυσικούς πόρους της Γης, καθώς και χωρών από τις προμηθεύτριες χώρες, καταστρώντας τις ανεξάρτητες ενεργειακά και εξασφαλίζοντας τα ενεργειακά τους εφόδια. Ακόμα, με τις επενδύσεις και τα επιδοτούμενα προγράμματα που γίνονται, καταπολεμάται η ανεργία, δημιουργούνται θέσεις εργασίας και πολλές περιοχές αναβαθμίζονται τόσο σε οικονομικό όσο και κοινωνικό επίπεδο. Επιπλέον, δεν έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος λειτουργίας και η διεσπαρμένη παραγωγή τους μπορεί να εξομαλύνει τη ζήτηση τοπικά, συμβάλλοντας στη μείωση των απωλειών όταν μεταφέρεται η ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. [17]

Υπάρχουν όμως και κάποιοι παράγοντες που αποτελούν τροχοπέδη στην ανάπτυξη των ΑΠΕ. Ένας από αυτούς, είναι το σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης σε αυτές τις τεχνολογίες, σε αντίθεση με των συμβατικών καυσίμων που είναι χαμηλό. Επίσης, παρουσιάζουν αυξομειώσεις στη διαθεσιμότητά τους, που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη εφεδρικών πηγών ενέργειας ή μέσων αποθήκευσης, που ανεβάζουν το κόστος. Ακόμα, για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συνήθως ευρείες εγκαταστάσεις, ενώ υπάρχει δυσκολία και στη μεταφορά και αποθήκευση του διεσπαρμένου δυναμικού τους.

1.3 Ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει πλούσιο δυναμικό σε ΑΠΕ. Κυρίως, η αιολική ενέργεια έχει αναπτυχθεί αρκετά τα πρόσφατα χρόνια, με σημαντικές επενδυτικές δραστηριότητες, αφού η χώρα μας με τα πολυάριθμα νησιά της και όχι μόνο, προσφέρει υψηλές αποδόσεις με ταχύτητες ανέμου πάνω από 8 m/s. Το ίδιο πλούσιο είναι και το ηλιακό δυναμικό της, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

Ως μέλος της ΕΕ, η χώρα μας οφείλει να κινηθεί στην κατεύθυνση που έχει χαράξει η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις ΑΠΕ με το στόχο του 20-20-20, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η κλιματική αλλαγή και τα περιβαλλοντικά προβλήματα γενικότερα. Μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το 1990,
- 20% κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ και
- 20% βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. [6]

Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διεύδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

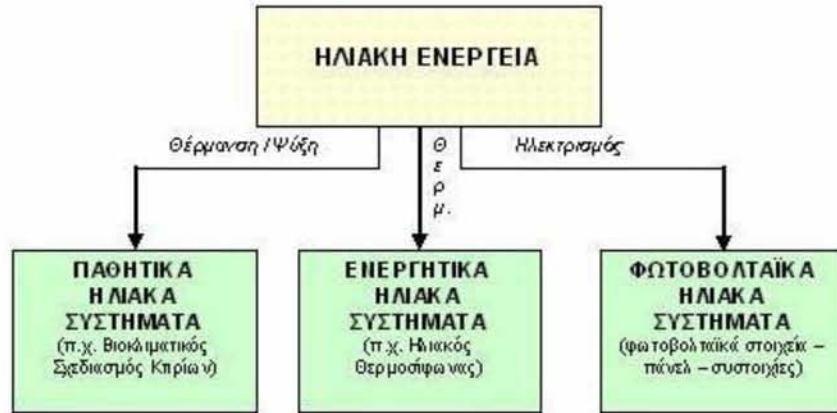
Στο πλαίσιο αυτό, έχουν ψηφιστεί νόμοι για να ενισχύσουν την ανάπτυξη των ΑΠΕ, καλύπτοντας εν μέρη το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης και παρέχοντας την εγγυημένη πώληση όλης της παραγόμενης ενέργειας σε εγγυημένη τιμή (feed in tariff) και για εγγυημένη χρονική περίοδο. Παράλληλα, δίνονται κίνητρα στους ιδιώτες επενδυτές, αλλά και το κράτος μέσω των κατάλληλων φορέων κάνει τέτοιες επενδύσεις.

Οι στόχοι της χώρας μας για το 2020 είναι για την ηλεκτροπαραγωγή με την ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ, όπου 7500MW θα είναι από αιολικά πάρκα, 3000MW από υδροηλεκτρικά και 2500MW από τα ηλιακά. Σχετικά με τη θέρμανση και ψύξη με την ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας, των θερμικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και των εφαρμογών βιομάζας. [6]

1.4 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια ήπια, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και είναι το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες. [6] Η αξιοποίησή της χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: τα **παθητικά** ηλιακά συστήματα, τα **ενεργητικά** ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα, και τα **φωτοβολταϊκά συστήματα** (σχήμα 1.1). Τα παθητικά και τα ενεργητικά

ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1.1. Διαγραμματική απεικόνιση της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας

Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Τα συστήματα αυτά συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και έπειτα τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή κάποιο άλλο ρευστό. Η πιο απλή και διαδεδομένη εφαρμογή τους είναι η παραγωγή ζεστού νερού (οικιακή ή βιομηχανική χρήση, ακόμα και για θέρμανση/ψύξη χώρων), οι ευρέως γνωστοί ηλιακοί θερμοσίφωνες. [6, 9]

Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση των κτιρίων και για να παρέχουν φυσικό φωτισμό, αποτελώντας την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής. [6, 9]

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και παραδοσιακά ηλεκτροδοτούν μη διασυνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεις. Η χώρα μας διαθέτει πλούσιο ηλιακό δυναμικό, καθιστώντας τη ιδανική για την ανάπτυξη αυτών των συστημάτων. Αναλυτικά θα τα δούμε στη συνέχεια. [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Φωτοβολταϊκό Σύστημα

2.1 Εισαγωγή

Η ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel, ενώ έκανε πειράματα με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το 1876 ο Adams και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι το σελήνιο(Se) παρήγαγε μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος όταν ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνά του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη και στις μέρες μας. Το 1949 οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Παράλληλα, η κβαντική θεωρία είχε αναπτυχθεί και άρχισαν οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές. Το πρώτο ηλιακό κελί δημιουργήθηκε στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Charin, Fuller και Pearson. Η απόδοση, δηλαδή το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ήταν αρχικά χαμηλή, περίπου 6%.

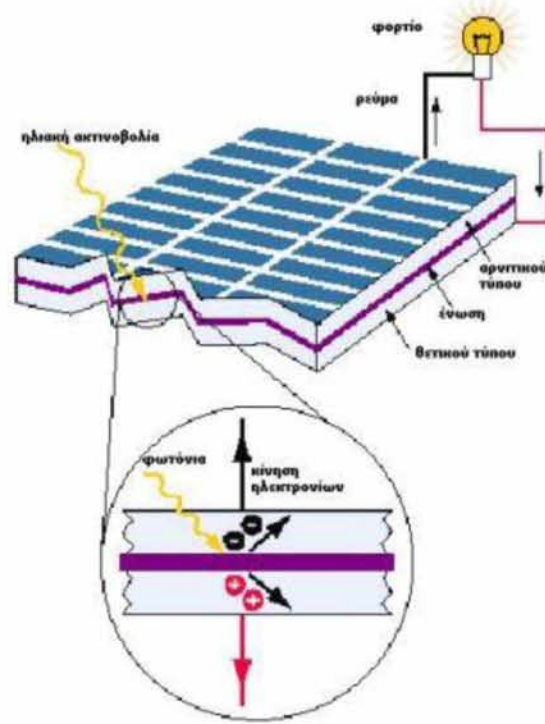
Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 έγινε τοποθέτηση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στον δορυφόρο Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε με επιτυχία για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. Από εκεί και ύστερα, σημειώθηκε συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας τους. Το 1962 η μεγαλύτερη Φ/Β εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp. Ωστόσο, το υψηλό κόστος παραγωγής τους δρούσε ανασταλτικά στην ευρεία εφαρμογή τους. [15]

Με την πάροδο του χρόνου όμως, οι έρευνες προχωράνε και βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης. Η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μία ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Σήμερα ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13-19%, ο οποίος, σε σύγκριση με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμα αρκετά χαμηλός.

2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα Φ/Β στοιχεία μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στην ιδιότητα κάποιων στερεών υλικών να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, όταν εκτίθενται στον ήλιο. Τα στερεά αυτά υλικά είναι οι ημιαγωγοί. Τα φωτόνια του ηλιακού φωτός που απορροφούνται από τον

ημιαγωγό, διεγείρουν τα ηλεκτρόνια των ατόμων του ημιαγωγού. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Πιο αναλυτικά, το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία είναι σωματίδια ενεργειακά φορτισμένα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε κρυστάλλους πυριτίου, ένα φωτόνιο διεισδύει σε ένα άτομο πυριτίου και εκδιώκει ένα ηλεκτρόνιο από την τροχιά του, δημιουργώντας έτσι έναν κενό δεσμό, μια οπή, στην τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Το απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο (το οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο όπως κάθε ηλεκτρόνιο), αρχίζει να κινείται μέσα στους κρυστάλλους αναζητώντας μια ελεύθερη οπή, η οποία αποτελεί ένα θετικό φορτίο. Αλλά και η οπή κινείται αλλάζοντας θέσεις, αρχικά με ένα κοντινό ηλεκτρόνιο και στη συνέχεια, με άλλα, πιο απομακρυσμένα από την αρχική της θέση. Έτσι όμως το ηλεκτρόνιο και η οπή του θα ξαναενώνονταν σύντομα και η ενέργεια του φωτός θα χανόταν υπό μορφή θερμότητας. Γι' αυτό το λόγο, χρειάζεται το φράγμα δυναμικού. Κάθε ηλιακό κύτταρο περιέχει ένα φράγμα δυναμικού που διαχωρίζει τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, στέλνοντας περισσότερα ηλεκτρόνια στη μία πλευρά του κυττάρου και περισσότερες οπές στην άλλη, έτσι ώστε να υπάρχει μικρή πιθανότητα επανασύνδεσής τους. Ο χωρισμός αυτός των φορτίων δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στα δύο άκρα του κυττάρου, που είναι δυνατόν να δώσει ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Στη μία πλευρά λοιπόν του

κρυστάλλου αντικαθιστούμε μερικά άτομα πυριτίου με άτομα βορίου που έχουν 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα. Έτσι, όταν ενώνονται με τα άτομα πυριτίου δημιουργείται μια οπή και έχουμε έλλειμμα αρνητικού φορτίου. Στην άλλη πλευρά του κρυστάλλου αντικαθιστούμε άτομα πυριτίου με άτομα φωσφόρου που έχουν 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα. Αυτά όταν ενωθούν με τα άτομα πυριτίου, περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο και έχουμε εμφάνιση αρνητικού φορτίου. Άρα, η μία πλευρά φορτίζεται θετικά και η άλλη αρνητικά, δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. [17]

2.3 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η κύρια δομική μονάδα κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος. Φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα αποτελούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, των οποίων αντίστοιχα η σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα συνιστά τη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Οι ημιαγωγοί αποτελούν το υλικό κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων, με πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό (90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών) το πυρίτιο. Το πυρίτιο δε βλάπτει το περιβάλλον, μπορεί εύκολα να γίνει επεξεργασία του, υπάρχει σε αφθονία στη φύση και διατηρεί τις ηλεκτρικές του ιδιότητες σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (έως και 125°C). Ακόμα, η εκτεταμένη χρήση του αποδίδεται στο χαμηλό του κόστος και στο ότι πλαισιώνεται από προηγμένη τεχνολογία λόγω της χρήσης του στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων.

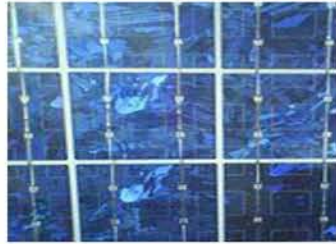
Φωτοβολταϊκά στοιχεία παχέων επιστρώσεων

- 1) Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, se-Si)



Το πάχος των κυττάρων αυτών είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοσή τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18% για το πλαίσιο, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα και βασικές τεχνολογίες παραγωγής τους είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone), που βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. [14, 15]

2) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multi Crystalline Silicon, mc-Si)



Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών γι'αυτό και η τιμή τους είναι λίγο χαμηλότερη.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για το πλαίσιο. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος κατευθυντικής στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC. [14, 15]

3) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία, που αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Χαρακτηριστικό είναι ότι μειώνεται η χρήση του πυριτίου έως και 50% συγκριτικά με την κατασκευή των δύο προηγούμενων τεχνολογιών που αναφέρθηκαν.

Το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 18%. [14, 15]

Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων (thin film)

1) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)



Η απόδοσή του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο), ενώ εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8%, που είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου CIGS η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Η δυσκολία είναι όμως ότι το ίνδιο δεν υπάρχει σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. [14, 15]

2) Λεπτά Φιλμ άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)



Thin-Film Solar Cell Module (Grotech)

Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση πυριτίου (πάχος περίπου 0,0001 χιλιοστά) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους (πάχος 1-3 χιλιοστά), όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Η διάταξη των ατόμων του πυριτίου είναι τυχαία και δεν υπάρχει κρυσταλλική συμμετρία σε μικροεπίπεδο.

Οι επιδόσεις για το πλαίσιο είναι από 6 έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή για την παραγωγή ίδιας ενέργειας χρειάζεται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. [14, 15]

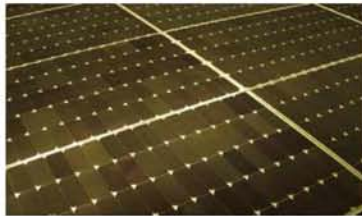
3) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)



Οι αποδόσεις πλαισίου είναι γύρω στο 6-8%, ενώ στο εργαστήριο η απόδοση έχει φθάσει στο 16%.

Εμπόδιο στην χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο, σύμφωνα με έρευνες, είναι καρκινογόνο, δημιουργώντας προβληματισμούς για την εκτεταμένη χρήση του, καθώς και η έλλειψη του Τελλουρίου. [14, 15]

4)Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)



Η απόδοσή του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων, είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Το Γάλλιο όμως είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό, ενώ το Αρσένιο έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και ενδείκνυνται για εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων και για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs. [14, 15]

Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2%, το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. [14, 15]

Άλλες τεχνολογίες

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι ραγδαία και οι τεχνολογίες που δείχνουν να ξεχωρίζουν και πιθανώς να χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα στο μέλλον είναι:

-Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)

-Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

2.4 Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες :

- Τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα
- Τα αυτόνομα συστήματα

Και τα δύο συστήματα αποτελούνται από επιμέρους μονάδες οι οποίες συνήθως είναι οι εξής :

Διασυνδεδεμένα συστήματα:

- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Πίνακας ελέγχου.
- Αντιστροφέας τάσης.
- Μετρητής Δ.Ε.Η.

Αυτόνομα συστήματα:

- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Πίνακας ελέγχου.
- Ρυθμιστής φόρτισης.
- Συσσωρευτής.
- Αντιστροφέας τάσης.

2.5 Διάκριση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων, το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο και το αυτόνομο.

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, καταναλώνεται επί τόπου ή αποθηκεύεται σε συσσωρευτές. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο.

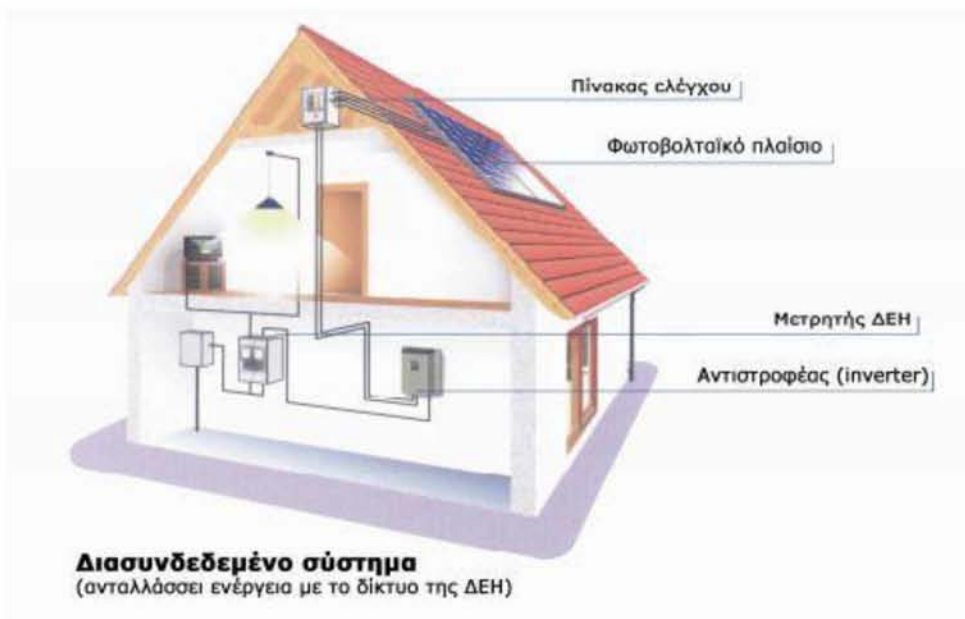
Αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, ενώ μπορεί να περιλαμβάνει και μια εφεδρική γεννήτρια για την κάλυψη της ζήτησης όταν έχουμε διακύμανση στη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα **υβριδικό** σύστημα όπου η εφεδρική γεννήτρια μπορεί να είναι μια πηγή συμβατικού καυσίμου ή μια ΑΠΕ (π.χ. ανεμογεννήτρια). Επίσης, περιλαμβάνει συσσωρευτές που αποθήκευουν την ηλεκτρική ενέργεια και τους αντιστροφείς DC/DC σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPPT) και DC/AC, που μετατρέπουν την τάση σε κατάλληλη μορφή για την τροφοδότηση των φορτίων. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα. [2, 4]



Εικόνα 2.2. Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

Πρόκειται για σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο τροφοδοτείται η ενέργεια. Το δίκτυο λειτουργεί όπως ένας συσσωρευτής για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Εφόσον, η ικανότητα αποθήκευσης του δικτύου πρακτικά δεν εξαντλείται, προκύπτει ότι τα διασυνδεδεμένα συστήματα δίνουν καλύτερες εγγυήσεις και αποδόσεις απ' ό,τι τα αυτόνομα. [2, 4] Στην εικόνα 2.3 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 2.3. Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β

Τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, που καθιστούν σαφή τη σημασία ενίσχυσης και ένταξής τους στην ηλεκτροπαραγωγική διαδικασία της χώρας μας. Όπως έχει προαναφερθεί, η ηλιακή ενέργεια είναι ήπια, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και επομένως, η χρήση των φωτοβολταϊκών δε βλάπτει το περιβάλλον. Ακόμα, λειτουργούν χωρίς θόρυβο, δίχως να προκαλούν προβλήματα στους κατοίκους των περιοχών που εγκαθίστανται, ενώ ταυτόχρονα, είναι αξιόπιστα και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, απαιτώντας μηδαμινή συντήρηση. Τα μικρά, διεσπαρμένα φωτοβολταϊκά που συμβάλουν στην εξομάλυνση της τοπικής ζήτησης, είναι αυτά που αναμένεται να εξαπλωθούν στην αγορά. Βέβαια, υπάρχει και η δυνατότητα να επεκταθούν ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Αυτό που είναι επίσης

σημαντικό, είναι ότι οι δυσπρόσιτες περιοχές μπορούν έτσι να καλύψουν τις ανάγκες τους, αποκτώντας ανεξαρτησία και ασφάλεια. [4, 19]

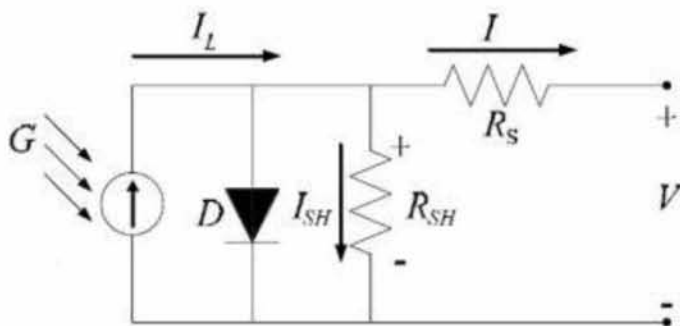
Ο παράγοντας που αναχαιτίζει ακόμα την εξέλιξή τους, είναι το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς. Βέβαια, μπορεί αυτό να είναι υψηλό, όμως το κόστος λειτουργίας τους είναι χαμηλό, κάνοντας απόσβεση, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που συμβαίνει το αντίστροφο. Παρόλα αυτά, αυτό το μειονέκτημα αντιμετωπίζεται με επιδοτούμενα προγράμματα από το κράτος και τα κίνητρα που δίνει στους επενδυτές, καλύπτοντας μέρος του κόστους αγοράς και εγκατάστασης και παρέχοντας εγγυήσεις για την παραγόμενη ηλιακή κιλοβατώρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Ανάλυση Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Συστήματος

3.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος (I_L) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο, την αντίσταση R_{SH} (Shunt resistance) απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου, που συνδέεται παράλληλα στα άκρα της διόδου και την αντίσταση R_S (Series resistance) απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που συνδέεται σε σειρά με την δίοδο. Το ρεύμα εξόδου είναι το I ενώ η τάση εξόδου είναι η V (σε αυτά θα αναφερόμαστε ως I_{PV} και V_{PV}). [2, 17]



Σχήμα 3.1. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.

Τυπικές τιμές της R_S , για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία είναι μεταξύ 0,1 Ω και 0,3 Ω . Για το R_{SH} , ισχύει στα περισσότερα φωτοβολταϊκά ότι $R_{SH} > 500 \Omega$. Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των $10^3 \Omega$.

Στο σκοτάδι (όταν δεν υπάρχει δηλαδή ηλιακή ακτινοβολία), το κύτταρο συμπεριφέρεται σαν δίοδος. Το φωτόρευμα δίνεται από την σχέση:

$$I_L = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Όπου I_0 το αντίστροφο ρεύμα κόρου, q το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin και A ένας

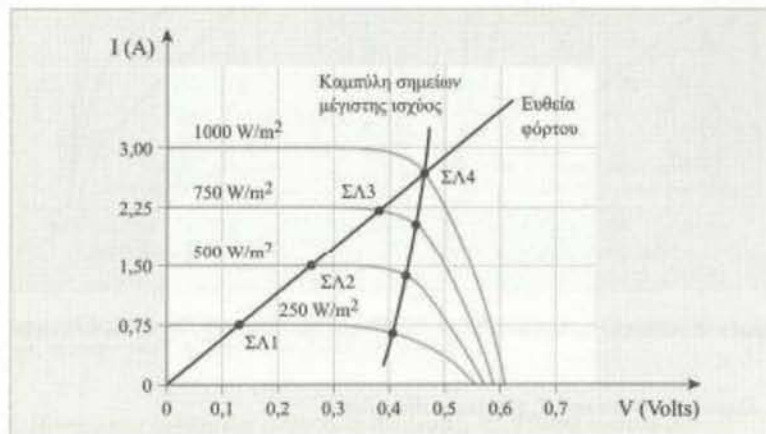
συντελεστής ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου (συνήθως παίρνει τιμές από 1 έως 2). Το ρεύμα I_{PV} , όταν συνδέσουμε φορτίο R_L υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_{PV} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V_L + I_{PV}R_L)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V_L + I_{PV}R_L}{R_{SH}}$$

Η εξίσωση αυτή δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_L , R_{SH} , R_s , A ποικίλουν ανάλογα με την θερμοκρασία. [17]

3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

Ο προσδιορισμός του σημείου μέγιστης ισχύος ενός φ/β στοιχείου έχει μεγάλη σημασία γιατί έτσι ελέγχουμε την αποδοτικότητά του. Το σημείο όμως αυτό δε συμπίπτει πάντα με το σημείο λειτουργίας του φ/β στοιχείου (που είναι και η επιδίωξή μας), οι θέσεις των οποίων μεταβάλλονται κάθε φορά που αλλάζει ένας παράγοντας που επιδρά στην απόδοση του φωτοβολταϊκού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, καθώς αλλάζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλάζουν και τα σημεία λειτουργίας και μέγιστης ισχύος. Μόνο για ένταση ακτινοβολίας $W = 1000 \text{ W/m}^2$ συμπίπτουν τα δύο σημεία, ενώ για μικρότερες τιμές της δεν έχουμε ταύτιση. Προκειμένου να γίνει αυτό, πρέπει κάθε φορά να αλλάζει η ωμική αντίσταση που συνδέουμε στο φωτοβολταϊκό, ώστε η ευθεία φόρτου να περνά από το σημείο μέγιστης ισχύος. [2]

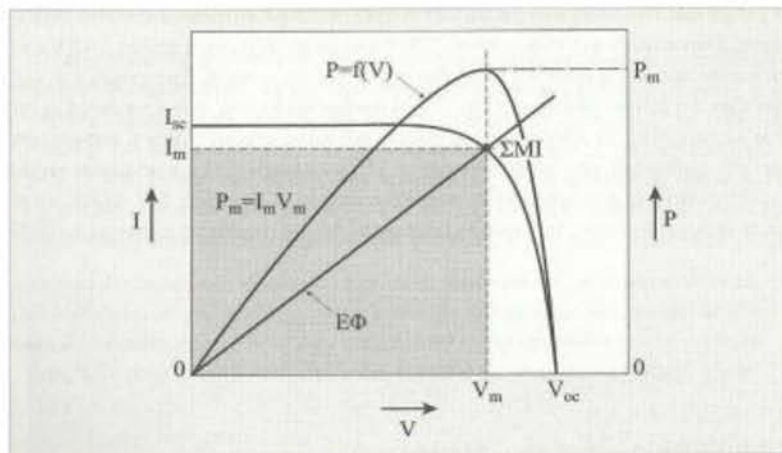


Σχήμα 3.2. Σημεία λειτουργίας και μέγιστης ισχύος φ/β στοιχείου για διαφορετικές τιμές της έντασης ακτινοβολίας.

Στο σχήμα 3.3, βλέπουμε τις καμπύλες I-V, P-V και την ευθεία φόρτου ΕΦ που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό αυτού του σημείου. Όπου, I_{sc} (Short Circuit Current) ή ρεύμα βραχυκύκλωσης, είναι η τιμή της έντασης του ρεύματος που δίνει το φωτοβολταϊκό κύτταρο όταν του βραχυκυκλώσουμε τα άκρα και V_{oc} (Open Circuit Voltage) ή τάση ανοιχτοκύκλωσης, είναι η τάση που έχουν τα άκρα του φωτοβολταϊκού όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένα. [17]

Μέγιστο παρουσιάζεται στο “γόνατο” της καμπύλης I-V, όπως φαίνεται. Εκεί οι τιμές ρεύματος-τάσης συμβολίζονται με I_m και V_m και η μέγιστη ισχύς ισούται με:

$$P_m = I_m \cdot V_m$$



Σχήμα 3.3. Ανεστραμμένη I-V Φ/Β στοιχείου, η ισχύς P ως συνάρτηση της τάσης V και η ευθεία φόρτου ΕΦ.

3.3 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Η έννοια της ισχύος αιχμής

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν σχετικά με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και με τη γνώση των οποίων ελέγχουμε την αποδοτικότητά του, είναι η απόδοση, η, ο παράγων πλήρωσης, FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} και η τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} , σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας του στοιχείου. Έτσι, καθορίστηκαν διεθνώς, οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός ΦΒ στοιχείου ή ΦΒ πλαισίου (*Standard Test Conditions, STC*). Αυτές είναι:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέσμης παράλληλων ακτίνων (Beam), πυκνότητας ισχύος $E_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5.
- Κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην όψη του ΦΒ στοιχείου.

- Θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου: $\theta_{STC} = 25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. [2]

Οι συνθήκες αυτές αφορούν εργαστηριακό περιβάλλον, όπου ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στους 25°C , χρησιμοποιείται τεχνητός φωτισμός που μιμείται το ηλιακό φως με AM 1,5, η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου διατηρείται εντός των ορίων και έχουμε κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επιφάνειά του.

Με βάση τις συνθήκες αυτές, ορίζεται η *ισχύς αιχμής*, P_p (Peak Power), ως χαρακτηριστικό του φ/β στοιχείου (προσδιορίζει το μέγεθος της φ/β συστοιχίας), με μονάδα της στο SI το W_p (Peak Watt).

Ισχύς αιχμής ενός φ/β στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου ($P_p = P_{m,STC}$).

3.4 Η ονομαστική ισχύς ενός Φ/Β πλαισίου. Συνθήκες κανονικής λειτουργίας

Η ισχύς αιχμής παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και την τελική επιλογή του.

Όμως, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ισχύς αιχμής ορίζεται για τις πρότυπες συνθήκες, που αφορούν εργαστηριακό περιβάλλον. Στην πραγματικότητα, η μέγιστη ισχύς που δίνει ένα φωτοβολταϊκό είναι συνήθως μικρότερη. Οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον που εγκαθίστανται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αλλάζουν συνεχώς, επομένως γίνεται κατανοητό ότι η ένταση της ακτινοβολίας δεν θα είναι πάντα 1 kW/m^2 και η θερμοκρασία του πλαισίου δεν θα διατηρείται στους 25°C .

Έτσι λοιπόν, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που αναγράφεται στο πλαίσιο είναι η θερμοκρασία που αποκτά σε συνθήκες, που προσομοιάζουν τις πραγματικές. Χαρακτηρίζεται ως *ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας ΦΒ κυψελίδας* (*Nominal Operating Cell Temperature, NOCT*) και προσδιορίζεται από τις συνθήκες που ακολουθούν:

- Το ΦΒ πλαίσιο βρίσκεται σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος
- Η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας: $G_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα $\theta_a = 20^{\circ}\text{C}$
- Μέση ταχύτητα ανέμου: 1 m/s [2]

Γενικά, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της, τόσο πιο πολύ μειώνεται η ισχύς που παρέχει το πλαίσιο. Γι' αυτό, δύο πλαίσια αν έχουν την ίδια ισχύ αιχμής, προτιμότερο είναι εκείνο που έχει μικρότερη θερμοκρασία NOCT.

3.5 Απόδοση Φ/Β κυττάρου

Η μέγιστη απόδοση ενός φ/β κυττάρου δίνεται από τον τύπο:

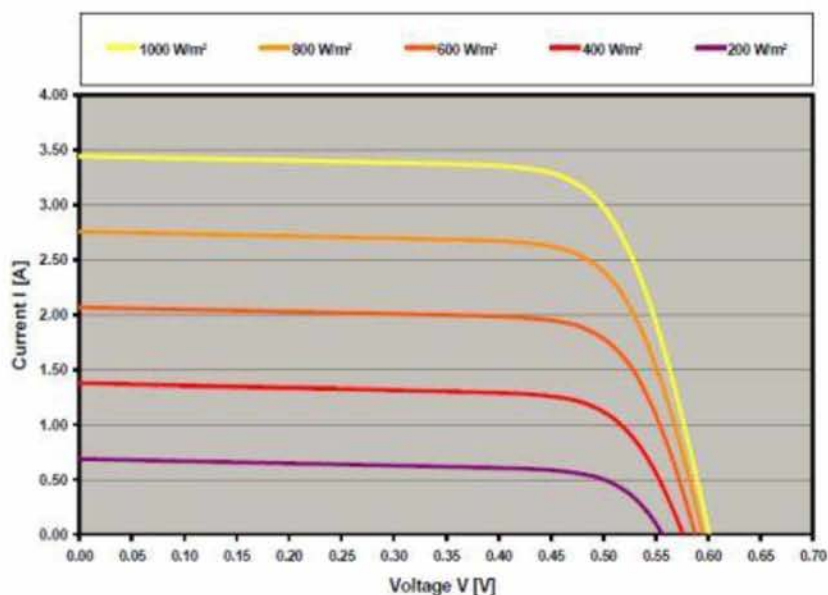
$$\eta = P_{MP} / P_{IN} = (V_{MP} \cdot I_{MP}) / (G \cdot A_c) = (FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}) / (G \cdot A_c)$$

Όπου G η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W / m^2), FF ο συντελεστής πλήρωσης με $FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$ και A_c η επιφάνεια του κυττάρου (m^2). [17]

Αρκετοί είναι όμως οι παράγοντες που την επηρεάζουν, με βασικότερους τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία.

Ακτινοβολία

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, οι μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας μεταβάλλουν την καμπύλη I-V του κυττάρου. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας βλέπουμε να αυξάνεται και η ένταση του ρεύματος σημαντικά, ενώ η τάση μεταβάλλεται ελάχιστα. Επομένως, επηρεάζεται και η απόδοση, αφού προκύπτει ότι ο παρονομαστής και το I_{sc} μεταβάλλονται γραμμικά και η V_{oc} λογαριθμικά. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς που παρέχει το φ/β κύτταρο. [16, 17]

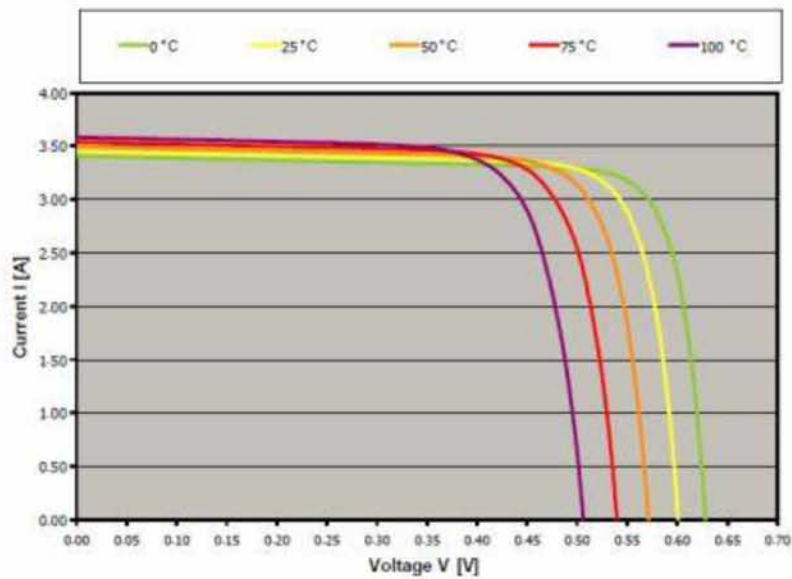


Σχήμα 3.4. Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V ενός ηλιακού κελιού

Θερμοκρασία

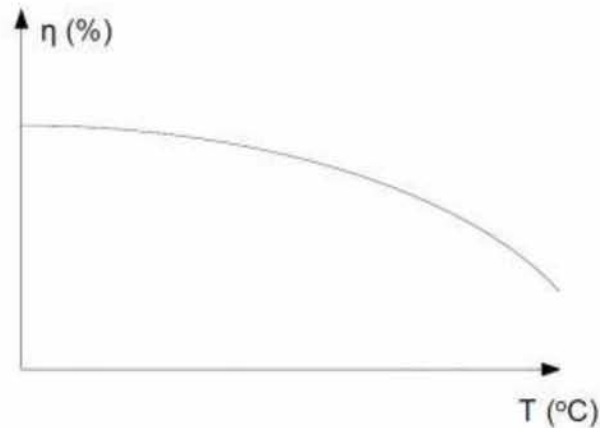
Όσον αφορά τη θερμοκρασία, στο σχήμα 3.5 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται ελάχιστα, ενώ η τάση μειώνεται αισθητά. Επομένως,

προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας δρα ανασταλτικά στην απόδοση του κυττάρου (σχήμα 3.6), αφού η παρεχόμενη ισχύς μειώνεται. [16, 17]



Σχήμα 3.5. Επίδραση της θερμοκρασίας στην I-V χαρακτηριστική ενός ηλιακού κελιού

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η απόδοση μειώνεται.



Σχήμα 3.6. Η τυπική μεταβολή της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Αρκετοί παράγοντες έχουν επίδραση στην απόδοση όπως η γήρανση, οι οπτικές απώλειες, η χωροταξική τοποθέτηση, η διόδος αντεπιστροφής, η σκίαση, ο άνεμος, η ρύπανση, οι ηλεκτρικές απώλειες κ.ά. [17]

3.6 Σκίαση

Όταν έχουμε σκίαση, έλλειψη δηλ. ηλιακού φωτός, το φ/β πλαίσιο υπολειτουργεί ή δε μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η σκίαση μπορεί να οφείλεται σε φυσικά εμπόδια ή φαινόμενα όπως η συννεφιά.

Το πρόβλημα που μπορεί να προκαλέσει είναι γνωστό ως κατάσταση «θερμής κηλίδας» (**hot spot**). Όταν έχουμε φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, η σκίαση του ενός επηρεάζει και καθορίζει τη λειτουργία όλου του φ/β πλαισίου. Το σκιασμένο κύτταρο συμπεριφέρεται ως καταναλωτής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα, επιβάλλει το δικό του ρεύμα (που είναι μικρότερο) αφού έχουμε σύνδεση σε σειρά και δέχεται την ανάστροφη τάση όλων των υπολοίπων. Αν αυτή η κατάσταση είναι παρατεταμένη και το πλήθος των κυττάρων μεγάλο, τελικά το σκιασμένο κύτταρο καταστρέφεται και κατ'επέκταση όλο το πλαίσιο. [2]

Η λύση που εφαρμόζεται είναι η τοποθέτηση διόδων παράκαμψης (bypass diodes). Οι δίοδοι αυτές συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των φ/β στοιχείων του πλαισίου ώστε να μπορεί να περνάει ρεύμα ακόμα και αν έχει καταστραφεί κάποιο κύτταρο. Η τοποθέτησή τους γίνεται στο κιβώτιο συνδέσεων, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του φ/β πλαισίου.

Επίσης, χρησιμοποιούνται δίοδοι αντεπιστροφής ή απομόνωσης (blocking or isolation diodes) σε κάθε κλάδο που σχηματίζουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, για να προστατεύονται από πιθανή εκφόρτιση του συσσωρευτή τη νύχτα και να εμποδίζεται η ροή ρευμάτων που υπαγορεύουν οι κλάδοι μεταξύ τους. Τοποθετούνται και αυτές στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου.

Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι χρειάζεται προσεκτική μελέτη για το που θα γίνει η εγκατάσταση ώστε να αποφεύγεται η σκίαση και θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φ/β κύτταρα ίδιας τεχνολογίας. [16]

3.7 Τρόποι Σύνδεσης

Υπάρχουν τρεις τρόποι σύνδεσης των φωτοβολταϊκών: σε σειρά, παράλληλα ή σε μεικτή συνδεσμολογία.

Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

Όταν συνδέουμε σε σειρά φωτοβολταϊκά στοιχεία, διαρρέονται όλα από το ίδιο ρεύμα (ίσο με το ρεύμα του ενός, $I_{tsc} = I_{sc}$ και $I_{tm} = I_m$), ενώ η τάση είναι το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους στοιχείων (για n στοιχεία, $V_{toc} = n \cdot V_{oc}$). Η μέγιστη ισχύς ισούται με τη μέγιστη ισχύ

του ενός επί τον αριθμό των στοιχείων και γενικά, έχουμε αύξηση της τάσης στους τελικούς ακροδέκτες. [3]

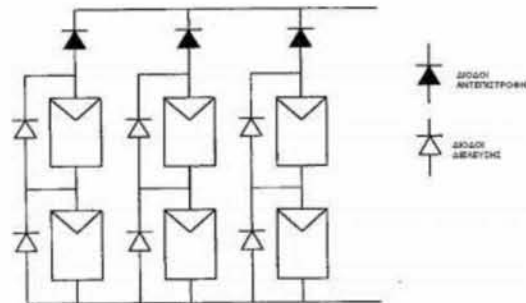
Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων παράλληλα

Όταν συνδέουμε παράλληλα φωτοβολταϊκά στοιχεία, έχουν όλα την ίδια τάση (ίση με την τάση του ενός, $V_{toc} = V_{oc}$), ενώ το ρεύμα είναι το άθροισμα των ρευμάτων των επιμέρους στοιχείων (για n στοιχεία, $I_{tsc} = n \cdot I_{sc}$ και $I_{tm} = n \cdot I_{tm}$). Η μέγιστη ισχύς ισούται με τη μέγιστη ισχύ του ενός επί τον αριθμό των στοιχείων και γενικά, αυξάνεται η ένταση του ρεύματος στους τελικούς ακροδέκτες. [3]

Η σύνδεση των ϕ/β στοιχείων σε σειρά ή παράλληλα συνιστά το ϕ/β πλαίσιο και αντίστοιχα, η σε σειρά/παράλληλη σύνδεση των πλαισίων αποτελεί την ϕ/β συστοιχία. Κατ'επέκταση, η σύνδεση συστοιχιών δίνει το ϕ/β πάρκο, το οποίο σε συνδυασμό με τις ηλεκτρονικές διατάξεις αποτελούν τον ϕ/β σταθμό.

Η σύνδεση σε σειρά όμοιων ϕ/β πλαισίων, δημιουργεί κλάδους σύνδεσης, οι οποίοι αν είναι ισοδύναμοι μπορούν να συνδεθούν παράλληλα.

Για την προστασία του συστήματος, τοποθετούνται διόδους αντεπιστροφής σε κάθε κλάδο και διόδους παράκαμψης σε κάθε πλαίσιο ενός κλάδου (σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7. Σύνδεση ισοδύναμων κλάδων παράλληλα με διόδους παράκαμψης (By pass) και διόδους αντεπιστροφής (Blocking).

3.8 Στήριξη

Υπάρχουν δύο τρόποι στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων:

1. Σταθερές βάσεις, που έχουν σταθερή κλίση ως προς την οριζόντιο.
2. Συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (trackers), με διατάξεις που παρακολουθούν την πορεία του ήλιου. [16]

Σταθερές βάσεις

Πρόκειται για βάσεις, όπου τα πλαίσια έχουν σταθερό προσανατολισμό, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα σε αυτά. Στη χώρα μας, η κλίση που χρησιμοποιείται και θεωρείται κατάλληλη είναι 30°.

Τα υλικά κατασκευής τους είναι αλουμίνιο ή ανοξείδωτος χάλυβας και αποτελούνται από συναρμολογούμενα μέρη. Η τοποθέτησή τους γίνεται με εδαφόμεληξη (χαμηλότερο κόστος) ή με σκυροδέτηση. Γενικά, απαιτείται μελέτη για την στατική επάρκειά τους, ώστε να επιλέγεται ο καταλληλότερος τρόπος, καθώς και για τις ανεμοπιέσεις. Χρειάζεται επίσης προσοχή όταν χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά για να αποφεύγεται η οξείδωση ή ηλεκτρόλυσή τους και να να μπορούν στηρίξουν πίνακες ή αντιστροφείς, αλλά και να αναχωρούν τα καλώδια. Η τοποθέτηση των πλαισίων μπορεί να γίνει σε μονή/διπλή/τριπλή/τετραπλή σειρά και είτε κατά τη μικρή διάσταση είτε τη μεγάλη. [16]

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει ενδεικτικά κάποιες σταθερές βάσεις.



Εικόνα 3.1. Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε δοκάρι από μπετόν

Συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου

Τα συστήματα αυτά είναι πολυπλοκότερα, έχουν όμως μεγαλύτερες αποδόσεις, εφόσον ανιχνεύουν την πορεία του ήλιου και έχουμε συνεχώς κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φ/β πλαίσια.

Διακρίνονται σε:

1. Συστήματα μονού άξονα (single axis): τα πλαίσια κινούνται σε έναν άξονα, αυτόν της Ανατολής-Δύσης.
2. Συστήματα διπλού άξονα (dual axis): είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πλαισίων ως προς την οριζόντιο. [16]

Αυτά τα συστήματα κινούνται με ηλεκτρομηχανικά ή ηλεκτροϋδραυλικά μέσα. Η πορεία του ήλιου ανιχνεύεται είτε με ηλιακούς αισθητήρες είτε με λογισμικό που υπολογίζει τη θέση του ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Τοποθετούνται με σκυροδέτηση, έχουν μεγάλο ύψος, που ανεβάζει το κόστος και καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση ώστε να αποφεύγεται η σκίαση. Ακόμα, για την αποφυγή φθορών από ανεμοπιέσεις χρησιμοποιείται η τεχνική της οριζοντίωσης, όπου τοποθετούνται τα πλαίσια παράλληλα με το έδαφος.

Αυτά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για αυτά τα συστήματα, είναι ότι χρειάζονται συντήρηση και λόγω ύψους θα χρειαστεί οικοδομική άδεια (επιπλέον κόστος-χρόνος), ενώ θα είναι πιο δύσκολες και οι διάφορες εργασίες (π.χ. καθαρισμός). [16]

Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά μια διάταξη ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου.



Εικόνα 3.2. Διάταξη ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου.

3.9 Συσσωρευτές

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι απαραίτητο, για τις μέρες με συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, προκειμένου να καλύπτεται η ζήτηση.

Οι συσσωρευτές πρέπει να τοποθετούνται σε σειρά σε ειδικό, άνετο χώρο, που να αερίζεται, ώστε να παρακολουθούνται και να συντηρούνται με ευκολία. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στις συνδέσεις των ακροδεκτών στους πόλους των συσσωρευτών, οι οποίες θα πρέπει να γίνονται με ειδικά περιλαίμια και κοχλίες και να τοποθετείται στη συνέχεια αντισκοριακό υλικό. [3]

Τύποι συσσωρευτών:

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές είναι οι συσσωρευτές μολύβδου ($Pb-H_2SO_4$) (μικρό σχετικά κόστος), ενώ υπάρχουν και άλλοι όπως: ο νικελίου-καδμίου (Nicc), Νατρίου-θείου, Ψευδαργύρου-βρωμίου, Ψευδαργύρου-χλωρίου κ.λ.π. [3]

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή:

Χαρακτηρίζονται από την ονομαστική τάση στους πόλους τους, που εκφράζεται με την έννοια της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ) και την ονομαστική χωρητικότητά τους, C. Η ΗΕΔ μετρείται σε Volt και ισούται με την πολική τάση του συσσωρευτή, όταν δεν είναι συνδεδεμένος σε καταναλωτή. Η χωρητικότητα αφορά στο ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευθεί στο εσωτερικό του, με τη μορφή χημικής ενέργειας και εκφράζεται σε Ah (Αμπερώριο-α). [2]

Αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, συνήθως, με τη μορφή επίπεδων πλακών, που βυθίζονται σε ορισμένο διάλυμα ηλεκτρολύτη, ο οποίος αντιδρά επιφανειακά με τις πλάκες. Όταν συνδέσουμε μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως στα άκρα του, δημιουργείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο κινεί ευκίνητα ιόντα του ηλεκτρολύτη, προς τις αντίθετα πολωμένες πλάκες του συσσωρευτή (+ και -), όπου αποδίδουν το φορτίο τους. Οι χημικές αντιδράσεις αλλοιώνουν τη δομή των ηλεκτροδίων. Τα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια εμφανίζουν διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά ως προς το διάλυμα και η διαφορά αυτή ισούται με την ΗΕΔ του συσσωρευτή. [2]

Κάθε συσσωρευτής έχει ΗΕΔ 1V-4V, γι' αυτό συνήθως συνδέονται σε σειρά περισσότεροι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ΗΕΔ. Ο συσσωρευτής μολύβδου έχει ονομαστική τάση 2,25V και στο εμπόριο έχει 6V (τρία στοιχεία) και συνηθέστερα, 12V (έξι στοιχεία) και 24V (δώδεκα στοιχεία). [2, 3]

3.10 Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή

Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή χρησιμοποιείται για να τον προστατεύει από υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση. Η τοποθέτησή του γίνεται συνήθως σε χωριστή μονάδα, μπορεί όμως να ενσωματώνεται με τον inverter, σε μια ολοκληρωμένη μονάδα. Περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές (microcontrollers), που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (relays), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος (transistors bipolar, MOSFET, thyristors, triacs κ.λ.π.). [2]

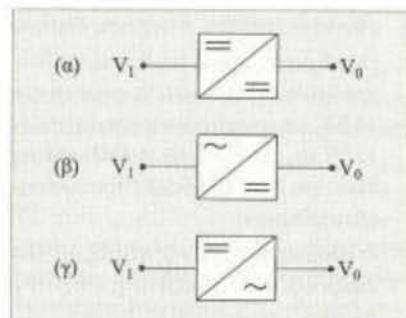
Συγκεκριμένα, όταν ο συσσωρευτής φτάσει στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης (υπερφόρτιση), ο ελεγκτής τον απομονώνει από το σύστημα παραγωγής ώστε να μη συμβεί ηλεκτρόλυση. Αντίστοιχα, τον απομονώνει από το σύστημα κατανάλωσης όταν έχουμε υπερεκφόρτιση, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του.

3.11 Μετατροπείς (converters)

Είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, μετατροπής

- συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (DC-DC converter), οποιασδήποτε τάσης
- συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC converter), οποιοδήποτε πλάτους και
- εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC converter) [2]

Οι συμβολικές ηλεκτρολογικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων είναι:



Σχήμα 3.8. Συμβολικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων (α) συνεχούς τάσεως σε συνεχή, (β) εναλλασσόμενης σε συνεχή, (γ) συνεχούς σε εναλλασσόμενη.

Μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή (DC-DC converter)

Ο μετατροπέας DC-DC μετατρέπει συνεχή τάση σε συνεχή, μεγαλύτερης ή μικρότερης τιμής, ανάλογα με τις ανάγκες, με σκοπό την ελάττωση των απωλειών κατά τη μεταφορά ενέργειας. Έτσι και στα φ/β πλαίσια η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, θέλουμε να γίνεται με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες, το οποίο απαιτεί να μεταφέρεται σε υψηλή τάση. Όσον αφορά τους συσσωρευτές, η τάση του πλαισίου προσαρμόζεται στην τάση του συσσωρευτή, ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτισή του. [2, 3]

Συνήθως περιλαμβάνει και έναν μικροελεγκτή, ο οποίος ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος και επιβάλλει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού σε αυτό. Η διάταξη αυτή ονομάζεται διάταξη “Παρακολούθησης Σημείου Μέγιστης Ισχύος, ΠΣΜΙ (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ”.

Μετατροπέας DC-AC (inverter)

Με την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος στις οικιακές χρήσεις και τη βιομηχανία, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός μετατροπέα DC-AC, ο οποίος μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ. Bipolar transistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κ.λ.π.).

Ενώ έχει πολύ καλή απόδοση, το μειονέκτημά του είναι ότι παράγει μεγάλο αριθμό αρμονικών υψηλής συχνότητας, οι οποίες δημιουργούν προβλήματα κατά τη σύνδεση με το δίκτυο και είναι απαραίτητη η τοποθέτηση φίλτρων για την αντιμετώπισή τους. [2, 3]

3.12 Υποσταθμοί Μέσης τάσης

Όταν συνδέονται φ/β σταθμοί άνω των 100kWp απευθείας στο δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) 20kV της ΔΕΗ., χρειάζεται η εγκατάσταση υποσταθμών μέσης τάσης. Αυτοί αποτελούνται από:

- Το τμήμα του ηλεκτρικού πίνακα μέσης τάσης.
- Τον ή τους μετασχηματιστές ισχύος.
- Το γενικό πίνακα χαμηλής τάσης. [16]

Κατά τη μελέτη ενός υποσταθμού θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για τον προσδιορισμό:

- Μεγέθους και πλήθους των μετασχηματιστών ισχύος.
- Μεγέθους και είδους του καλωδίου μέσης τάσης.
- Μεγέθους και είδους των ζυγών στη μέση και χαμηλή τάση.
- Μεγέθους και είδους των μέσων προστασίας στη μέση και χαμηλή τάση. [16]

3.13 Υπολογισμός μέσων προστασίας στη μέση και χαμηλή τάση

Τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων είναι οι ασφάλειες και οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος. Οι ασφάλειες διακόπτουν κυρίως ρεύματα βραχυκύκλωσης (πολλαπλάσια του ονομαστικού), ενώ οι διακόπτες εκτός από αυτά διακόπτουν και υπερφορτίσεις (ρεύμα λίγο πάνω από το ονομαστικό). Τόσο οι ασφάλειες όσο και οι διακόπτες χαρακτηρίζονται από την ονομαστική τους τιμή και το χρόνο διακοπής του σφάλματος. Ακόμα, οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος μπορούν να ρυθμίζουν τις χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας τους, που βοηθάει στο να συντονίζεται και να ρυθμίζεται η λεγόμενη επιλογική προστασία. Το πιο μέσο θα επιλεγεί τελικά εξαρτάται και από την παροχή της ΔΕΗ.

Όσον αφορά τους μετασχηματιστές, για την προστασία τους υπάρχουν τα εξής:

- Η επιτήρηση της θερμοκρασίας, με ειδικές αντιστάσεις και διακοπή παροχής όταν ξεπερνιούνται συγκεκριμένα όρια.
 - Ο ηλεκτρονόμος Buchholz, σε μετασχηματιστές ισχύος άνω των 800 kVA λόγω κόστους.
 - Η διαφορική προστασία, ανίχνευση μονοφασικών, διφασικών, τριφασικών σφαλμάτων μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και μεταξύ των σπειρών του τυλίγματος.
- [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Προβλήματα που προκύπτουν κατά τη σύνδεση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο

4.1 Βυθίσεις Τάσης

Είναι μια ξαφνική μείωση της τάσης σε ένα σημείο στο ηλεκτρικό σύστημα που ακολουθείται από μια αποκατάσταση τάσης μετά από μια μικρή χρονική περίοδο, που διαρκεί από μερικούς κύκλους ως μερικά δευτερόλεπτα (Ορισμός κατά IEC).

Οι βυθίσεις τάσης προκαλούνται από ξαφνικές και μεγάλες αυξήσεις της ροής ρεύματος μέσω των σύνθετων αντιστάσεων των συστημάτων. Αυτή η ξαφνική αλλαγή οφείλεται είτε σε βραχυκυκλώματα είτε στη σύνδεση-αποσύνδεση μεγάλων φορτίων. Χαρακτηρίζονται από το πλάτος τους και τη διάρκεια. Η πλειοψηφία των βυθίσεων τάσης έχει ένα πλάτος περίπου 80% και διάρκεια 4 έως 10 κύκλους.

Οι βυθίσεις τάσης και οι σύντομες διακοπές διαταράσσουν σοβαρά την ποιότητα ισχύος, επιδρώντας στη λειτουργία του εξοπλισμού, η ευαισθησία του οποίου καθορίζεται από τα επιτρεπτά όρια τάσεως του δικτύου, τα οποία καθορίζουν την περιοχή (πλάτος - διάρκεια) στην οποία ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει.

Για τις φ/β γεννήτριες, πέρα από τα εσωτερικά προβλήματα που μπορούν να δημιουργήσουν όπως αστάθεια, υπερένταση, έχουν επίδραση και στο δίκτυο. Αν στο δίκτυο είναι συνδεδεμένος μεγάλος αριθμός φωτοβολταϊκών συστημάτων και ξαφνικά αποσυνδεθεί, για να προστατευτεί από μια βύθιση τάσης, έχουμε απώλεια μεγάλου μέρους της παραγωγής και προκύπτουν θέματα αστάθειας του δικτύου. Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας όταν έχουν αποσυνδεθεί τα φωτοβολταϊκά μπορεί να καλυφθεί με εφεδρικές γεννήτριες συμβατικού καυσίμου, διατηρώντας την ευστάθεια του δικτύου, όμως το κόστος είναι μεγάλο.

Η λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, συμβάλλοντας στην ευστάθεια του δικτύου και παρέχοντας ασφάλεια είναι οι αντιστροφείς φωτοβολταϊκής ισχύος. Οι οποίοι είτε συνεχίζουν κανονικά τη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια του σφάλματος, είτε αποσυνδέονται για μικρό χρονικό διάστημα και έπειτα συνεχίζουν τη λειτουργία τους.

Αυτό που πρέπει να εξεταστεί μελλοντικά είναι η έλλειψη τυποποιήσεων ρεύματος αντιστροφέν στη περίπτωση προστασίας μέσω αποσύζευξης ενάντια στις βυθίσεις τάσης. Αυτό μπορεί να γίνει με:

- στιγμιαία μέτρηση της RMS τάσης που οδηγεί σε άμεσο σήμα ενεργοποίησης μετά τη βύθιση τάσης και επομένως, αποσύνδεση του αντιστροφέα,

- μέτρηση της RMS τάσης που οδηγεί σε ένα σήμα ενεργοποίησης, το οποίο αποστέλλεται μόνο όταν η RMS τάση παραμένει κάτω από ένα κατώφλι. Αυτό σημαίνει ότι ο αντιστροφέας μπορεί να ανεχτεί βυθίσεις τάσης μέχρι αυτό το όριο. [18]

4.2 Ανυψώσεις (Swell) Τάσης

Η ανύψωση τάσης είναι μια προσωρινή αύξηση της τάσης σε ένα σημείο στο ηλεκτρικό σύστημα επάνω από ένα κατώτατο όριο. Όπως οι βυθίσεις τάσης, χαρακτηρίζονται και αυτές συνήθως από το πλάτος και τη διάρκειά τους και προκαλούνται λόγω βραχυκυκλωμάτων και διακοπτικής λειτουργίας μεγάλων φορτίων. Δε συμβαίνουν τόσο συχνά όσο οι βυθίσεις, κυρίως για γειωμένα συστήματα. Το πόσο θα ανυψωθεί η τάση όταν συμβαίνει κάποιο σφάλμα εξαρτάται από τη θέση του σφάλματος, τη σύνθετη αντίσταση των συστημάτων και τη γείωση. [18]

Και εδώ πάλι, απαιτούνται νέες τυποποιήσεις ρεύματος για τους αντιστροφέες ώστε να επιτευχθεί προστασία απόζευξης ενάντια στις ανυψώσεις τάσης.

4.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις

Τα βραχυκυκλώματα σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταπονούν σημαντικά τον εξοπλισμό των τελευταίων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται για την καταστολή τους ασφάλειες και διακόπτες. Στον κλάδο που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα, αρχικά παρατηρείται μια έντονη βύθιση τάσης (κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος) και στη συνέχεια, μια σύντομη υπέρταση εξαιτίας των μέσων προστασίας που ενεργοποιήθηκαν.

Αυτές οι αυξομειώσεις της τάσης ταλαιπωρούν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και κατά συνέπεια τους αντιστροφέες. Κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων η γρήγορη πτώση τάσης προκαλεί υπερεντάσεις, όταν απουσιάζει περιορισμός ρεύματος στον αντιστροφέα. Αμέσως μετά, με την διακοπή των σφαλμάτων, αλλάζει πάλι ξαφνικά η τάση και η ενέργεια εκφορτίζεται και αποθηκεύεται στους πυκνωτές, γεγονός που επηρεάζει και καταπονεί τον αντιστροφέα.

Για την προστασία των αντιστροφέων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάποιοι παράγοντες. Αρχικά, δεν θα πρέπει να συνεισφέρουν και οι ίδιοι στις υπερεντάσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια σφάλματος ή αποκατάστασής του. Το ρεύμα της γέφυρας εξόδου του αντιστροφέα πρέπει να ελέγχεται γιατί επηρεάζει το πως θα συμπεριφερθεί αυτή κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων. Έπειτα, απαιτείται συνεργασία μεταξύ της τάσης ανοχής του και της τάσης περιορισμού των μέσων προστασίας που εφαρμόζονται. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται για να εξασφαλιστεί ότι η προστασία υπέρτασης δουλεύει σε όλες τις καταστάσεις

λειτουργίας. Όσον αφορά οικιακές χρήσεις, δεν απαιτείται ιδιαίτερη προστασία, εκτός αν λειτουργούν σε έντονες καιρικές συνθήκες. Τέλος, συγκεκριμένες τυποποιήσεις για τους φωτοβολταϊκούς αντιστροφείς πρέπει να περιλάβουν τη δοκιμή κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες βραχυκυκλώματος στην AC πλευρά. [18]

4.4 Σφάλματα προς Γη

Στα φ/β συστήματα χρησιμοποιούνται επιπλέον η γείωση λειτουργίας και προστασίας για την παροχή ασφάλειας από βραχυκυκλώματα ή άλλα επικίνδυνα φαινόμενα. Οι γειώσεις λειτουργίας παρέχουν αγώγιμους δρόμους προς γη, χρησιμοποιώντας αγωγούς ρεύματος, ενώ οι γειώσεις προστασίας παρέχουν αγώγιμους δρόμους προς γη για τα μεταλλικά μέρη που μπορεί να διαρρέονται ακούσια από ρεύμα και προστατεύουν έτσι τους χρήστες.

Εξαιτίας των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φ/β συστημάτων και των συνθηκών στις οποίες λειτουργούν (έκθεση στο ύπαιθρο και σε σφάλματα του δικτύου διανομής ή των ίδιων), είναι πιθανό να προκύψουν τα σφάλματα μόνωσης που ακολουθούν:

- Αστοχίες μόνωσης μεταξύ των αγωγών μεταφοράς ρεύματος αντίθετης πολικότητας, που προκαλούν σφάλματα γραμμής – γραμμής. Το ρεύμα που ρέει σε αυτά τα σφάλματα μπορεί να προέρχεται από φωτοβολταϊκά πλαίσια στο κύκλωμα σφάλματος, από πλαίσια που είναι παράλληλα συνδεδεμένα με το κύκλωμα σφάλματος ή από εξωτερικές πηγές όπως είναι μπαταρίες ή αντιστροφείς. Οι δίοδοι αντεπιστροφής δεν πετυχαίνουν πάντα τη λειτουργία τους, επιτρέποντας στα φ/β να συνεισφέρουν στα ρεύματα σφαλμάτων προς γη.
- Αστοχίες μόνωσης μεταξύ των αγωγών μεταφοράς ρεύματος και του εδάφους, γνωστές ως σφάλματα προς γη. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να αναπτυχθούν μέσα στη συστοιχία του φωτοβολταϊκού συστήματος, σε κυκλώματα που έχουν ενωθεί ηλεκτρικά με τη συστοιχία ή σε διακόπτες και αντιστροφείς. Απαιτείται η χρήση ανιχνευτών σφαλμάτων προς γη για να αντιληφθούν αυτά τα σφάλματα, τόσο σε γειωμένα όσο και αγείωτα φ/β συστήματα. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στα αγείωτα συστήματα πρέπει να είναι πιο ευαίσθητοι για να προστατεύσουν το προσωπικό, από ό,τι αυτοί που χρησιμοποιούνται στα γειωμένα. [18]

Τα ρεύματα διαρροής παλιότερα έδιναν συχνά λανθασμένη εντύπωση ότι υπήρχε σφάλμα προς γη με αποτέλεσμα τα συστήματα να αποσυνδέονται άσκοπα για πολλές ώρες. Τα ρεύματα αυτά απαιτούν προσοχή καθώς είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο ή μπορεί να συνεισφέρουν στα σφάλματα προς γη, αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς.

Επιπλέον, η εξάπλωση των εγκατεστημένων σε κτήρια φωτοβολταϊκών συστημάτων, που χρησιμοποιούν κυκλώματα DC καλωδίωσης και αντιστροφείς, καθιστά αναγκαία την ανίχνευση σφαλμάτων προς γη και διατάξεις που θα αποσυνδέουν το φωτοβολταϊκό, με σκοπό την προστασία από πυρκαγιά και την ασφάλεια του προσωπικού. Η DC πλευρά απαιτεί ειδικά μέτρα που είναι υπό εξέταση. [18]

4.5 Συνεισφορά στην Ικανότητα Βραχυκυκλώματος

Γενικά, όταν συμβαίνουν βραχυκυκλώματα στην πλευρά του δικτύου διανομής, τα φωτοβολταϊκά συστήματα δε συνεισφέρουν ιδιαίτερα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στα φ/β διαθέτουν ηλεκτρονόμο που ελέγχει κάποιο κατώτατο όριο τάσης και έχουν περιορισμό υπερέντασης σε περίπτωση σφάλματος στη πλευρά του δικτύου διανομής, κάνοντας τη συμβολή τους αμελητέα. Σε περίπτωση όμως που είναι μεγάλος ο αριθμός των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, μπορεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης να γίνει πολύ μεγάλο και να είναι αδύνατη η εκκαθάρισή του από τους αυτόματους διακόπτες.

Ένα ακόμη θέμα που μπορεί να προκύψει σε αυτή την περίπτωση είναι τα φ/β συστήματα να αδυνατούν να ανιχνεύσουν την ύπαρξη σφάλματος. Έτσι, συνεισφέρουν στο ρεύμα σφάλματος αυξάνοντάς το σημαντικά, δεν υπάρχει επιλογική προστασία και οι ασφάλειες δε λειτουργούν σωστά. Αυτό που παίζει κρίσιμο ρόλο για την προστασία του δικτύου είναι η επιλογική προστασία, μεταξύ της ασφάλειας και του χρόνου υπερέντασης του ηλεκτρονόμου, σε διαφορετικά επίπεδα ρεύματος σφάλματος. [18]

4.6 Το φαινόμενο της νησιδοποίησης

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης (islanding) αναφέρεται σε ένα τμήμα του δικτύου με φωτοβολταϊκά συστήματα που έχει αποκοπεί από το δίκτυο της ΔΕΗ. Έτσι, ο φωτοβολταϊκός σταθμός λειτουργεί ως νησίδα παραγωγής ενέργειας και αν οι αντιστροφείς παραμένουν συνδεδεμένοι υπάρχει κίνδυνος για το ανυποψίαστο προσωπικό που πιθανόν εργάζεται στο σημείο σύνδεσης, καθώς και για τον ίδιο τον εξοπλισμό από σφάλματα κατά την αυτόματη ή χειροκίνητη επαναφορά του δικτύου.

Αντιμετωπίζεται από τον αντιστροφέα, ο οποίος πρέπει να αντιλαμβάνεται μέσω κατάλληλων μετρήσεων την ύπαρξή του φαινομένου. Τέτοιες είναι οι μετρήσεις τάσης, συχνότητας και σύνθετης αντίστασης. Αν ανιχνευθεί τότε ο αντιστροφέας αποσυνδέεται αυτόματα από το

δίκτυο και η επανασύνδεσή του πρέπει να γίνεται αφότου περάσουν τουλάχιστον 3 λεπτά για λόγους ασφάλειας.

Συνήθως για τον προσδιορισμό της κατάστασης νησιδοποίησης χρησιμοποιείται το πρότυπο VDE 0126-1-1, η συμμόρφωση προς το οποίο είναι υποχρεωτική, με τη ΔΕΗ να ζητά την προσκόμιση πιστοποιητικών από τις εταιρείες κατασκευής των αντιστροφών. Επίσης, συνιστά έναν από τους βασικότερους ελέγχους της ΔΕΗ κατά τη δοκιμή ηλεκτρίσης του σταθμού και την παραλαβή του. [16]

4.7 Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος στο Δίκτυο (Από τους Αντιστροφείς)

Η έγχυση DC ρεύματος στο δίκτυο είναι μια βασική προδιαγραφή των αντιστροφών, ενώ έχει σχέση και με την ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου. Επιδρά αρνητικά στην απόδοση των μετασχηματιστών, μειώνει το χρόνο ζωής τους και μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας τους προς τον κορεσμό, δημιουργώντας υψηλό ρεύμα πρωτεύοντος και κατ'επέκταση ενεργοποίηση του εξοπλισμού προστασίας. Ακόμα, παρατηρείται καταπόνηση των καλωδιώσεων.

Η έγχυση DC ρεύματος είναι σημαντική σε αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, όπου απαιτούνται προηγμένες τεχνικές για μέτρηση ρεύματος και ηλεκτρονικό έλεγχο. Οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (50Hz) πετυχαίνουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ της DC και της AC πλευράς και έτσι αποφεύγεται η έγχυση DC ρεύματος. Οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, είναι μια μέση περίπτωση όσον αφορά τον επηρεασμό των μέσων προστασίας που εφαρμόζονται. [16]

Για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών, η ΔΕΗ θέτει ως απαραίτητο όρο η έγχυση DC να είναι μικρότερη του 0,5% του ονομαστικού ρεύματος και ζητά την προσκόμιση πιστοποιητικών.

4.8 Αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και συντελεστής ισχύος

Η αρμονική παραμόρφωση του παραγόμενου ρεύματος και ο συντελεστής ισχύος συνδέονται άμεσα με την ποιότητα της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο. Ιδανικά, η ισχύς θα πρέπει να μεταφέρεται με συντελεστή ισχύος ίσο προς τη μονάδα, ώστε η άεργος ισχύς του σταθμού να είναι μηδενική, ενώ οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος θα πρέπει να είναι σχεδόν ημιτονοειδούς μορφής, ώστε να μην εγχέονται ανεπιθύμητες αρμονικές στο δίκτυο της ΔΕΗ. [16]

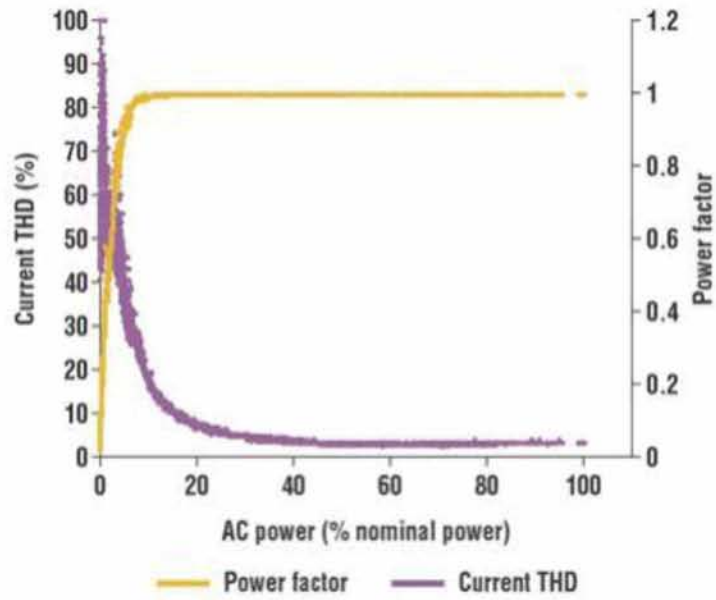
Ως μέτρο της ποιότητας του ρεύματος αναφορικά με τις αρμονικές του χρησιμοποιείται ο δείκτης της «ολικής αρμονικής παραμόρφωσης» THD (Total Harmonic Distortion) και ορίζεται ως:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Όπου I_h , $h=2,3,4,\dots$ είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης h (δηλαδή συχνότητας $50 \times h$) και I_1 , είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης 1, δηλαδή της θεμελιώδους των 50Hz.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι για μία αμιγώς ημιτονοειδή κυματομορφή ο συντελεστής THD είναι ίσος με το μηδέν ενώ όσο μεγαλύτερα είναι τα πλάτη των αρμονικών τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή.

Ο συντελεστής THD του ρεύματος που παράγεται από έναν αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων προσδιορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-3-2. Θεωρώντας το φάσμα αρμονικών έως την αρμονική τάξης 49, ο συντελεστής THD του ρεύματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5%. Λόγω της υψηλής συχνότητας μεταγωγής των διακοπών ηλεκτρονικών ισχύος (τεχνολογίας IGBT) που χρησιμοποιούνται στις γέφυρες του αντιστροφέα και της χρησιμοποίησης της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) οι κυριότερες αρμονικές εμφανίζονται σε πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής, σε τάξεις συνήθως μεγαλύτερες από την τάξη 50. Η AC ισχύς για την οποία πρέπει να ισχύει η προδιαγραφή της αρμονικής παραμόρφωσης δεν αναφέρεται και έτσι συνήθως νοείται η ονομαστική ισχύς. Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος αυξάνεται σημαντικά σε φορτία πολύ μικρότερα του ονομαστικού. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του THD και του συντελεστή ισχύος με το φορτίο του αντιστροφέα, όπου φαίνεται ότι ο συντελεστής THD είναι κάτω από 5% στο 50% του φορτίου και πάνω και ο συντελεστής ισχύος διατηρείται σχεδόν ίσος προς τη μονάδα ($>0,999$) για φορτία του αντιστροφέα από 20% και πάνω. [16]



Σχήμα 4.1. Μεταβολή του συντελεστή ισχύος και της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος με το φορτίου του αντιστροφέα.

Κεφάλαιο 5ο

Διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

5.1 Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα το αποκλειστικό δικαίωμα της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει εκχωρηθεί από το 1950 στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), που καλύπτει σήμερα τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου σχεδόν του πληθυσμού της χώρας. [1]

Το ηλεκτρικό σύστημα της Ελλάδας διακρίνεται στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα (Ε.Δ.Σ.) και στο Νησιωτικό Σύστημα που αποτελείται από τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα. Κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται από τους σταθμούς παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και από το σύστημα διανομής.

Οι μονάδες παραγωγής της ΔΕΗ είναι λιγνιτικές, υδροηλεκτρικές, πετρελαϊκές και φυσικού αερίου στην ηπειρωτική χώρα και σχεδόν εξ ολοκλήρου πετρελαϊκές στην Κρήτη, Ρόδο και τα υπόλοιπα νησιά. Τελευταία έχουν εισωρήσει και οι ΑΠΕ, κυρίως αιολική ενέργεια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά του Αιγαίου. Στη χώρα μας ο λιγνίτης είναι το σημαντικότερο ενεργειακό κοιτάσμα με μεγάλες ποσότητες στην Πτολεμαΐδα και τη Μεγαλόπολη, στον οποίο βασίστηκε ο εξηλεκτρισμός της χώρας μας. Σήμερα, οι 8 λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 44% της εγκατεστημένης ισχύος και παράγουν το 62% περίπου της ηλεκτρικής παραγωγής της ΔΕΗ. [1, 10]

Το δίκτυο μεταφοράς της ΔΕΗ λειτουργεί υπό τάσεις 400 kV, 150 kV και 66 kV. Τον κορμό του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από το ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στην περιοχή αυτή παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, όπου καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από τις γραμμές των 400 kV, το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς διαθέτει επίσης εναέριες και υπόγειες γραμμές των 150 kV και υποβρύχια καλώδια των 150 kV που συνδέουν τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 kV. [1] Την 31^η Δεκεμβρίου 2013 σε 331 Υποσταθμούς και ΚΥΤ του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς ήταν εγκατεστημένοι

732 Μετασηματιστές και Αυτομετασηματιστές με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 55.391 MVA και αποτελείται από 11.232 χλμ. γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα. [8]

ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (χλμ. όδευσης)

	400kV	Σ.Π. (D.C.) 400kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.647	107	8.152	39	10.945
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ	0,58		140	15	155
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	30		101		131
ΣΥΝΟΛΟ	2.677	107	8.393	54	11.232

Σχήμα 5.1. Γραμμές μεταφοράς

Το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς είναι συνδεδεμένο με τα γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα των Βαλκανικών χωρών και με το ηλεκτρικό σύστημα της Ιταλίας. Οι διασυνδέσεις με την Αλβανία και την ΠΓΔΜ πραγματοποιούνται μέσω δύο γραμμών, μιας των 400 kV και μιας δεύτερης γραμμής των 150 kV. Η γραμμή των 150 kV με την Αλβανία είναι προσωρινά ανενεργή, ενώ αναμένεται η γραμμή των 150 kV μεταξύ Ελλάδας και ΠΓΔΜ να αναβαθμιστεί στα 400 kV (ισχύς 1400 MVA). Η διασύνδεση με την Βουλγαρία αποτελείται από μία μοναδική γραμμή των 400 kV. Από το καλοκαίρι του 2002 βρίσκεται σε λειτουργία η διασύνδεση συνεχούς ρεύματος που συνδέει την Ελλάδα με την Ιταλία. Πρόκειται για μια διασύνδεση μήκους 270 km, 163 από τα οποία είναι υποβρύχια, 400 kV, ισχύος 500 MW. [1]

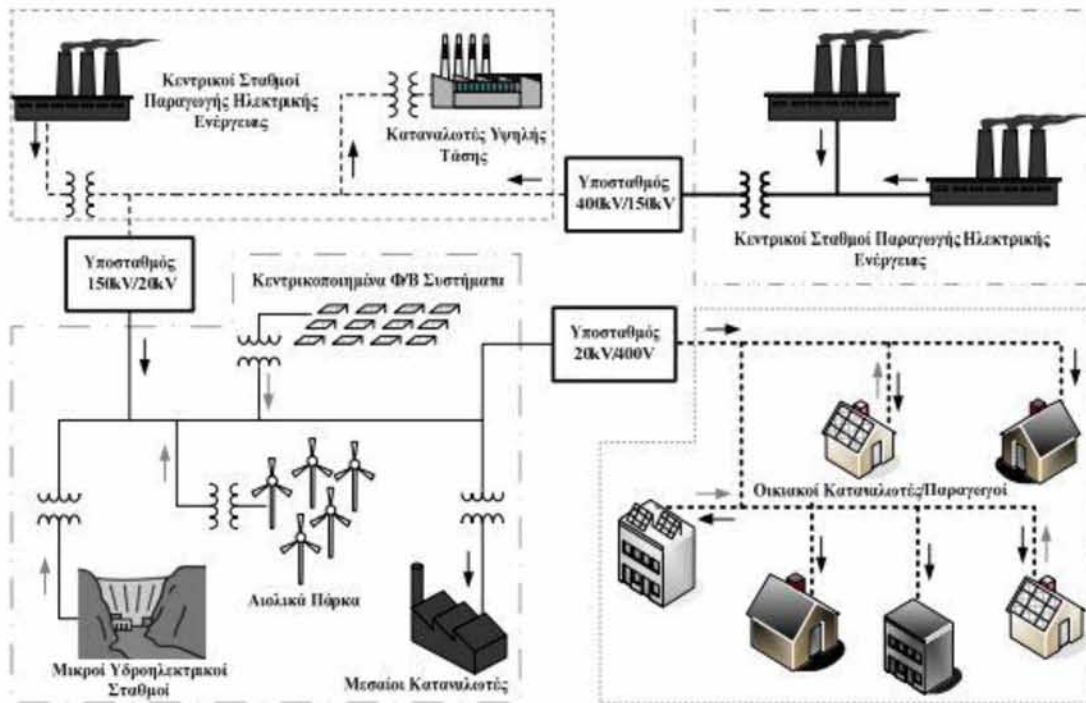
Για τη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στους καταναλωτές σε όλη την επικράτεια, τόσο στην περιοχή του διασυνδεδεμένου συστήματος, όσο και στο νησιωτικό χώρο, φροντίζει το δίκτυο διανομής, συνολικού μήκους περίπου 210.000 km, που περιλαμβάνει γραμμές Μέσης Τάσης (MT), κυρίως στα 20 kV και 15 kV και ένα μικρό αριθμό γραμμών στα 22 kV και 6,6 kV και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) στα 380/220 V.

5.2 Κεντριοποιημένη και Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β

Με τον όρο Κεντριοποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναφερόμαστε σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας (άνω των 50MW), που εγκαθίστανται μακριά από τις πόλεις και για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται στο δίκτυο μεταφοράς (400kV και 150kV). Ο όρος Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την άλλη, αναφέρεται σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς μικρότερων του 1MW που εγκαθίστανται κοντά στα φορτία που τροφοδοτούν και συνδέονται στη Μέση ή Χαμηλή Τάση. Οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί από 1 έως και 50MW μπορούν να συνδεθούν τόσο στην Υψηλή όσο και στη Μέση Τάση. [20]

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, οι φ/β μονάδες δεδομένου ότι έχουν συνήθως μικρή εγκατεστημένη ισχύ, μπορούν να θεωρηθούν Αποκεντρωμένη παραγωγή. Όμως στην περίπτωση μεγάλων φ/β πάρκων που εγκαθίστανται μακριά από πόλεις για να υπάρξει μεγαλύτερη έκταση και καλύτερη εκμετάλλευση, απαιτείται ενίσχυση ή κατασκευή νέων δικτύων για να συνδεθούν τα φ/β πάρκα σε αυτά. Γεγονός που σημαίνει ότι δε μπορούν να θεωρούνται αποκεντρωμένη παραγωγή, αλλά κεντριοποιημένη. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, αποκεντρωμένη θα ήταν αν η ισχύς καταναλώνοταν τοπικά και οι σταθμοί αυτοί αποκαλούνται συχνά και κατανεμημένοι ή ακόμα και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

Ενώ τα κεντριοποιημένα συστήματα μπορούν να συνεισφέρουν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, έχουμε απώλειες στις γραμμές μεταφοράς και καταπόνησή τους. Τα μικρά, διεσπαρμένα φωτοβολταϊκά είναι αυτά που μπορούν να βοηθήσουν στην κάλυψη της τοπικής ζήτησης, μειώνοντας τις απώλειες. Σ' αυτό το πλαίσιο, έχουν δημιουργηθεί και νεοεμφανιζόμενα ηλεκτρικά συστήματα, που ονομάζονται Μικροδίκτυα (Micro-Grids). Τα Μικροδίκτυα είναι συστήματα διανομής μέσης ή χαμηλής τάσης στα οποία συνδέονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, φορτία καθώς επίσης και διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας. Μπορούν να λειτουργούν τόσο σε συνδυασμό με πιθανόν προϋπάρχον δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης όσο και αυτόνομα. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες τρόποι ενίσχυσης ενός παραδοσιακά δομημένου ηλεκτρικού συστήματος, με τη διασύνδεση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας τόσο με κεντριοποιημένη όσο και με αποκεντρωμένη μορφή. [20]



Σχήμα 5.2. Τρόποι διασύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε ένα παραδοσιακά δομημένο ηλεκτρικό σύστημα.

Ιδιαίτερα στις πόλεις, όπου δεν είναι εύκολο να τοποθετηθούν άλλες μορφές ΑΠΕ, τα μικρά, διεσπαρμένα φ/β που μπορούν να εγκατασταθούν τόσο σε κατοικίες, όσο και σε εμπορικά ή δημοσία κτίρια (Διασυνδεδεμένα κτιριακά Φ/Β συστήματα, BIPV – Building Integrated Photovoltaics) είναι ιδανικά. Όπως αναφέρθηκε, σκοπός είναι η εξομάλυνση και όχι η κάλυψη όλης της ηλεκτρικής ζήτησης.

Στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η ηλεκτρική ζήτηση μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα φ/β μπορούν να συμβάλουν στην εξυπηρέτηση των φορτίων τοπικά, αφού τότε συμπίπτει και η αιχμή παραγωγής. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι τα διεσπαρμένα φ/β αναμένεται να εξαπλωθούν στο μέλλον, αφού βοηθούν στην καλύτερη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος με χαμηλό γενικά κόστος σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα.

5.3 Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν πολλές εταιρίες παραγωγής και διανομής της, οι οποίες ανταγωνίζονται και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας και χαμηλότερο κόστος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα σε κάθε καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να επιλέγει τον προμηθευτή του.

Στη χώρα μας πριν τη ψήφιση του νόμου 2773/99, η παραγωγή και η διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας ανήκε αποκλειστικά στη ΔΕΗ. Με το νόμο 2773/99 όμως, επιτρέπεται η παραγωγή ενέργειας και σε άλλους παραγωγούς με σκοπό την τόνωση της εθνικής οικονομίας και την επίτευξη υγιούς ανταγωνισμού που θα αποβεί σε όφελος των καταναλωτών. Η απελευθέρωση της αγοράς άρχισε τον Φεβρουάριο του 2001. Στο πλαίσιο αυτό συστάθηκαν δύο φορείς, η *Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας* (ΡΑΕ) και ο *Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας* (ΔΕΣΜΗΕ). [1]

Η ΡΑΕ είναι μια ανεξάρτητη αρχή που ελέγχει την ελληνική αγορά ενέργειας και παράλληλα έχει το ρόλο του συμβούλου στους αρμόδιους υπουργούς, καθώς τους ενημερώνει για θέματα ενέργειας. Επιπλέον, παρέχει την άδεια λειτουργίας σε παραγωγούς και προμηθευτές.

Ο ΔΕΣΜΗΕ ήταν μια εταιρία που είχε την ευθύνη για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή και γενικά, για την επάρκεια ισχύος στο σύστημα.

Με τον Ν.4001/2011 και σε συμμόρφωση με την οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συστάθηκαν οι εξής τρείς εταιρίες:

- Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) και να διασφαλίζει τον εφοδιασμό της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια.
- Ο Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΔΔΗΕ) και να φροντίζει για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του δικτύου διανομής.
- Ο Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ) που ασκεί τις δραστηριότητες που ασκούνταν από τον Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ), εκτός εκείνων που μεταφέρονται στον ΑΔΜΗΕ. [1]

5.4 Διαδικασίες αδειοδότησης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Με το νόμο 3468/2006 προκειμένου να δοθούν κίνητρα στους επενδυτές και να ενισχυθεί η ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά καταρτίσθηκε από τη ΡΑΕ και εγκρίθηκε από τον Υπουργό Ανάπτυξης, Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών. Το πρόγραμμα αυτό λήγει την 31-12-2020 και αφορά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών συνολικής ισχύος τουλάχιστον 500 MW_{peak} (για το διασυνδεδεμένο σύστημα) και συνολικής ισχύος τουλάχιστον 200 MW_{peak} (για το μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα). [3]

Τα βασικά σημεία για τη διαδικασία αδειοδότησης είναι:

1. Άδεια Παραγωγής ή Εξαίρεση ή Απαλλαγή

- Απαλλαγή για σταθμούς έως και 20 kWp
- Εξαίρεση για σταθμούς άνω των 20 kWp έως και 150 kWp (για κορεσμένα δίκτυα απαιτείται και για σταθμούς κάτω των 20 kWp)
- Άδεια Παραγωγής για σταθμούς άνω των 150 kWp

2. Όροι Σύνδεσης

- Στο Σύστημα (ΔΕΣΜΗΕ)
- Στο Διασυνδεδεμένο Δίκτυο (ΔΕΣΜΗΕ-ΔΕΗ)
- Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΔΕΗ)

3. Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (για σταθμούς άνω των 20 kWp και όλους τους σταθμούς εντός NATURA 2000)

4. Άδεια Εγκατάστασης (για σταθμούς άνω των 150 kWp)

5. Συμβάσεις Σύνδεσης και Αγοραπωλησίας

- Στο Σύστημα και στο Διασυνδεδεμένο Δίκτυο (ΔΕΣΜΗΕ)
- Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΔΕΗ)
- Άδεια Λειτουργίας (για σταθμούς άνω των 150 kWp) [3]



Σχήμα 5.3. Βασικά σημεία αδειοδότησης

Η ψήφιση του νόμου για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) **N. 3851/2010**, ΦΕΚ 85 Α, 4-6-2010, απλούστευσε τις διαδικασίες αδειοδότησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και είχε ως στόχο την καταπολέμηση της γραφειοκρατίας. Συγκεκριμένα, για τη χώρα μας τέθηκε ο στόχος να καλύψουν οι ΑΠΕ το 40% τουλάχιστον της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2020. Άδεια παραγωγής απαιτείται πλέον για φ/β συστήματα με ισχύ μεγαλύτερη από 1 MWp (τα μικρότερα απαλλάσσονται) και εκδίδεται από τη ΡΑΕ. Επιπλέον, δεν απαιτείται οικοδομική άδεια, αλλά μόνο έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας, ούτε άδεια περιβαλλοντικών επιπτώσεων για συστήματα που πληρούν κάποιες προδιαγραφές. Ακόμη, η ενέργεια που παράγεται με χρήση ΑΠΕ τιμολογείται ανάλογα τον ανανεώσιμο ενεργειακό πόρο. [3, 4, 5]

Από το 2010 ως και το 2012 υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μετά το 2012 όμως υπήρξε μια σειρά αρνητικών θεσμικών ρυθμίσεων για τα φωτοβολταϊκά. Συνέβη δραστική μείωση των ταριφών, αναστάλθηκε η αδειοδοτική διαδικασία νέων έργων λόγω της κάλυψης των στόχων που είχαν τεθεί για το 2020 και είχαμε επιβολή έκτακτης εισφοράς 25% - 42% σε λειτουργούντες φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Από το 2014 και έπειτα, εκδόθηκαν νέες υπουργικές αποφάσεις, ανοίγοντας μία καινούρια αγορά Φ/Β με την εφαρμογή συμψηφισμού παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (net-metering).

Η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών από αυτοπαραγωγούς θεσπίστηκε με την ΥΑ ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.24461 (ΦΕΚ Β' 3583/31.12.2014) η οποία καταργήθηκε και αντικαταστάθηκε από την Υπουργική Απόφαση ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.175067 (ΦΕΚ Β' 1547/5.5.2017) και αφορά στην εγκατάσταση σταθερών φωτοβολταϊκών σταθμών για την κάλυψη ιδίων αναγκών από καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, με εφαρμογή ενεργειακού συμψηφισμού. [7]

5.5 Net-metering

Net-metering ή Αυτοπαραγωγή με Ενεργειακό Συμψηφισμό είναι όταν παράγει κάποιος ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκού συστήματος για δική του κατανάλωση, χρησιμοποιώντας το δίκτυο για την αποθήκευση ενέργειας.

Επομένως, όταν παράγεται επιπλέον ενέργεια που δεν καταναλώνεται, αποθηκεύεται στο δίκτυο για μελλοντική χρήση, ενώ όταν υπάρχει έλλειψη απορροφάται από αυτό. Ο τελικός συμψηφισμός γίνεται κάθε τρία χρόνια και καλό είναι, το φωτοβολταϊκό σύστημα να σχεδιάζεται με βάση την ετήσια κατανάλωσή του.

Σκοπός είναι η εξοικονόμηση και η μείωση του λογαριασμού της ΔΕΗ, δεν αφορά εισόδημα αφού η ηλεκτρική ενέργεια δεν πωλείται στο δίκτυο, όπως στα φωτοβολταϊκά στη στέγη. Ακόμη, συγκριτικά με τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πιο αξιόπιστο αφού χρησιμοποιεί το δίκτυο για την αποθήκευση, χωρίς να χρειάζεται συσσωρευτές που ανεβάζουν το κόστος. [7, 11, 13]

Τρόπος λειτουργίας:

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα (παραγόμενη ενέργεια), τροφοδοτεί αρχικά τις καταναλώσεις της εγκατάστασης, που είναι σε λειτουργία τη δεδομένη στιγμή. Όπως προαναφέρθηκε, εάν η παραγόμενη ενέργεια περισσεύει, διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ (εγχεόμενη ενέργεια), ενώ όταν χρειάζεται επιπλέον ενέργεια, απορροφάται από το δίκτυο (απορροφώμενη ενέργεια).

Για την καταμέτρηση αυτών των ποσοτήτων ενέργειας υπάρχουν δύο μετρητές. Η εγχεόμενη και η απορροφώμενη μετρούνται με τη βοήθεια μετρητή διπλής κατεύθυνσης-καταμέτρησης, που εγκαθίσταται στη θέση του υφιστάμενου, με ευθύνη του ΔΕΔΔΗΕ. Η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό, με τη βοήθεια άλλου μετρητή, ο οποίος εγκαθίσταται με ευθύνη και δαπάνη του ιδιοκτήτη, συνήθως μαζί με το φωτοβολταϊκό (εικόνα 5.1). [13]



Εικόνα 5.1. Λειτουργία net-metering

Αν η απορροφώμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την εγγεόμενη, πληρώνεται η διαφορά, διαφορετικά η χρέωση είναι μηδενική. Η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό, καταμετράται επίσης, για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης στην εγκατάσταση, η οποία και επηρεάζει κάποιες από τις χρεώσεις (ΥΚΩ).

Τέλος, το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο καταναλώνεται απευθείας στην εγκατάσταση, είναι ο ταυτοχρονισμός παραγωγής-κατανάλωσης, που επηρεάζει σε κάποιο βαθμό το μέγεθος της εξοικονόμησης: Όσο μεγαλύτερος είναι ο ταυτοχρονισμός, τόσο μεγαλύτερη η εξοικονόμηση στον λογαριασμό του ΔΕΔΔΗΕ. [13]

5.6 Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται η ετήσια και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα από το 2007 έως και το 2016. Μέχρι το 2006, ουσιαστικά δεν υπήρχε καθόλου ανάπτυξη, παρά το πλούσιο ηλιακό δυναμικό. Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών υπήρχαν μόνο σε νησιά (Κύθνος, Αντικύθηρα κλπ) και ήταν της ΔΕΗ, καθώς και σε εγκαταστάσεις ιδιωτών σε δυσπρόσιτες περιοχές. Οι λόγοι ήταν η γραφειοκρατία που υπήρχε για την αδειοδότηση και την εγκατάσταση φ/β συστημάτων και το υψηλό κόστος αγοράς/εγκατάστασής τους, χωρίς να υπάρχει κάποια στήριξη από το κράτος. Με τον νόμο 3468/2006 όμως δημιουργήθηκαν κίνητρα για τους επενδυτές, υπήρξαν επιδοτήσεις και εκπονήθηκε πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών, προσελκύοντας πάρα πολλούς, με τις αιτήσεις για άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να ξεπερνούν τους στόχους. Αυτό οδήγησε στο να ανασταλεί η αδειοδοτική διαδικασία στα τέλη του 2007, όπου η εγκατεστημένη ισχύς ήταν ακόμα 2 MW (σχήμα 5.4). [19]

Στη συνέχεια (2008-2009) όμως και με το νόμο 3851/2010, που απλούστευσε τις διαδικασίες αδειοδότησης και καταπολέμησε τη γραφειοκρατία, η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε κατακόρυφα. Το 2011 εντεκαπλασιάστηκε η διείσδυσή τους στο ελληνικό ΣΗΕ, ξεκινώντας από 47MW στο τέλος του 2009, και καταλήγοντας στα 624 MW εγκατεστημένης ισχύος στο τέλος του 2011 (Σχήμα 5.4).

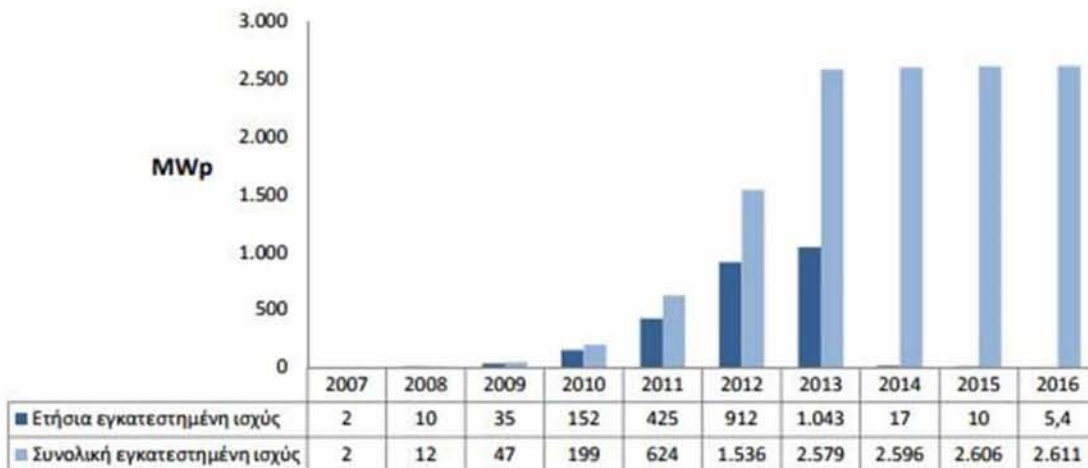
Το 2012 στη συνέχεια, εγκαταστάθηκαν 912 MW και στα τέλη της ίδιας χρονιάς είχαν ξεπεραστεί οι στόχοι που είχαν τεθεί για το 2014, ακόμα και για το 2020. Συνέπεια αυτού ήταν τα φωτοβολταϊκά να οδηγηθούν σε τέλμα, υπήρξε εκ νέου αναστολή αδειοδότησης, ενώ ζητήθηκε και επιβολή έκτακτης εισφοράς για να καλυφθεί το έλλειμμα του ΛΑΓΗΕ, οδηγώντας τους επενδυτές σε οικονομικό αδιέξοδο. Έτσι, υπήρξε στασιμότητα στην εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής από φωτοβολταϊκά. [19]

Το 2015 εγκαταστάθηκαν μόνο 10 MW φ/β ισχύος και το 2016 μόνο 5,4 MW (πίνακας 5.1), γυρνώντας στα επίπεδα του 2008 και 2007 αντίστοιχα, πριν αρχίσει ουσιαστικά η ανάπτυξη. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη νέου θεσμικού πλαισίου και στα capital controls που επηρέασαν το net-metering. Το 2016 τα μόνα συστήματα που εγκαταστάθηκαν αφορούσαν την αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό. Παρόλες τις αντιξοότητες, κατάφεραν να καλυφθούν οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β σε ποσοστό 7,05% κυρίως λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των προηγούμενων χρόνων και η Ελλάδα να βρίσκεται στην τρίτη θέση διεθνώς σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. [4]

Διασυνδεδεμένα Συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2016	5,42
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και το 2016	2.611

Πίνακας 5.1. Νέα και συνολική εγκατεστημένη ισχύς φ/β το 2016

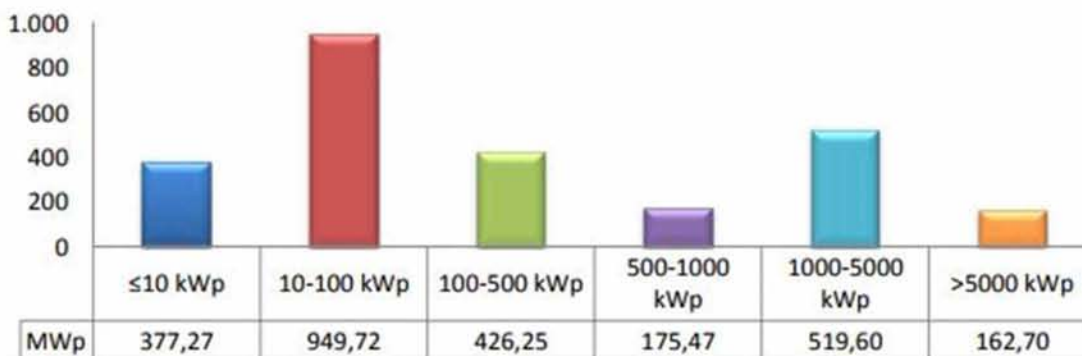
Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών



Σχήμα 5.4. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα 2007-2016

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η μεγαλύτερη ισχύς εγκαταστάθηκε στα συστήματα 10-100 kWp (949,72 MWp), ακολούθησαν τα συστήματα 1000-5000 kWp (519,60 MWp), 100-500kWp (426,25 MWp), ≤ 10 kWp (377,27 MWp), 500-1000 kWp (175,47 MWp) και τελευταία τα συστήματα >5000 kWp (162,70 MWp).

Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ανά κατηγορία



Σχήμα 5.5. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ανά κατηγορία

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, την περίοδο 2014-2016 υπήρξε κατακόρυφη πτώση των θέσεων εργασίας λόγω της αναστολής αδειοδότησης νέων έργων (η οποία ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2012 και ίσχυσε έως τον Απρίλιο του 2014) και της έλλειψης νέου θεσμικού πλαισίου. Η απασχόληση το 2013 βασίστηκε ουσιαστικά σε έργα που είχαν ωριμάσει αδειοδοτικά από παλιά και απλώς εκτελέστηκαν αυτή την περίοδο. Οι άμεσες θέσεις εργασίας την περίοδο 2014-2016 αφορούν κυρίως στη συντήρηση και λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών. [4]



Σχήμα 5.6. Φωτοβολταϊκά και θέσεις εργασίας

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για το 2016

Το 2016 στην Ελλάδα ήταν εγκατεστημένα 2.611 μεγαβάτ (MWp) φωτοβολταϊκών, εκ των οποίων τα 2.066 MWp επί εδάφους και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων.

1. Δέσμευση γης

Η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων των 2.066 MWp καλύπτει περίπου 12.400 στρέμματα, ενώ σε συνδυασμό με τα κενά μεταξύ τους και την περίμετρο ασφαλείας φτάνουν τα 40.000 στρέμματα.

Συγκριτικά, η έκταση που καταλαμβάνουν οι λιγνιτικοί σταθμοί και τα λιγνιτωρυχεία είναι, σύμφωνα με τη ΔΕΗ, 253.000 στρέμματα, είναι δηλαδή 6,3 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά. [4]

Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ, η γεωργική γη στην Ελλάδα ανέρχεται σε 36,8 εκατ. στρέμματα, εκ των οποίων καλλιεργούνται τα 31,7 εκατ. στρέμματα. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά δεσμεύουν το 0,1% της γεωργικής γης ή αλλιώς το 0,03% της έκτασης της χώρας. Η γεωργική έκταση που μένει ακαλλιέργητη είναι 125,5 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά.

2. Κατανάλωση νερού

Για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτούνται κατά μέσο όρο 0,114 m³ νερού ανά παραγόμενη MWh, σε αντίθεση με τους λιγνιτικούς σταθμούς που απαιτούν κατά μέσο όρο 3,296 m³ νερού ανά παραγόμενη MWh σύμφωνα με τη ΔΕΗ.

Το 2016 παρήχθησαν περίπου 3.929.716 MWh από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά, δηλαδή απαιτήθηκαν περίπου 448.000 m³ νερού για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών, όσο δηλαδή καταναλώνουν ετησίως 4.570 νοικοκυριά. [4]

3. Αποσόβηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

Η παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών το 2016 απέτρεψε την έκλυση περίπου 3,8 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

Συμπεράσματα-Conclusion

Η χώρα μας, λόγω του μεγάλου πλεονεκτήματος της μεγαλύτερης ηλιοφάνειας στην Ευρώπη διαθέτει ένα ανεξάντλητο δυναμικό ηλιακής ενέργειας. Το δυναμικό αυτό σε συνδυασμό με τα πολλαπλά και πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών θα μπορούσε, μετατρέπόμενο σε ηλεκτρική ενέργεια, να συνεισφέρει με πολλούς τρόπους, στην ουσιαστική οικονομική ανάπτυξη της χώρας μας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και ένα πεντακάθαρο περιβάλλον.

Τα φωτοβολταϊκά είναι μία από τις λίγες ενεργειακές τεχνολογίες όπου η Ελλάδα έχει τη δυνατότητα να έχει σημαντικό μερίδιο με εγχώρια παραγωγή. Ήδη, στην παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών, στην εμπορία, στην εγκατάσταση και τη συντήρηση φωτοβολταϊκών συστημάτων δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα πάνω από 200 εταιρείες με εκατοντάδες εργαζόμενους.

Επομένως, καταλαβαίνουμε ότι η κυβέρνηση και όλοι μαζί οφείλουμε ιδιαίτερα στη σημερινή κατάσταση που έχει φτάσει η οικονομία να προωθήσουμε την ευρύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στη χώρα μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2008
- [2] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2004
- [3] Β.Δ. Μπιτζιώνης, Δ.Β. Μπιτζιώνης, «Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2004
- [4] ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ, <http://helapco.gr/>
- [5] Σύνδεσμος Παραγωγών Ενέργειας με Φωτοβολταϊκά, <http://www.spf.gr/index.php/el/>
- [6] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, <http://www.ypeka.gr/>
- [7] ΔΕΔΔΗΕ, <https://www.deddie.gr/>
- [8] ΑΔΜΗΕ, <http://www.admie.gr/>
- [9] ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ & ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, <http://www.cres.gr/>
- [10] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, <http://www.rae.gr>
- [11] <http://www.econews.gr/>
- [12] Περιβαλλοντική ομάδα Δωδωναίων Εκπαιδευτηρίων, <http://ecododonea.blogspot.gr/>
- [13] solaire pv, <http://www.solaire.gr/>
- [14] ΕΝΕΡΓΟΤΕΧΝΙΚΗ, <http://www.energotechniki.gr/>
- [15] HELIOSYSTEMS, <http://www.selasenergy.gr/>
- [16] Μ. Δαμιανίδης, Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης, Φ. Στεργιόπουλος, "Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας-Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [17] Αθανάσιος Ταγάρης, "Έλεγχος μικροσυστήματος με φωτοβολταϊκό και ανεμογεννήτρια συνδεδεμένου στο δίκτυο", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα, 2013.
- [18] Ευστάθιος Σελίμης, "ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα, 2009.
- [19] Σ. Αυξεντίου, "Εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα", Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Καβάλα, 2013
- [20] Αναστάσιος Χ. Κυρίτσης, "ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΨΙΣΥΧΝΟΥ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ", Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή του

Πανεπιστημίου Πατρών, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2009.