

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

*Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Ομότιμος Καθηγητής*

*Συνεπιβλέπουσα: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης*

**Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Φωτοβολταϊκών  
και Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους σε Οικία  
(Study of a Photovoltaic and Diesel Generator system  
in an autonomous residence)**

**Πτυχιακή Εργασία:  
Πανουσόπουλος Μ. Χρήστος (Α.Μ. 38296)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά πλαίσια και μία συμβατική πηγή ενέργειας, ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Το σύστημα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μίας αυτόνομης οικίας εμβαδού 130m<sup>2</sup> στο νομό Κορινθίας.

- Το **κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή στο οποίο αναλύονται συνοπτικά οι κύριες μορφές, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και το θεσμικό πλαίσιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και τελικά δίνεται μια αρχική διάκριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με την χρήση τους.
- Στο **κεφάλαιο 2** αναλύονται τα χαρακτηριστικά, οι τρόποι αξιοποίησης (ηλιακοί συλλέκτες) και οι τρόποι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορους τύπους επιπέδου (οριζόντιο, κεκλιμένο, στο όριο της ατμόσφαιρας).
- Το **κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση της θεωρίας της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (Φ/Β φαινόμενο, ηλεκτρικά χαρακτηριστικά) και των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και των επιδράσεων από εξωτερικούς παράγοντες.
- Στο **κεφάλαιο 4** αναφέρεται η χρησιμότητα, τα βασικά χαρακτηριστικά, η λειτουργία και η συντήρηση των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.
- Το **κεφάλαιο 5** ασχολείται με τους συσσορευτές, όπου αναφέρεται η αρχή λειτουργίας, η δομή και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης καθονομάζονται οι κύριοι τύποι συσσορευτών που χρησιμοποιούνται ευρέως την σημερινή εποχή σε Φ/Β εφαρμογές.
- Το **κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει αναλυτικά τις ηλεκτρονικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στα Φ/Β συστήματα.
- Το **κεφάλαιο 7** περιλαμβάνει την μελέτη του υβριδικού Φ/Β συστήματος διαστασιολογημένο κατάλληλα για την κάλυψη των ανάγκων μιας αυτόνομης οικίας στην περιοχή του νομού Κορινθίας.

# ABSTRACT

---

The purpose of this thesis is the study of a hybrid power system consisted of solar energy and a conventional energy source, a power generator. The system is used to supply and meet the energy needs of an autonomous residence area of 130m<sup>2</sup> in the prefecture of Corinthos.

- **Chapter 1** is an introduction which analyzes briefly the main types, advantages, disadvantages and the institutional framework of renewable energy, and finally given an initial separation of photovoltaic systems depending on their use.
- **Chapter 2** analyzes the characteristics, methods of recovery (solar collectors) and the methods of calculation of solar radiation in different level types (horizontal, inclined, boundary of the atmosphere).
- **Chapter 3** analyzes the theory of photovoltaics (PV phenomenon, electrical characteristics) and different types of modules, and the effects of external factors.
- **Chapter 4** refers to the utility, the essential features, operation and maintenance of the generator sets.
- **Chapter 5** deals with the battery, indicating the operating principle, structure and characteristics. Also lists the main types of batteries are used widely today in PV systems.
- **Chapter 6** contains detailed analyses about the electronic devices currently used in the PV systems.
- **Chapter 7** includes the study of hybrid PV system designed appropriately to meet the needs of an autonomous residence in the prefecture of Corinthia.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Βερνάδο και την συνεπιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Εριέττα Ζουντουρίδου, για τη δυνατότητα που μου έδωσαν να πραγματοποιήσω την παρούσα εργασία καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και που χωρίς την πολύτιμη παρουσία της δε θα είχα καταφέρει τίποτα από όσα έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

1.1 Ιστορική αναδρομή της ενεργειας-Περιβαντολλογικό πρόβλημα.....	8
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.2.1 Βιόμαζα.....	10
1.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	11
1.2.3 Γεωθερμική ενέργεια.....	11
1.2.4 Αιολική ενέργεια.....	12
1.2.5 Ενέργεια κυμάτων, θαλάσσιων ρευμάτων και παλιρροϊκών κινήσεων.....	13
1.2.6 Ηλιακή ενέργεια.....	14
1.2.7 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα ανανεωσίμων πηγών ενέργειας.....	15
1.3 Θεσμικό πλαίσιο ανανεωσίμων πηγών ενέργειας.....	16
1.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα.....	18

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**

2.1 Ο ήλιος.....	20
2.2 Ένταση της ακτινοβολίας του ήλιου.....	20
2.3 Ηλιακή σταθερά.....	21
2.4 Γεωμετρικοί παράμετροι προσδιορισμού ηλιακής ακτινοβολίας.....	22
2.5 Ηλιακή Ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας.....	25
2.6 Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο.....	26
2.6.1 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.....	27
2.6.2 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.....	30
2.7 Κλίση και προσανατολισμός ηλιακών συλλεκτών.....	32
2.8 Τρόποι στήριξης ηλιακών συλλεκτών.....	33
2.8.1 Σταθερή στήριξη ηλιακών συλλεκτών.....	34
2.8.2 Εποχιακά ρυθμιζόμενη στήριξη ηλιακών συλλεκτών.....	34
2.8.3 Στήριξη με δυνατότητα στροφής των ηλιακών συλλεκτών (trackers).....	34

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	36
3.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείου.....	39
3.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου.....	39
3.2.2 Χαρακτηρηστική έντασης-τάσης (I-V) Φ/Β στοιχείου.....	40
3.2.3 Καμπύλη φορτίου.....	42
3.2.4 Ισχύς αιχμής.....	43
3.2.5 Παράγοντας πλήρωσης και βαθμός απόδοσης Φ/Β στοιχείου.....	44
3.3 Τρόποι σύνδεσης Φ/Β στοιχείων.....	45
3.4 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	47
3.4.1 Η έννοια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	47
3.4.2 Θερμική συμπεριφορά Φ/Β πλαισίου.....	48
3.4.3 Απόδοση Φ/Β πλαισίου.....	49
3.4.4 Επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου.....	51

3.4.5 Προβλήματα σκίασης ή βλάβης των Φ/Β πλαισίων.....	52
3.5 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	54
3.5.1 Φ/Β πλαίσια πυριτίου.....	54
3.5.2 Φ/Β πλαίσια άλλων υλικών.....	56
3.7 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	57

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΑ ΖΕΥΓΗ**

4.1 Τι είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος;.....	58
4.2 Βασικά μέρη ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.....	59
4.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια.....	59
4.2.2 Κινητήρας εσωτερικής καύσεως.....	63
4.2.3 Πίνακας ελέγχου και μεταγωγής ισχύος.....	66
4.2.4 Αντικραδασμική βάση στήριξης.....	68
4.3 Ισχύς και φόρτιση.....	68
4.4 Τρόποι λειτουργίας.....	68
4.5 Συντήρηση.....	69

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΣΟΡΕΥΤΕΣ**

5.1 Ηλεκτρικοί συσσορευτές.....	70
5.2 Αρχή λειτουργίας και δομή συσσορευτών.....	71
5.3 Είδη συσσορευτών.....	73
5.3.1 Συσσορευτές μολύβδου-οξέως (Lead-Acid).....	73
5.3.2 Συσσορευτές νικελίου-υδρογόνου (Nickel-Hydrogen).....	76
5.3.3 Συσσορευτές νικελίου-καδμίου (Nickel-Cadmium).....	77
5.3.4 Συσσορευτές ροής.....	79
5.3.5 Κυψέλες καυσίμου.....	79
5.4 Χαρακτηριστικά των συσσορευτών.....	81
5.4.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	81
5.4.2 Επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.....	82
5.4.3 Χρόνος ζωής.....	83
5.4.4 Ρεύμα φόρτισης.....	83
5.4.5 Αυτοεκφόρτιση.....	84
5.4.6 Συντελεστής γήρανσης.....	84
5.4.7 Βαθμός απόδοσης ενέργειας και φορτίου.....	85
5.5 Διαστασιολόγηση συσσορευτή.....	85
5.6 Συσσορευτές στα Φ/Β συστήματα.....	86

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ**

6.1 Γενικά.....	88
6.2 Μετατροπέας AC/DC.....	88
6.3 Μετατροπέας DC/DC.....	90
6.4 Ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	92
6.5 Μετατροπέας DC/AC.....	96
6.5.1 Μονοφασικός μετατροπέας DC/AC.....	96
6.5.2 Έλεγχος τάσης εξόδου αντιστροφέα με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).....	98

6.5.3 Τριφασικός μετατροπέας DC/AC.....	101
6.6 Ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτών.....	105

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΟΙΚΙΑ 130 τ.μ**

7.1 Εισαγωγή.....	108
7.2 Καταγραφή καταναλώσεων οικίας.....	110
7.3 Διαστασιολόγηση συστήματος.....	112
7.3.1 Κλίση φωτοβολταϊκών συλλεκτών.....	112
7.3.2 Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	113
7.3.3 Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	115
7.3.4 Επιλογή συσσωρευτών.....	118
7.3.5 Επιλογή ελεγκτή φόρτισης.....	119
7.3.6 Επιλογή αντιστροφέα (Inverter).....	121
7.3.7 Επιλογή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z).....	123
7.3.8 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης.....	125
7.4 Καλωδιώσεις.....	126
7.5 Γείωση.....	128
7.6 Οικονομική αξιολόγηση συστήματος.....	130
7.7 Συμπεράσματα.....	132

<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b> .....	134
----------------------------------	-----

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Ιστορική Αναδρομή της Ενέργειας-Περιβαντολογικό Πρόβλημα**

Η ενέργεια αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σε όλη του την ιστορική πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρείχε φύση (φωτιά, νερό, άνεμος, ήλιος), με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης του. Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη των μορφών της, την ηλεκτρική ενέργεια.

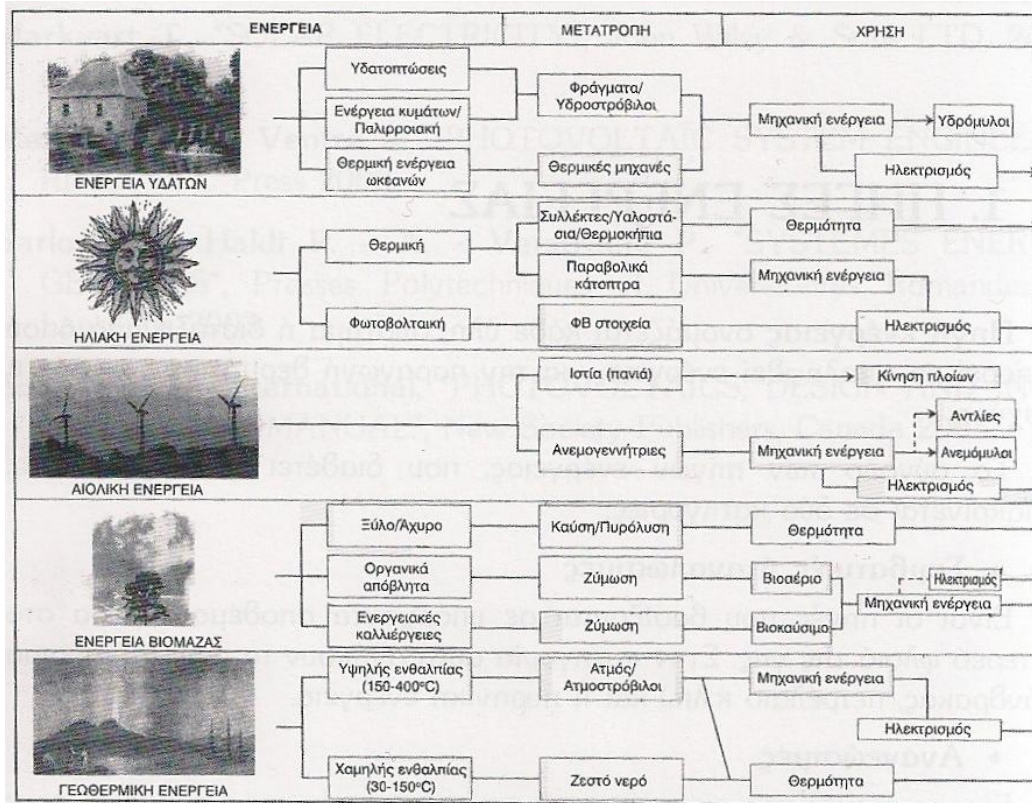
Στα μέσα του 20ου αιώνα μια νέα μορφή ενέργειας δημιούργησε ελπίδες, για ριζική αντιμετώπιση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος. Η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα όμως, δραματικά γεγονότα επιβεβαίωσαν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία μας να διασφαλίσουμε την ελεγχόμενη παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας. Επίσης, άρχισαν να επιβεβαιώνονται με επιστημονικό τρόπο οι προβλέψεις για σημαντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών άλλων, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων. Η παραγωγή ενέργειας με την χρήση συμβατικών καυσίμων, οδήγησαν σε παραγωγή αυξημένης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992, προσδιόρισε το πρόβλημα στις πραγματικές του διαστάσεις, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για την σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίονο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρα αυτά, οι τρόποι αντιμετώπισης και οι έλεγχοι εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Η αιτία εντοπίζεται στις επαγόμενες συνέπειες που θα φέρει ο περιορισμός της δράσης της βιομηχανίας των αναπτυγμένων χωρών.

Στην επομένη διάσκεψη στο Κιότο της Ιαπωνίας, το Δεκέμβριο του 1997, υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο (γνωστό και ως πρωτόκολλο του Κιότο) και τέθηκε σε εφαρμογή στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Δυστυχώς, η εφαρμογή του δεν βρίσκει όλα τα κράτη πρόθυμα να ανταποκριθούν στις δεσμεύσεις που προβλέπει. Η Ελλάδα έχει δεσμευτεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, να περιορίσει τις εκπομπές ρύπων που είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο του θερμοκηπίου στο 20%, καθώς και εξοικονόμηση ενέργειας στα ίδια ποσοστά έως το 2020.

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προκύψει ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα, που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων καθώς και από την δημιουργία πυρηνικών αποβλήτων από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Αυτοί οι λόγοι οδήγησαν στην ανάπτυξη των **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)**, ως μια μορφή οικολογικής παραγωγής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλονται στην βαρυτική δράση, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης, καθώς και τη γεωθερμική, όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο.



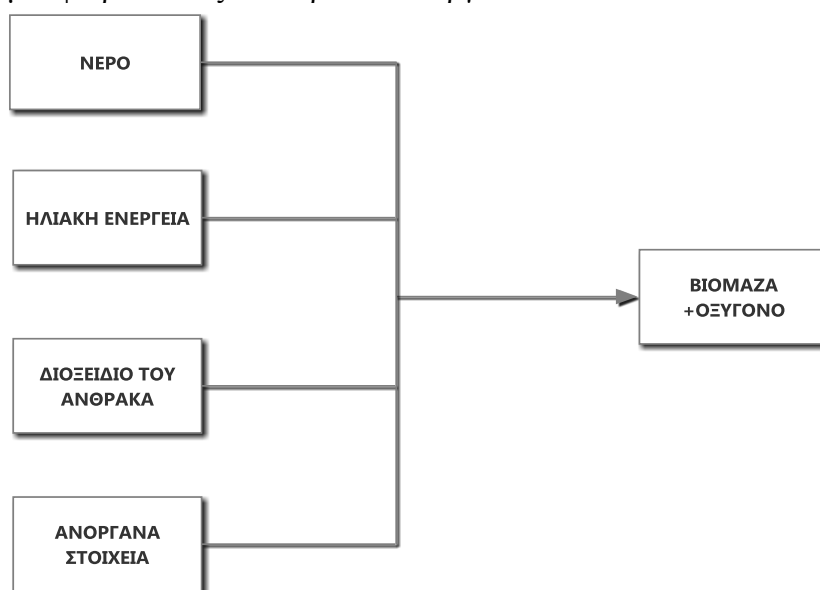
Σχήμα 1.1 - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Κύριες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η βιομάζα, η υδατόπτωση, η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κυμάτων και θαλάσσιων ρευμάτων. Σήμερα ωστόσο λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και παρόλο που αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, μόλις το 18% σε παγκόσμιο επίπεδο, εντούτοις γίνονται βήματα για την περαιτέρω αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας ελαττώνεται διαρκώς τα τελευταία είκοσι έτη και ιδίως η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, είναι δυνατόν πλέον να ανταγωνίζονται παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια.

### 1.2.1 Βιόμαζα

Η ενέργεια που παράγεται από υλικά οργανικής προέλευσης, όπως υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών και δασικών εργασιών, παραπροϊόντα γεωργικών βιομηχανιών, ζωικά απόβλητα, το οργανικό τμήμα των αστικών απορριμμάτων και τις ενεργειακές καλλιέργειες, ονομάζεται **ενέργεια βιόμαζας**.

Η ενέργεια βιόμαζας αποτελεί μια δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Κατ' αυτήν, η χλωροφύλλη μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος.



Σχήμα 1.2 - Διεργασία παραγωγής ενέργειας από βιόμαζα

Η βιόμαζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκόσμιας απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

Η βιομάζα στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία πρώτων υλών, με τοπικό χαρακτήρα συγκέντρωσης, και μπορεί να έχει πολλαπλές χρήσεις ανάλογα με το είδος και τις δυνατότητες τελικής αξιοποίησης της (παραγωγή θερμικής κι ηλεκτρικής ενέργειας, παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων και βιοαερίου κ.ά). Το είδος και η προέλευση των διαφόρων πρώτων υλών βιομάζας συνδυάζεται με μεγάλο αριθμό αγροτικών δραστηριοτήτων (συγκομιδή υπολειμμάτων καλλιεργειών όπως το άχυρο σιτηρών, τα στελέχη του βαμβακιού, υλοτομίες δασικών συμπλεγμάτων, διάθεση αποβλήτων ζωοτροφικών μονάδων, κ.ά.) καθώς και με την εισαγωγή νέων ενεργειακών καλλιεργειών στο γεωργικό σύστημα. Λόγω της άμεσης σύνδεσής της με την αγροτική παραγωγή μπορεί να αποτελέσει πηγή συμπληρωματικού εισοδήματος και δημιουργίας θέσεων εργασίας για την τοπική κοινωνία στα πλαίσια ολοκληρωμένου κι αειφόρου εθνικού και περιφερειακού σχεδιασμού.

### 1.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Αποτελεί έναν από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Εκμεταλλευόμαστε την ύπαρξη φυσικών λεκακών συλλογής των ομβρίων υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, με κατάλληλη εδαφική διαμόρφωση, κατασκευάζοντας φράγματα. Η υδατόπτωση κινεί υδροστροβίλους, που με την σειρά τους θέτουν σε λειτουργία ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 1.3 - Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο στην Αιτωλοακαρνανία

Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος (παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια) μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω της κατάκλισης με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφία περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει περίπου το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

### 1.2.3 Γεωθερμική ενέργεια

Αφορά την ενέργεια των θερμών νερών, που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστιακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, η θέρμανση των γεωθερμικών ρευστών αποδίδεται κυρίως, στην εκλυόμενη ενέργεια κατά την διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων στο στερεό φλοιό της γης. Όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλή, η ενέργεια τους χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση κτηρίων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μονάδων κ.α, ενώ στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία των ατμών είναι υψηλή (άνω των 150° Κελσίου), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανερχόταν παγκοσμίως, το 2003, σε 10 GW. Στη χώρα μας, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως σε θερμοκηπιακές μονάδες, σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του Κεντρικού και Βορειοανατολικού Αιγαίου.



Σχήμα 1.4 - Γεωθερμική γεώτρηση στη Ξάνθη

### 1.2.4 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα. Ο άνεμος περιέχει ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική με την χρήση των ανεμογεννητριών. Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σήμερα σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών από 7,6 GW το 1997, αυξήθηκε στα 120,8 GW το 2008. Στην Ευρώπη η αντίστοιχη ισχύς είναι κοντά στα 66 GW.



Σχήμα 1.5- Αιολικό πάρκο στην Ρόδο

Στην Ελλάδα λειτουργούν αρκετά αιολικά πάρκα, με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικές δεκάδες MW, κυρίως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της Δ.Ε.Η. Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κυρίως στα νησιά του Αιγαίου η ταχύτητα ανέμου είναι μεγάλη (6-12 m/sec) η οποία υπερκαλύπτει την αποδοτική περιοχή ταχυτήτων ανέμου για τις ανεμογεννήτριες και κατ' επέκταση ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.

### 1.2.5 Ενέργεια κυμάτων, θαλάσσιων ρευμάτων και παλιρροϊκών κινήσεων

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στην Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 240 MW. Εντυπωσάκο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμό είναι η διάταξη με όνομα Pelamis (Σχήμα 1.4).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με δυνατότητα αρθρωτής κίνησης μεταξύ τους, σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα άνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους. Το σύστημα αυτό έχει την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως 750 kW.



Σχήμα 1.6 - Σύστημα Pelamis εν ώρα λειτουργίας



Σχήμα 1.7 - Διάταξη υποθαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας

Σε προχωρημένο πειραματικό επίπεδο υπάρχει επίσης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες, όπως φαίνονται στο σχήμα 1.7. Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής ταχύτητας των ανέμων. Η εφαρμογή τους, πρόκειται να είναι περιορισμένη σε θέσεις που υπάρχουν ισχυρά θαλάσσια ρεύματα.

### 1.2.6 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στην Γη. Το συνολικό ποσό ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι ίσο με 10000 φορές περίπου την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Κατά μέσο όρο, προσπίπτουν 1700 kWh σε κάθε τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο. Το φως του ήλιου που φθάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες, συγκεκριμένα το άμεσο φως και έμμεσο φως, το οποίο είναι το φως που έχει διασκορπίζεται από τα μόρια σκόνης και του νερού στην ατμόσφαιρα. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες χρησιμοποιούν όχι μόνο την άμεση συνιστώσα του φωτός αλλά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και με νεφοσκεπή ουρανό. Μέσω των φωτοβολταϊκών κυψελών, η ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όταν το φως προσπίπτει σε μια κυψέλη παράγεται συνεχές ρεύμα (DC) και, θέτοντας ένα ηλεκτρικό φορτίο από την άλλη, το ρεύμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί.

Το ποσό της ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο σχετίζεται άμεσα με την ένταση της φωτεινής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια μετατροπής. Έτσι όσο μεγαλύτερος είναι ο διαθέσιμος ηλιακός πόρος, τόσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής. Προκειμένου να αποληφθεί όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ενέργεια, η Φ/Β κυψέλη πρέπει να προσανατολίζεται προς τον ήλιο. Εάν οι κυψέλες έχουν σταθερή θέση, πρέπει να βελτιστοποιηθεί ο προσανατολισμός τους ως προς το νότο και η γωνία κλίσης τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η βέλτιστη γωνία κλίσης κυμαίνεται σε ένα εύρος περίπου 15° του γεωγραφικού πλάτους της θέσης. Για παράδειγμα η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα στην Δυτική Ευρώπη είναι περίπου 35°. Μια απόκλιση της γωνίας κλίσης κατά 30 μοίρες από την βέλτιστη γωνία θα οδηγήσει σε απώλειες μικρότερες από το 10% της μέγιστης παραγωγής.



Σχήμα 1.7 - Φωτοβολταϊκό πάρκο 100 kW στην Ηλεία

Τα Φ/Β στοιχεία είναι πιο αποδοτικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, οπότε για να εξασφαλισθεί ότι δεν υπεθερμαίνονται, είναι σημαντικό να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται στο αέρα να κινείται ελεύθερα γύρω από αυτά. Οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού είναι οι σχετικά ψυχρές, φωτεινές και ηλιόλουστες μέρες.

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων ανερχόταν το 2008 σε 18,5 MW<sub>p</sub>, με σκοπό τα 700 MW<sub>p</sub> στο τέλος του 2010. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς Φ/Β σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος, καθώς και Φ/Β αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μικρής ισχύος φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας.

### 1.2.7 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των Ανανεωσίμων πηγών ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανανεωσίμων πηγών ενέργειας παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πλεονεκτήματα Α.Π.Ε	Μειονεκτήματα Α.Π.Ε
Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα. Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις	Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας
Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Καθώς και ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής	Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτόρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου	Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται
Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις	Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί

Πίνακας 1.1-Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Α.Π.Ε

### 1.3 Θεσμικό πλαίσιο των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Το θεσμικό πλαίσιο για την στήριξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα αποτελείται από δύο βασικές παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος έχει να κάνει με οικονομική στήριξη της παραγόμενης κιλοβατώρας από ΑΠΕ (feed-in-tariff system), ενώ η δεύτερη παράμετρος με την οικονομική στήριξη των επενδύσεων για ΑΠΕ, μέσω παροχής επιδοτήσεων για την υλοποίηση έργων για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Ο πρώτος νόμος που έδωσε λύση σε παρατεταμένα προβλήματα των ΑΠΕ τέθηκε σε ισχύ το 1994 (Νόμος 2244/94 “Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις) αλλά πρακτικά εφαρμόστηκε το 1998, όταν ψηφίστηκε ο Εθνικός Αναπτυξιακός Νόμος (2601/98) και δεσμεύτηκαν από το 2ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης κονδύλια για τους τομείς των Ανανεώσιμων, της Εξοικονόμησης Ενέργειας και της Συμπααραγωγής. Το Επιχειρησιακό Πλαίσιο Στήριξης των ΑΠΕ, απέδωσε θετικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια ισχύος του. Συγκεκριμένα η εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ αυξήθηκε από 71 MWe το 1997 (ίδια κατάσταση με το 1994) σε 500 MWe το 2004 και 1.100MWe το 2007. Το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ αφορά αιολικά πάρκα.

Ο νόμος 2773/1999 για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ο νόμος 3468/2006 , που συμπλήρωσε και αντικατέστησε τον 2244/1994, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπααραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης, αποτελούν μέχρι σήμερα το βασικό νομοθετικό πλαίσιο της σημερινής αγοράς ΑΠΕ. Με τους νόμους αυτούς έγινε η ενσωμάτωση των Ευρωπαϊκών Οδηγιών 96/92/EK και 2001/77/EK στο εθνικό δίκαιο. Δυστυχώς στην παρούσα φάση δεν υπάρχει κάποιος νόμος που να αναφέρεται ειδικότερα στην παραγωγή θέρμανσης/ ψύξης από ΑΠΕ. Οι σημαντικότερες διατάξεις των νόμων 2773/1999 και 3468/2006 που αφορούν τις ΑΠΕ συνοψίζονται παρακάτω:

- Σύμφωνα με το νόμο 2773/1999 ιδρύεται η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας(ΡΑΕ) και ο Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας(ΔΕΣΜΗΕ). Και τα δύο αυτά σώματα είναι βασικοί φορείς της απελευθερωμένης ηλεκτρικής αγοράς.
- Σύμφωνα με το νόμο 2773/99 ορίζεται η άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε συμβατικού είτε με ΑΠΕ. Η χορήγηση της άδειας παραγωγής δεν απαλλάσσει τον κάτοχο της από την υποχρέωση να λαμβάνει άλλες άδειες ή εγκρίσεις που προβλέπονται από την ισχύουσα νομοθεσία, όπως οι άδειες εγκατάστασης και λειτουργίας.
- Ο Διαχειριστής του Συστήματος (ΔΕΣΜΗΕ) υποχρεούται να δίνει προτεραιότητα, κατά την κατανομή του Φορτίου, σε διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής, στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ΑΠΕ, ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ τους, καθώς και σε υδροηλεκτρικές μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 15MWe.

- Ο Διαχειριστής του συστήματος (ΔΕΣΜΗΕ) είναι υποχρεωμένος να συνάπτει σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με τον κάτοχο άδειας παραγωγής για 10 έτη, η οποία μπορεί να παρατείνεται για 10 επιπλέον έτη.
- Ο νόμος 3468/06 προσπαθεί να απλοποιήσει και να επιταχύνει την αδειοδοτική διαδικασία και επιπλέον θέτει ένα τιμολόγιο για επιδότηση της παραγόμενης κιλοβατώρας (feed-in-tariff system). Όπως προαναφέρθηκε στο θεσμικό πλαίσιο στήριξης των ΑΠΕ, πέρα από την επιδότηση της παραγόμενης κιλοβατώρας προβλέπεται και η παροχή επιδοτήσεων για την υλοποίηση έργων ΑΠΕ (προβλέπονται επιδοτήσεις και για άλλου τύπου επενδύσεις). Οι επιδοτήσεις αυτές προβλέπονται κυρίως μέσω:
  - α) Του νόμου 3299/2004, που συχνά καλείται και Αναπτυξιακός Νόμος.
  - β) Επιχειρησιακού Προγράμματος Ανταγωνιστικότητας (ΕΠΑΝ), υπό την στήριξη του 3ου Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης (ΚΠΣ ΙΙΙ, 2000-2006).
  - γ) Του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 υπό την στήριξη του 4ου Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης (ΚΠΣ ΙV, 2007-2013).

Ο επενδυτικός νόμος (3299/2004) χορηγεί ελκυστικά κίνητρα για επενδύσεις, σε όλους τους τομείς της οικονομίας, όπως είναι ο πρωτογενής τομέας (π.χ. θερμοκήπια, ιχθυοτροφεία), ο δευτερογενής (π.χ. κατασκευές, ενέργεια), ο τριτογενής (π.χ. υπηρεσίες) και ο τουρισμός. Ο συγκεκριμένος νόμος έχει ισχυρό γεωγραφικό χαρακτήρα, καθώς το επίπεδο της επιδότησης που δίνεται κάθε φορά εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση που θα υλοποιηθεί η επένδυση. Έτσι γίνεται διάκριση της επικράτειας σε τέσσερις ζώνες, ενώ οι δραστηριότητες που εμπίπτουν στις παροχές του χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες.

Όσον αφορά τώρα τις επενδύσεις ΑΠΕ, ο νόμος 3299/2004 δίνει επιδοτήσεις για επενδύσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από ΑΠΕ, καθώς και για επενδυτικά σχέδια παραγωγής βιοκαυσίμων ή στερεών καυσίμων από βιομάζα, επενδυτικά σχέδια παραγωγής βιομάζας από φυτά, με σκοπό τη χρήση της ως πρώτης ύλης για την παραγωγή ενέργειας. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση από τις παραπάνω επενδύσεις είναι βέβαια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητας (ΕΠΑΝ), έχει πλέον κλείσει αλλά ως συνέχειά του έρχεται το Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013, το οποίο μόλις ξεκίνησε και καλύπτει όλους τους τομείς της οικονομίας, συμπεριλαμβανομένου και του ενεργειακού τομέα. Σύμφωνα και με ένα πρόσφατο δελτίο τύπου από το Υπ. Ανάπτυξης η ιεραρχία στον ενεργειακό τομέα είναι ως εξής: ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ, εξοικονόμηση ενέργειας και ενεργειακή αποδοτικότητα, παραγωγή θέρμανσης και ψύξης από ΑΠΕ, βιομάζα και συμπαραγωγή.

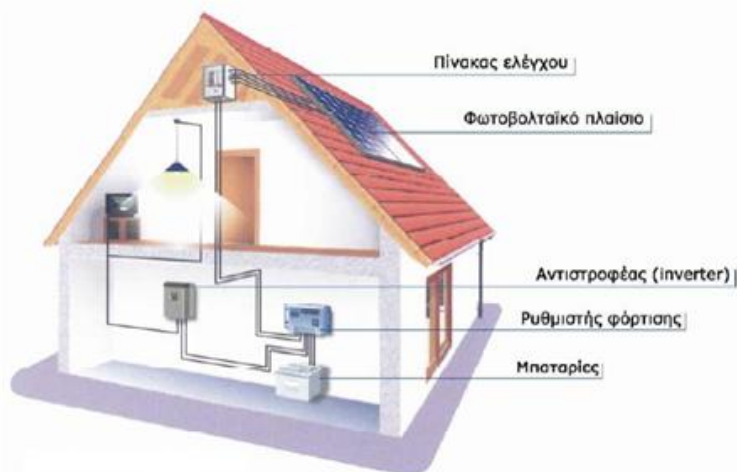
## 1.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν μεγάλη περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως (όπως οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά σώματα κήπου), έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδότηση νήσων ή πρότυπων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο. Τα Φ/Β συστήματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Οι αυτόνομες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν ίσως τις πληρέστερες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης.

Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και στις οποίες η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές, ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος.



Σχήμα 1.8 - Αυτόνομο Φ/Β σύστημα

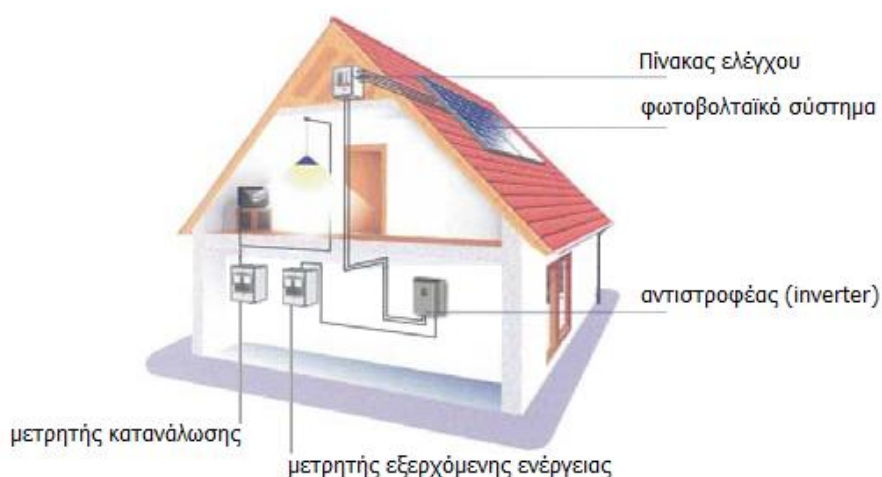
Αποτελείται καταρχήν από τη **Φ/Β γεννήτρια**, η οποία είναι και το βασικότερο συστατικό του συστήματος, αφού εκεί γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έπειτα περιλαμβάνει **συσσωρευτές** για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιόδους που η παραγόμενη ενέργεια εμφανίζει περίσσεια και για την χρησιμοποίησή της, όταν η παραγωγή είναι ανεπαρκής. Όπως είναι κατανοητό η χωρητικότητα των μπαταριών είναι δεδομένη και υπάρχει το ενδεχόμενο να μην καλύπτουν τις ανάγκες του φορτίου σε παρατεταμένες περιόδους συννεφιάς ή κάποιας βλάβης του συστήματος. Από την άλλη η επιλογή συσσωρευτών πολύ

μεγάλης χωρητικότητας κρίνεται οικονομικά ασύμφορη. Η ιδανικότερη λύση είναι μια **βοηθητική γεννήτρια** (συνήθως νηξελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο. Συχνά τα συστήματα αυτά καλούνται υβριδικά Φ/Β συστήματα και μπορεί να περιέχουν και άλλες εναλλακτικές βοηθητικές πηγές ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτρια). Τα υβριδικά μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης. Τέλος αναπόσπαστα συστατικά ενός αυτόνομου συστήματος είναι οι διατάξεις για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργεια από τα Φ/Β στοιχεία σε μορφή κατάλληλη για την τροφοδότηση των φορτίων, οι οποίες περιέχουν έναν **DC/DC μετατροπέα** σε συνδυασμό με έναν **ανιχνευτή μέγιστης ισχύος(MPPT)** και έναν **DC/AC αντιστροφέα**.

- **Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Μια διαφορετική προσέγγιση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η εφαρμογή των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή όχι (Σχήμα 1.9). Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα το δίκτυο ενεργεί όπως μια μπαταρία με απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδε-δεμένου Φ/Β συστήματος, θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως στις αυτόνομες εφαρμογές οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως φορτισμένες, όποτε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται.



Σχήμα 1.9 - Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 2.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος είναι ένα αστέρι, μάζας  $2 \times 10^{30}$  κιλών, ακτίνας 700.000 χιλιομέτρων, ηλικίας  $5 \times 10^9$  έτων και υπολογίζεται πως έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του ανέρχεται στους 5.800 K, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία, περίπου, 15.000.000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο.



Σύμφωνα με την θεωρία αυτή η πυρηνική αντίδραση δικαιολογεί, με το έλλειμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση  $E = \Delta m \cdot c^2$ , από την θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε ήλιο, εκλύεται ενέργεια ίση με  $1,67 \times 10^5$  kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.

### 2.2 Ένταση της ακτινοβολίας του Ήλιου

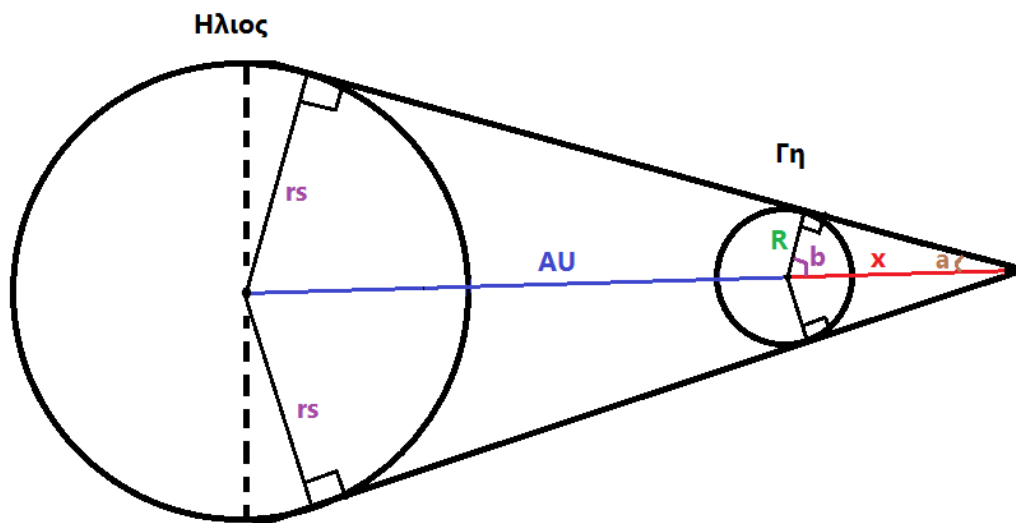
Η τροχιά της γης, κατά την κίνηση της γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, με τον ήλιο στην μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα,  $a = 149,6 \times 10^6$  km και εκκεντρότητα,  $e = 0,01673$ . Η ετήσια μεταβολή της απόστασης ήλιου-γης, λόγω της ελλειπτικής μορφής της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο είναι  $\pm 1,7$  % και επαναλαμβάνεται με μικρές μεταβολές από χρόνο σε χρόνο. Η αντίστοιχη διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας εκτιμάται στα επίπεδα του  $\pm 3,4$  %. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η ένταση (J), της ακτινοβολίας του, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση:

$$J = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

Όπου P η ολική ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και d η απόσταση από τον ήλιο.

## 2.3 Ηλιακή σταθερά

Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη-ήλιου, ενός ηλιακού συστήματος, ονομάζεται **ηλιακή σταθερά** του συγκεκριμένου πλανήτη. Στην περίπτωση του ηλιακού μας συστήματος, η ηλιακή σταθερά για τη γη, ορίζεται σε απόσταση 1 AU από τον ήλιο. Το 1970, προτάθηκε ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς, η  $(1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$ . Μεταγενέστερες, μεγαλύτερης ακρίβειας μετρήσεις από δορυφόρους έδωσαν, τιμές για την ηλιακή σταθερά, στο 1363-1375  $\text{W/m}^2$ . Η μέση τιμή τους,  $G_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ , χρησιμοποιείται πλέον διεθνώς, ως πρότυπη τιμή ηλιακής σταθεράς για τη γη.



Σχήμα 2.1 - Περιγραφή απόστασεως μεταξύ Γης και Ήλιου

Η μετρούμενη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ γης και ήλιου, η οποία αλλάζει κατά τη διάρκεια του έτους. Εξαρτάται επίσης, από την περιοδική εμφάνιση των ηλιακών κηλίδων και από την περιστροφή του ήλιου γύρω από τον άξονα του, η οποία προκαλεί περιοδική απόκρυψη των κηλίδων. Η ηλιακή σταθερά αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ηλικία του ηλιακού μας συστήματος. Η ελάτωση της ακτίνας του ήλιου, που επιβεβαιώνεται από σχετικές παρατηρήσεις, έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του.

## 2.4 Γεωμετρικοί παράμετροι προσδιορισμού ηλιακής ακτινοβολίας

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Με βάση αυτή την αρχή διακρίνουμε τα παρακάτω γεωμετρικά στοιχεία:

### ✚ Γεωγραφικό πλάτος του τόπου( $\varphi$ )

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τοπος με τον ισημερινό και είναι:

$$-90^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ}$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα γεωγραφικά πλάτη για διάφορες περιοχές της Ελλάδας:

Πόλη	Γεωγραφικό πλάτος
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης	35°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσος, Κάρπαθος	35°30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36°30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος	37°30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Ικαρία, Σάμος	38°
Κεφαλλονία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λειβαδειά, Χίος, Χαλκίδα	38°30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39°30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτοχωρό, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Καστοριά, Πτολεμαίδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40°30'
Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Γιαννιτσία, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα, Έδεσσα	41°30'

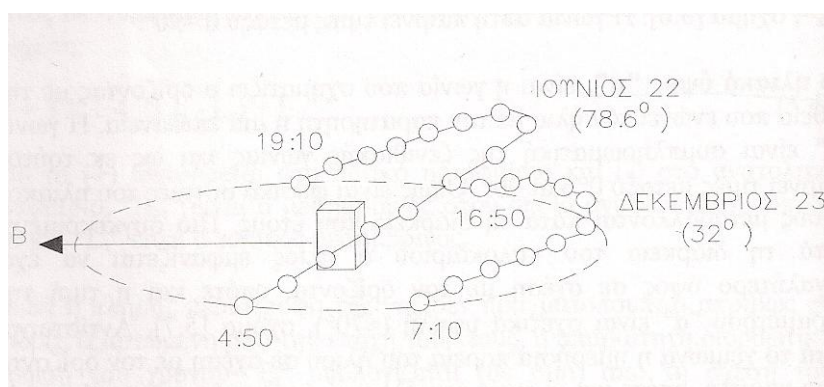
Πίνακας 2.1 - Γεωγραφικά πλάτη διαφόρων περιοχών της Ελλάδας

### ✚ Ζενίθια γωνία ( $\theta_z$ ή $Z_\Sigma$ )

Ο νοητός άξονας που τέμνει κάθετα τον ορίζοντα μιας περιοχής και που εκτείνεται μέχρι τον ουράνιο θόλο, ονομάζεται **τοπικό ζενίθ**. Η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας που ενώνει τη θέση του παρατηρητή ή μιας επιφάνειας με τον ήλιο ονομάζεται **ζενίθια γωνία ( $\theta_z$  ή  $Z_\Sigma$ )** (σχήμα 2.4). Η γωνία αυτή παίρνει τιμές μεταξύ  $0^\circ$ - $90^\circ$ .

### ✚ Ηλιακό ύψος ( $\alpha$ )

Το **ηλιακό ύψος ( $\alpha$ )**, είναι η γωνία που σχηματίζει ο ορίζοντας με την ευθεία που ενώνει τον ήλιο με τον παρατηρητή ή μια επιφάνεια. Η γωνία είναι συμπληρωματική της ζενιθιακής γωνίας και ως εκ τούτου παίρνει τιμές από  $0^\circ$  έως και  $90^\circ$ . Όπως είναι φυσικό οι τιμές του ηλιακού ύψους μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τον ορίζοντα, οπότε και η τιμή της παραμέτρου ( $\alpha$ ) είναι σχετικά υψηλή (περίπου  $70^\circ$ ). Αντίστοιχα τον χειμώνα η ημερίσια πορεία του ήλιου σε σχέση με τον ορίζοντα είναι χαμηλή, οπότε και οι τιμές του ηλιακού ύψους είναι σχετικά μικρές (περίπου  $35^\circ$ ). Η εξήγηση των διαφορετικών αυτών τιμών αποδίδεται στη μετατόπιση του άξονα περιστροφής της γης σε σχέση με το επίπεδο πάνω στο οποίο αυτή περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο, δηλαδή την ηλιακή απόκλιση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ημερίσια πορεία του ήλιου σε σχέση με την γη για δύο τυπικές μέρες του χειμώνα και του καλοκαιριού στο βόρειο ημισφαίριο και σε γεωγραφικό πλάτος ανάλογο με αυτού της χώρας μας.

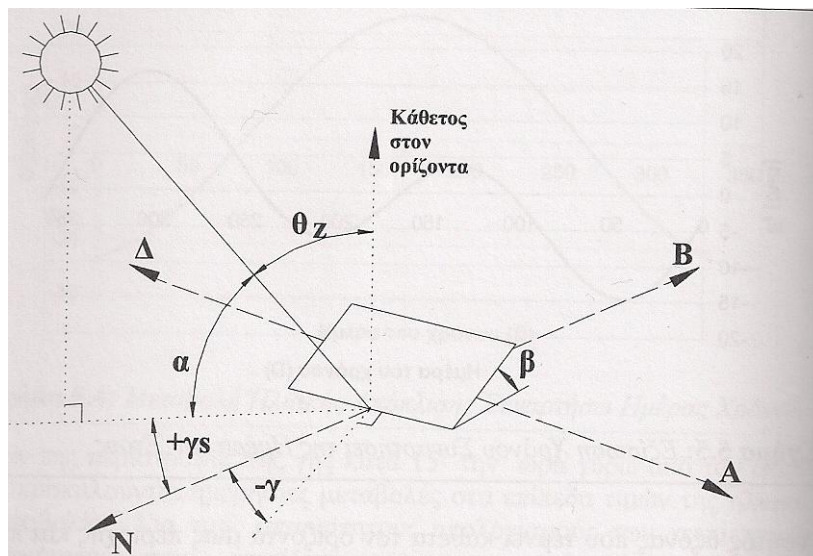


Σχήμα 2.2 - Τυπική ημερίσια πορεία του Ήλιου

### ✚ Αζιμούθια γωνία ( $\gamma_s$ ή $A_s$ )

Η **αζιμούθια γωνία ( $\gamma$  ή  $A$ )**, είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού (νότος) και της προβολής της καθέτου ευθείας μιας επιφάνειας πάνω στον ορίζοντα. Η αζιμούθια γωνία μιας επιφάνειας καθορίζει τον προσανατολισμό της. Αντίστοιχα η **αζιμούθια γωνία ( $\gamma_s$  ή  $A_s$ )**, είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού (νότος) του παρατηρητή και του επιπέδου, που ορίζεται από τον κύκλο που περνάει

απο το τοπικό ζενίθ και τον ήλιο. Οι τιμές των αζιμούθιων γωνιών είναι  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , με αρνητικές τιμές στα ανατολικά, θετικές τιμές στα δυτικά και σημείο αναφοράς των μετρήσεων το νότο (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.3 - Γεωμετρικές παράμετροι θέσης Ήλιου-κεκλειμένης επιφάνειας

#### ✚ Ωριαία γωνία ηλιακής απόκλισης ( $\omega$ )

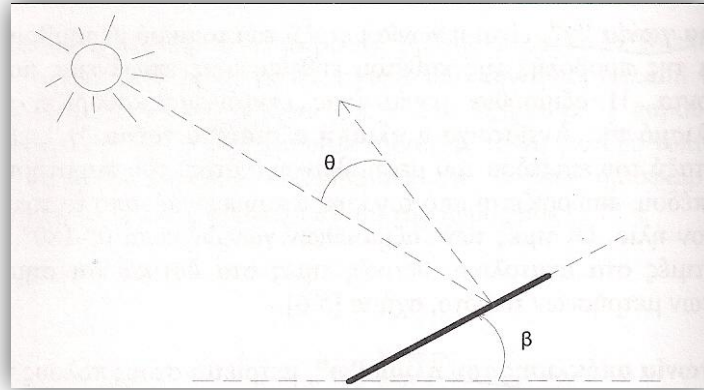
Η **ωριαία γωνία ηλιακής απόκλισης ( $\omega$ )**, μετριέται στους πόλους του θόλου μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού (νότος) του παρατηρητή και του ηλιακού μεσημβρινού. Η γωνιαία απόκλιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, εξ'αιτίας της περιστροφής της γης εκφράζεται με την ωριαία γωνία ( $\omega$ ). Η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά  $15^{\circ}$  ανα ώρα, με αρνητικές τιμές το πρωί, θετικές το απόγευμα και μηδενικές κατά τη μεσημβρία.

#### ✚ Γωνία κλίσης ( $\beta$ )

Η **γωνία κλίσης ( $\beta$ )** ορίζεται η γωνία μεταξύ του επιπέδου αναφοράς και του οριζοντίου επιπέδου. Η γωνία αυτή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  (σχήμα 2.4).

#### ✚ Γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ )

Η **γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ )**, είναι η γωνία που σχηματίζεται απο την ευθεία που ενώνει ένα σημείο μιας κεκλειμένης επιφάνειας με τον ήλιο και απο την κάθετη ευθεία στην κεκλειμένη επιφάνεια (σχήμα 2.5). Η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης για μια οριζόντια επιφάνεια είναι η ζενίθια γωνία.



Σχήμα 2.4 - Προσδιορισμός γωνιών κλίσης-πρόσπτωσης

Για κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό, δηλαδή  $\gamma=0$  και με κλίση επιφάνειας  $\beta$ , η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\cos \theta = (\cos \theta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega) + (\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta)) \quad (2.2)$$

## 2.5 Ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της γηινης ατμοσφαιρας

Η ηλιακή ακτινοβολία ( $G_{on}$ ) ( $W/m^2$ ) που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες στο όριο της ατμόσφαιρας, εξαρτάται από την απόσταση γης-ήλιου και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot E_0 \quad (2.3)$$

Όπου

- $G_{sc}$ : η ηλιακή σταθερά ίση με  $1367 W/m^2$
- $E_0$ : ο διορθωτικός συντελεστής απόστασης γης-ήλιου

Η αντίστοιχη εξίσωση ηλιακής ακτινοβολίας ( $G_o$ ) σε ( $W/m^2$ ) για μια οριζόντια επιφάνεια στα όρια της ατμόσφαιρας, δίνεται από την σχέση:

$$G_o = G_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z = G_{sc} \cdot E_0 \cdot ((\sin \varphi \cdot \sin \delta) + (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)) \quad (2.4)$$

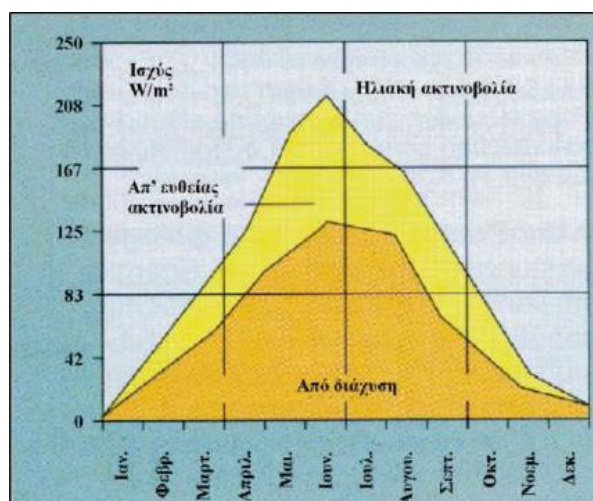
Ολοκληρώνοντας τις στιγμιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για μια ορισμένη χρονική περίοδο (π.χ από την ανατολή έως την δύση του ηλίου), υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στο όριο της ατμόσφαιρας. Για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης τιμής σε κεκλιμένο επίπεδο χρησιμοποιούνται οι γεωμετρικές παράμετροι που συνδέονται με την κλίση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας.

## 2.6 Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο

Η τιμή της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας δεν φτάνει στην επιφάνεια της γης. Αυτό συμβαίνει διότι η ατμόσφαιρα της γης εξασθενεί την ακτινοβολία που θα φτάσει στην επιφάνεια της γης σε σχέση με αυτή στο όριο της ατμόσφαιρας λόγω ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, από υδρατμούς, από το οξυγόνο και από το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (προκαλείται από τα μόρια του αέρα, από σωματίδια σκόνης ή λόγω μόλυνσης). Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας λοιπόν που φθάνει στο έδαφος επηρεάζεται από το μήκος της ατμόσφαιρας που διαπερνά. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαδρομή των ηλιακών ακτίνων στην ατμόσφαιρα τόσο μειωμένη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γής χωρίζεται σε **άμεση** και **διάχυτη**, ενώ το άθροισμα αυτών ονομάζεται **ολική ακτινοβολία**.

- **Άμεση (ή Απ'ευθείας) ακτινοβολία** ονομάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει απευθείας στην επιφάνεια της γής χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα.
- **Διάχυτη ακτινοβολία** ονομάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γής αφού έχει αλλάξει η διεύθυνση της λόγω ανάκλασης ή σκέδασης μέσα στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό φως, το υψόμετρο, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από τη παρουσία των σωματιδίων και αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.
- **Ολική ακτινοβολία** είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας και συμβολίζεται με "G" ή "I" ή "H".



Σχήμα 2.5 - Μηνιαία κατανομή της μέσης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο

### 2.6.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Η έλλειψη λεπτομερών πειραματικών μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή, κατέστησε αναγκαία τη δημιουργία αναλυτικών υπολογιστικών μοντέλων, που βασίζονται σε εμπειρικές ή ατμοσφαιρικές πληροφορίες. Τα εμπειρικά μοντέλα προέρχονται κυρίως από επεξεργασία μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας για μια ορισμένη περιοχή και προσαρμόζονται κατάλληλα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλες περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως το γεωγραφικό πλάτος.

Ένα από τα πιο βασικά μοντέλα που αναφέρεται σε συνθήκες καθαρού ουρανού είναι το **μοντέλο του "Hottel"**, του οποίου οι αριθμητικές τιμές των αποτελεσμάτων πλησιάζουν αρκετά τις πραγματικές τιμές. Βάσει του παραπάνω μοντέλου, η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο  $G_{cb}$  δίνεται από την σχέση:

$$G_{cb} = G_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos \theta_z \quad (2.5)$$

Όπου

- $G_{on}$ : είναι η ένταση της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου
- $\tau_b$ : είναι ο δείκτης ακτινικής μεταφοράς, που εκφράζει το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης ως προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right)} \quad (2.6)$$

με

- $a_0 = r_0 \cdot a_2$ ,  $a_1 = r_1 \cdot a_3$ ,  $k = r_k \cdot k_1$
- $a_2 = 0,4237 - 0,00821(6 - z)^2$
- $a_3 = 0,5055 + 0,00595(6,5 - z)^2$
- $k_1 = 0,2711 + 0,01858(2,5 - z)^2$   
όπου  $z$  είναι το υψόμετρο του τόπου σε (km), (π.χ για το Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά ισχύει  $z=0,035$ )

Οι διορθωτικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς επιλέγονται ανάλογα την εποχή και το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής (βλ. πίνακα 2.2).

Κλιματολογικές συνθήκες	$\Gamma_0$	$\Gamma_1$	$\Gamma_k$
τροπικό κλίμα	0,95	0,98	1,02
μέσα γεωγραφικά πλάτη-καλοκαίρι	0,97	0,99	1,02
βόρεια γεωγραφικά πλάτη-καλοκαίρι	0,99	0,99	1,01
μέσα γεωγραφικά πλάτη-χειμώνας	1,03	1,01	1

Πίνακας 2.2 - Διορθωτικοί συντελεστές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Αντίστοιχα, η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί απο την εξίσωση (2.7) η οποία εκφράζει το λόγο ( $\tau_d$ ) της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $G_{cd}$ ) προς την αντίστοιχη τιμή σε οριζόντιο επίπεδο στο όριο της ατμόσφαιρας ( $G_0$ ):

$$\tau_d = \frac{G_{cd}}{G_0} \quad (2.7)$$

Οι εξισώσεις (2.5) και (2.7), υπολογίζουν τις στιγμιαίες τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ με παρόμοια διαδικασία μπορούν να γίνουν αντίστοιχοι υπολογισμοί για περίοδο μια ώρας, δηλαδή κατ' επέκταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σχετική ακρίβεια οι εξισώσεις (2.5) και (2.7) αντικαθιστώντας τα σύμβολα  $G_{cd}$  και  $G_{cb}$  με  $I_{cd}$  και  $I_{cb}$  οπότε  $I_c = I_{cd} + I_{cb}$ . Παράλληλα για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, βάσει της αντίστοιχης ολικής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εμπειρικό μοντέλο των **Orgill** και **Hollands**. Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου απαιτείται ο προσδιορισμός του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας ( $k_d$ ) και του δείκτη αιθριότητας ( $k_t$ ).

**Δείκτης αιθριότητας** ( $k_t$ ) ονομάζεται ο λόγος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο ( $I$ ) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ( $I_0$ ).

$$k_t = \frac{I}{I_0} \quad (2.8)$$

Το **ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας** ( $k_d$ ), ισούται με το λόγο της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $I_d$ ) προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία ( $I$ ), δηλαδή:

$$k_d = \frac{I_d}{I} \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιώντας δεδομένα απο μετρητικούς σταθμούς στην Ελλάδα εκτιμάται η τιμή του δείκτη αιθριότητας απο τις σχέσεις και οπότε με εφαρμογή της εξίσωσης (2.10) προσδιορίζεται η τιμή της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας ( $I_d$ ):

$$\text{➤ } k_d = \frac{I_d}{I} = 1 - 0.249k_t, \text{ για } k_t \leq 0,35$$

$$\text{➤ } k_d = \frac{I_d}{I} = 1,557 - 1,84k_t, \text{ για } 0,35 \leq k_t \leq 0,75$$

$$\text{➤ } k_d = \frac{I_d}{I} = 0,177, \text{ για } k_t \geq 0,75$$

Η άμεση ωριαία ακτινοβολία προκύπτει από την διαφορά της διάχυτης ωριαία ακτινοβολίας από την ολική ωριαία ακτινοβολία.

$$I_b = I - I_d \quad (2.11)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή της ημερίσιας τιμής διάχυτης ακτινοβολίας ( $H_d$ ).

$$\text{➤ } k_d = \frac{H_d}{H} = 0,99, \text{ για } k_t \leq 0,17$$

$$\text{➤ } k_d = \frac{H_d}{H} = 1,188 - 2,27k_t + 9,473k_t^2 - 21,865k_t^3 + 14,647k_t^4, \text{ για } 0,17 \leq k_t \leq 0,75$$

$$\text{➤ } k_d = \frac{H_d}{H} = -0,177k_t + 0,632, \text{ για } 0,75 \leq k_t \leq 0,8$$

$$\text{➤ } k_d = \frac{H_d}{H} = 0,2, \text{ για } k_t \geq 0,8$$

Όπου:  $k_t = \frac{H}{H_0}$

Η άμεση ημερίσια ακτινοβολία προκύπτει από την διαφορά της διάχυτης ημερίσιας ακτινοβολίας από την ολική ημερίσια ακτινοβολία.

$$H_b = H - H_d \quad (2.12)$$

### 2.6.2 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες :

- την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο
- τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο
- την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής

Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί το επίπεδο εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που " βλέπει " το επίπεδο. Έπειτα απ' αυτά για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής.

Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ή **γεωμετρικός παράγοντας ( $R_b$ )**, είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ( $I_{b,\beta}$ ), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο ( $I_b$ ):

$$R_b = \frac{I_{b,T}}{I_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (2.13)$$

Για κεκλιμένη επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό ο γεωμετρικός παράγοντας δίνεται από την εξίσωση:

$$R_b = \frac{[\cos(\varphi-\beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega] + [\sin(\varphi-\beta) \cdot \sin\delta]}{(\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega) + (\sin\varphi \cdot \sin\delta)} \quad (2.14)$$

Ακολουθώντας για τον προσδιορισμό της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο βάσει των τιμών της διάχυτης και ολικής στο οριζόντιο επίπεδο, χρησιμοποιείται το **ισοτροπικό μοντέλο**. Πιο συγκεκριμένα, η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία υπολογίζεται βάσει του ισοτροπικού μοντέλου υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισοτροπική. Η ανακλώμενη διάχυτη ακτινοβολία ( $I_r$ ) υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_r = 0,5 \cdot I \cdot \rho(1 - \cos\beta) \quad (2.15)$$

Όπου  $\rho$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους και διάφορες τιμές του δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Φρέσκο χιόνι	0,87
Ξηρή άμμος	0,18
Υγρή άμμος	0,09
Δάσος κωνοφόρων	0,05
Τσιμέντο νέο	0,33
Τσιμέντο παλιό	0,23

Πίνακας 2.3 - Αντανакλαστικότητα για διάφορα τύπη εδάφους

Για τη διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας ( $I_s$ ), που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, το ισοτροπικό μοντέλο θεωρεί ότι προέρχεται ομοιόμορφα από τον ουράνιο θόλο και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I_s = 0,5 \cdot I_d (1 - \cos\beta) \quad (2.16)$$

Συνεπώς η συνολική διάχυτη ακτινοβολία σε μία κεκλεισμένη επιφάνεια είναι το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών και υπολογίζεται απο την εξίσωση:

$$I_{d,T} = I_r + I_s \quad (2.17)$$

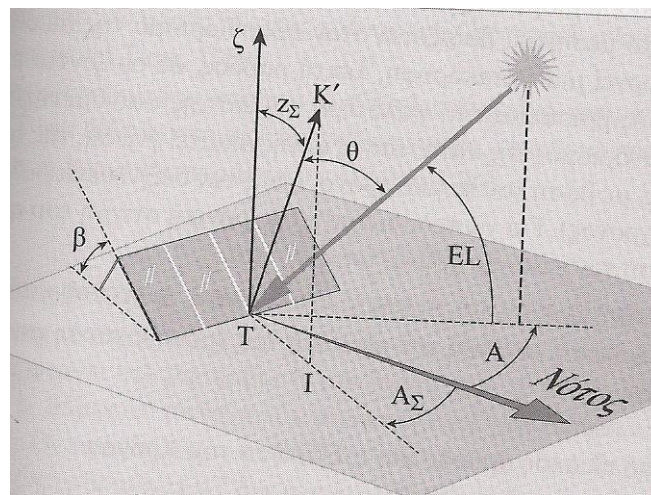
Συμπερασματικά, η ολική ακτινοβολία σε κεκλειμένο επίπεδο υπολογίζεται κατα προσέγγιση απο την εξίσωση:

$$I_T = I_{d,T} + I_{s,T} + I_{r,T} = I_b \cdot r_b + 0,5 \cdot I_d (1 + \cos\beta) + 0,5 \cdot I \cdot \rho (1 - \cos\beta) \quad (2.18)$$

## 2.7 Κλίση και προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη

**Ηλιακός συλλέκτης** είναι μια επιφάνεια με συγκεκριμένες διαστάσεις που σκοπός της είναι να συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Πολύ σημαντικό ρόλο, στην αποδοτικότερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας απο ένα συλλέκτη, παίζει ο προσανατολισμός του ως προς τον ηλιακό νότο, ο οποίος αντιστοιχεί στη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο μεσημβρινό του συγκεκριμένου τόπου.

Ας θεωρήσουμε ένα επίπεδο συλλέκτη, τοποθετημένο έτσι ώστε το επίπεδο του να σχηματίζει γωνία  $\beta$ , προς τον ορίζοντα (σχήμα 2.6). Η γωνία κλίσης του συλλέκτη,  $\beta$ , ισούται με την ζενίθια γωνία  $Z_\Sigma$ , της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη ( $TK'$ ), η οποία μπορεί να πάρει τιμές απο  $0^\circ$  έως και  $180^\circ$ .



Σχήμα 2.6 - Η γωνία  $\theta$ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης  $TK'$  στο συλλέκτη, μια δεδομένη χρονική στιγμή, καθορίζεται απο τον προσανατολισμό του συλλέκτη και τις συντεταγμένες της θέσης του ήλιου ως προς το σύστημα του παρατηρητή, στο σημείο T, δηλαδή το αζιμούθιο A και το ύψος του EL

Η στροφή του συλλέκτη, ώστε αυτός να παρακολουθεί κάθε στιγμή τον ήλιο, γίνεται με μηχανισμούς, οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις, με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία  $\theta$  που σχηματίζουν μια δεδομένη στιγμή οι ηλιακές ακτίνες, με την κάθετη σε ένα επίπεδο συλλέκτη (σχήμα 2.6), γωνίας κλίσης  $\beta$  και αζιμουθιάς γωνίας  $A_{\Sigma}$  δίδεται από την σχέση:

$$\cos\theta = \cos EL \cdot \sin\beta \cdot \cos(A - A_{\Sigma}) + \sin EL \cdot \cos\beta \quad (2.19)$$

Όπου  $A$  το αζιμούθιο και  $EL$  το ύψος του ήλιου την ίδια χρονική στιγμή

Βασικά στοιχεία καθορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη είναι η γωνία κλίσης και το αζιμούθιο του, μετρούμενο ως προς την κατεύθυνση του Νότου. Η κατεύθυνση αυτή χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη τιμή απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια μιας αίθριας μέρας. Η μέθοδος προσδιορισμού του αληθινού Νότου σε ένα τόπο, με βάση το ηλιακό μεσημέρι βασίζεται στο προσδιορισμό της διεύθυνσης της σκιάς που δημιουργεί μια κατακόρυφη λεπτή ράβδος, σε οριζόντιο επίπεδο, τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της φαινομένης ημερήσιας τροχιάς του. Για να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή του ηλιακού μεσημεριού, με βάση τον επίσημο χρόνο, απαιτούνται:

- i. η ζώνη πολιτικού χρόνου και το γεωγραφικό μήκος του τόπου και
- ii. η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση του χρόνου, για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. Πρώτα επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα και η θέση του συλλέκτη επηρεάζει τον συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και το συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.

Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία Νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία γωνία  $30^{\circ}$  ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι  $45^{\circ}$  ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες π.χ. ξενοδοχεία η κλίση λαμβάνεται μικρότερη περίπου  $25^{\circ}$ . Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

Τέλος, η τοποθέτηση τους είναι πολύ σημαντική και συμβάλλει στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συλλέκτη. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

τοποθετούνται στο έδαφος, σε οριζόντιες στέγες, σε κεκλιμένες στέγες, σε στέγαστρα και σε προσόψεις κτιρίων.

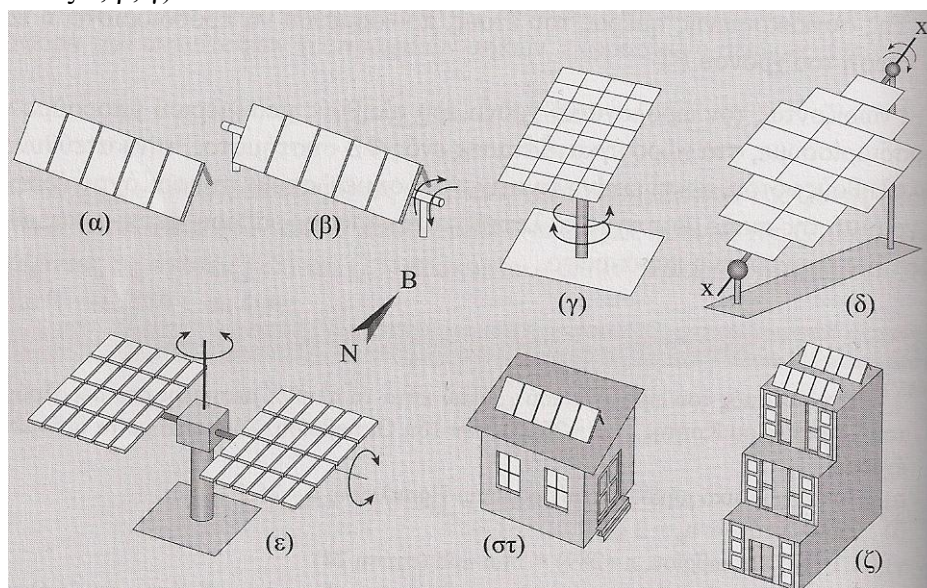
## 2.8 Τρόποι στήριξης των ηλιακών συλλεκτών

Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης ηλιακών συλλεκτών.

1. Σταθερής στήριξης
2. Εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης
3. Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη και συνεχώς παρακολούθησης της θέσης του ήλιου με διάταξη που ονομάζεται **ηλιοτρόπιο ή tracker**.

### 2.8.1 Σταθερή στήριξη ηλιακών συλλεκτών

Η απουσία κινητών μερών κατά τη στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια. (σχήμα 2.7 περιπτώσεις α, β, γ).



Σχήμα 2.7 - Διάφορες περιπτώσεις τοποθέτησης ηλιακών συλλεκτών

Η πιο απλή περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία ο χώρος εγκατάστασης της συστοιχίας των συλλεκτών, δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο προσανατολισμό για τη συστοιχία και γωνία κλίσης κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης (σχήμα 2.7α).

## 2.8.2 Εποχιακά ρυθμιζόμενη στήριξη ηλιακών συλλεκτών

Όπως και στην περίπτωση συλλέκτη σταθερής κλίσης όλο το έτος, έτσι και στην περίπτωση επιλογής χειμερινής και θερινής θέσης, η επιλογή της βέλτιστης γωνίας για το συλλέκτη σε κάθε περίοδο, απαιτεί γνώση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών (υγρασία, θερμοκρασία, ηλιοφάνεια, άνεμος) και της μορφολογίας και κάλυψης του εδάφους, που καθορίζει την διάχυτη ανακλαστικότητα του (albedo).

## 2.8.3 Στήριξη με δυνατότητα στροφής των ηλιακών συλλεκτών (trackers)

### A) Στροφή γύρω από ένα άξονα

Η συστοιχία περιστρέφεται με κατάλληλο μηχανισμό, γύρω από ένα άξονα, στο τέλος δε της ημέρας, ο συλλέκτης επιστρέφει σε θέση αναμονής, συνήθως στο νοτιά. Το πρωί με την ανατολή του ηλίου, στρέφεται, έτσι ώστε ο ήλιος να αποδίδει το μέγιστο τη διαθέσιμη ενέργεια. Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- Αξιμουθιακό ηλιοτρόπιο: Η περιστροφή γίνεται ως προς κατακόρυφο άξονα (σχήμα 2.7γ), έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την κάθετη στο συλλέκτη, του οποίου η γωνία κλίσης παραμένει σταθερή κατά την ημερήσια κίνησή του.
- Ηλιοτρόπιο οριζόντιου άξονα: Διακρίνονται σε αυτά με οριζόντιο άξονα κατα τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης και σε εκείνα με άξονα κατα τη διεύθυνση Βορρά-Νότου. Στην δεύτερη περίπτωση δίνεται μια μικρή γωνία κλίσης στο άξονα  $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ , με το χαμηλότερο σημείο προς το νότο.
- Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα: Η συστοιχία έχει τη δυνατότητα στροφής γύρω από τον άξονα  $xx'$ , με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (σχήμα 2.7ε). Έτσι κατα την διάρκεια της ημέρα, ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα  $xx'$ .

### B) Στροφή γύρω από δύο άξονες

Η παρακολούθηση του ήλιου με περιστροφή γύρω από δύο άξονες, επιτυγχάνεται μέσω δύο διαδοχικών κινήσεων του συλλέκτη με ηλεκτρικούς κινητήρες, είτε συνεχούς περιστροφής είτε βηματικούς κινητήρες, με μειωτήρες και έλεγχο των στροφών, για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα στην απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (σχήμα 2.7ε). Ο προσδιορισμός των κατάλληλων γωνιών στροφής γίνεται με ειδικές διατάξεις (encoders), η λειτουργία των οποίων βασίζεται, είτε σε οπτική διάταξη καταμέτρησης οπών, είτε σε ηλεκτρικό ροοστάτη, περιστροφικής λειτουργίας. Όμοιο μηχανικό σύστημα, σε πολύ μικρότερες διαστάσεις, χρησιμοποιείται για τη στροφή του πυρηλιομέτρου, οπτικού οργάνου παρακολούθησης του ήλιου και καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της απευθείας

ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάταξη αυτή, ονομάζεται **ηλιοτρόπιο (tracker) δύο αξόνων**.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

# **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

### **3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Η οπτικο-ηλεκτρική συμπεριφορά του ημιαγωγού, εκφράζεται μακροσκοπικά με τη χαρακτηριστική ιδιότητα της φωτοαγωγιμότητας του. Όταν ένας ημιαγωγός φωτίζεται, άγει με πολλές τάξεις ισχυρότερο ρεύμα απ' ό,τι όταν βρίσκεται στο σκοτάδι. Το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται από το ημιαγωγικό υλικό και τη συχνότητα της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η υψηλή φωτοαγωγιμότητα ενός ημιαγωγού, παρ' ό,τι αποτελεί βασικότατη προϋπόθεση για να δημιουργηθεί αξιόλογο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δεν αρκεί. Οι ευκίνητοι ηλεκτρικοί φορείς που παράγονται στο εσωτερικό του, πρέπει να τεθούν σε κίνηση, μέσω μηχανισμού που δεν θα απαιτεί ενέργεια από εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Ευτυχώς, ο μηχανισμός αυτός προσφέρεται από την ίδια την φύση. Είναι το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στις επαφές δύο διαφορετικών υλικών. Αυτό το πεδίο μπορεί να κινήσει του φωτοδημιουργούμενους ηλεκτρικούς φορείς. Το εύρος της περιοχής του, καθορίζει, ως ένα βαθμό, το αποδοτικό ποσοστό του απορροφούμενου φωτός και, κατά συνέπεια, το ποσοστό των φωτοδημιουργούμενων φορέων που θα δώσουν το φωτοβολταϊκό ηλεκτρικό ρεύμα.

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, μπορούμε να σχηματοποιήσουμε τις προϋποθέσεις δημιουργίας του Φ/Β φαινομένου, ως εξής:

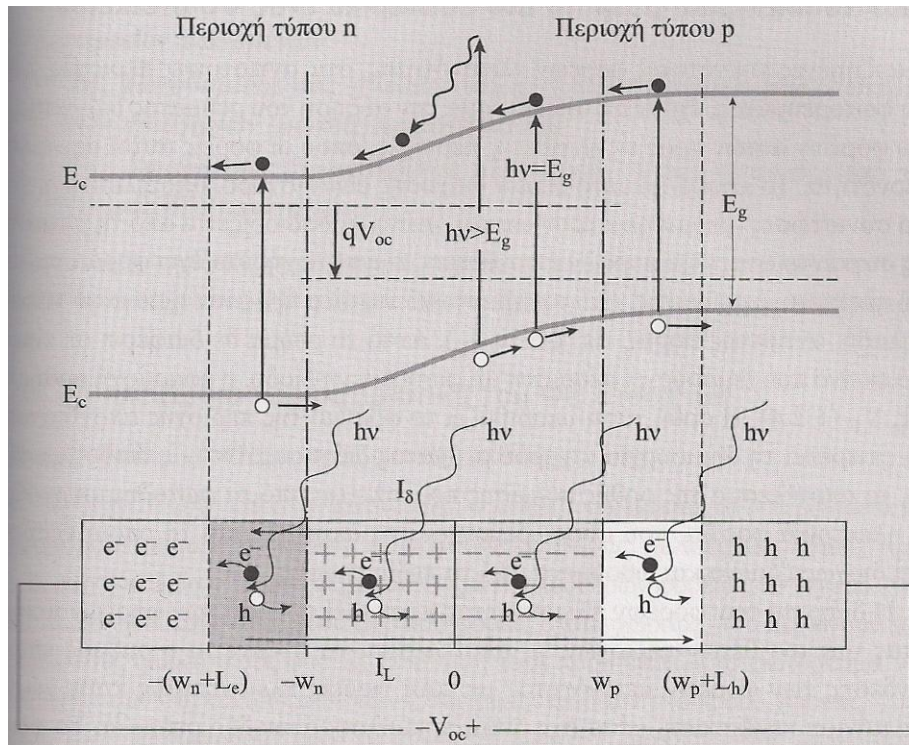
**"Για να προκύψει φωτοβολταϊκό (Φ/Β) φαινόμενο, απαιτείται η δημιουργία διάταξης δύο φωτοαγώγιμων ημιαγωγικών υλικών σε επαφή και η έκθεσής της στο φως."**

Στο εσωτερικό της ημιαγωγικής επαφής δημιουργούνται, ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, με δύο βασικούς τρόπους:

- Με τη δράση εξωτερικού φωτισμού, κατάλληλου μήκους κύματος
- Θερμικά, εξαιτίας του ότι η διάταξη βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία

Μεταξύ αυτών, διακρίνουμε τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, που δημιουργούνται, αφενός μέσα στην περιοχή επαφής, όπου υπάρχει το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (περιοχή απογύμνωσης), αφετέρου, έξω απ' αυτήν αλλά πολύ κοντά στα σύνορα των περιοχών τύπου n και p αντίστοιχα (σχήμα 3.1). Πολλοί από τους φορείς αυτούς έχουν πολύ μεγάλη πιθανότητα να φτάσουν στις περιοχές όπου υπερτερούν οι όμοιοι προς αυτούς φορείς (φορείς πλειονότητας). Εκεί μπορούν να

παραμένουν ως ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς, αφού η πιθανότητα να συναντήσουν φορέα μειονότητας και να επανασυνδεθούν, είναι πολύ μικρή. Οι υπόλοιποι θα συναντήσουν, μέσα στο χρόνο επανασύνδεσης, αντίθετο φορέα, με τον οποίο θα επανασυνδεθούν και άρα δε συμβάλουν τελικά στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος, μέσα στην ημιαγωγική διάταξη. Η παρουσία πλεγματικών ατελιών λειτουργεί αρνητικά, αυξάνοντας την πιθανότητα επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών και κατά συνέπεια, μειώνοντας το χρόνο ζωής των ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα 3.1-Ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n, κατά την διάρκεια φωτισμού της

Η περιοχή τύπου n έχει ως φορείς πλειονότητας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αντίστοιχα, η περιοχή τύπου p, τις οπές. Οι πρόσθετοι φορείς, φορτίζουν τους χώρους στους οποίους φτάνουν, με πλεονάζοντα φορτία. Το δυναμικό στο χώρο p, λόγω των επιπλέον οπών, γίνεται θετικότερο, ως προς το αντίστοιχο του χώρου n, όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, με την επίδραση του ισχυρού πεδίου, αποτελεί ρεύμα, με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή, από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p. Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **φωτορεύμα  $I_L$**  (σχήμα 3.1).

Το πλήθος των φορέων που συμβάλλουν στο φωτορεύμα, είναι μέρος εκείνων, που δημιουργεί το φως σ'όλο τον όγκο της ημιαγωγικής διάταξης, ίσο πρακτικά, με τους φορείς οι οποίοι, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, καταλήγουν στα μεταλλικά ηλεκτρόδια της διάταξης.

Συνεπώς, η τιμή του φωτορεύματος είναι ευθέως ανάλογη του πλήθους των απορροφούμενων φωτονίων, των οποίων η συνολική ενέργεια, ανα μονάδα χρόνου και επιφάνειας, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

$$I_L = e \cdot g \cdot (L_h + L_e) \quad (3.1)$$

Όπου

-e: στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

-g: ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας

- $L_e$ ,  $L_h$ : τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα

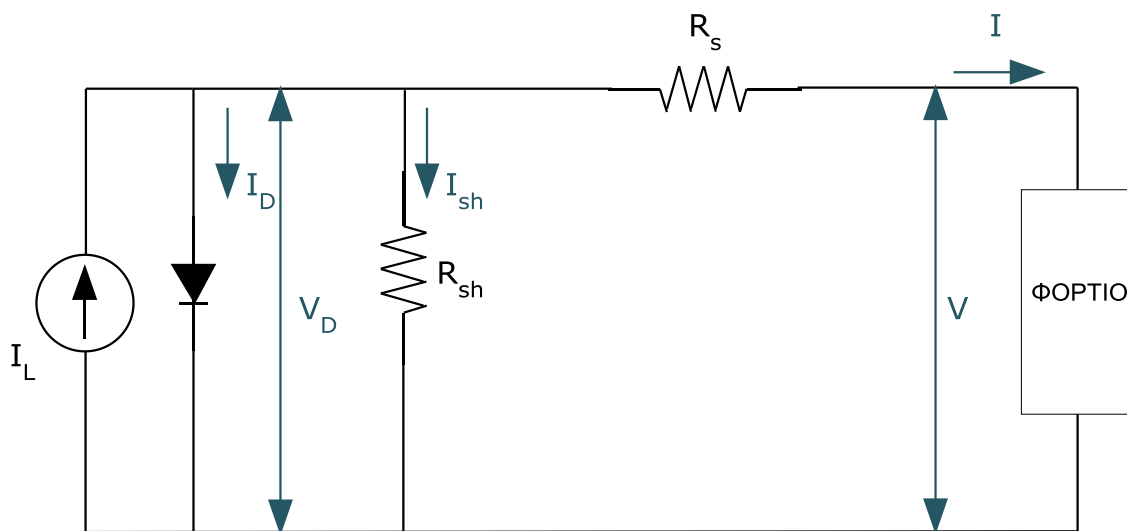
Συμπερασματικά λοιπόν:

- Το φωτορεύμα  $I_L$ , είναι ευθείως ανάλογο της πυκνότητας της ισχύος  $E$  ( $W/m^2$ ), της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην ημιαγωγική διάταξη καθώς και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.
- Τα φωτοδημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, μέσα και κοντά στην περιοχή της επαφής της διάταξης, ωθούνται από το υφιστάμενο εκεί ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, στους χώρους όπου υπερτερούν οι όμοιοι τους ηλεκτρικοί φορείς (φορείς πλειονότητας του χώρου). Το ισχυρό φωτορεύμα διατηρεί τις συγκεντρώσεις των φορέων πλειονότητας σε κάθε πλευρά, σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα απ' ό,τι κατά την απουσία φωτός, προσδίδοντας στη διάταξη χαρακτηριστικά πηγής ηλεκτρικής ενέργειας και όχι απλά αισθητήρα.

## 3.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείου

### 3.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται στο σχήμα 3.2. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος ( $I_L$ ) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του Φ/Β στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός, την αντίσταση απωλιών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη, στα άκρα της δίοδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Σχήμα 3.2-Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου

- **Παράλληλη αντίσταση διαρροής,  $R_{sh}$  (shunt resistance)**

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της δίοδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα:

- Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
- Διαμέσου ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμείξεις της επαφής
- Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής

Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι μεγαλύτερη των 1000  $\Omega$ .

- **Σειριακή αντίσταση  $R_s$  (series resistance)**

Η σειριακή αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή:

- Κατά τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα απο το σώμα της διόδου
- Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους

Τυπικές τιμές, για κάθε ποιότητας Φ/Β στοιχεία είναι απο 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

- **Χαρακτηριστική εξίσωση Φ/Β στοιχείου**

Βασιζόμενοι στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου, (σχήμα 3.2), η πλήρης εξίσωση μεταξύ έντασεως και τάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος στη έξοδο του Φ/Β δίνεται ως εξής:

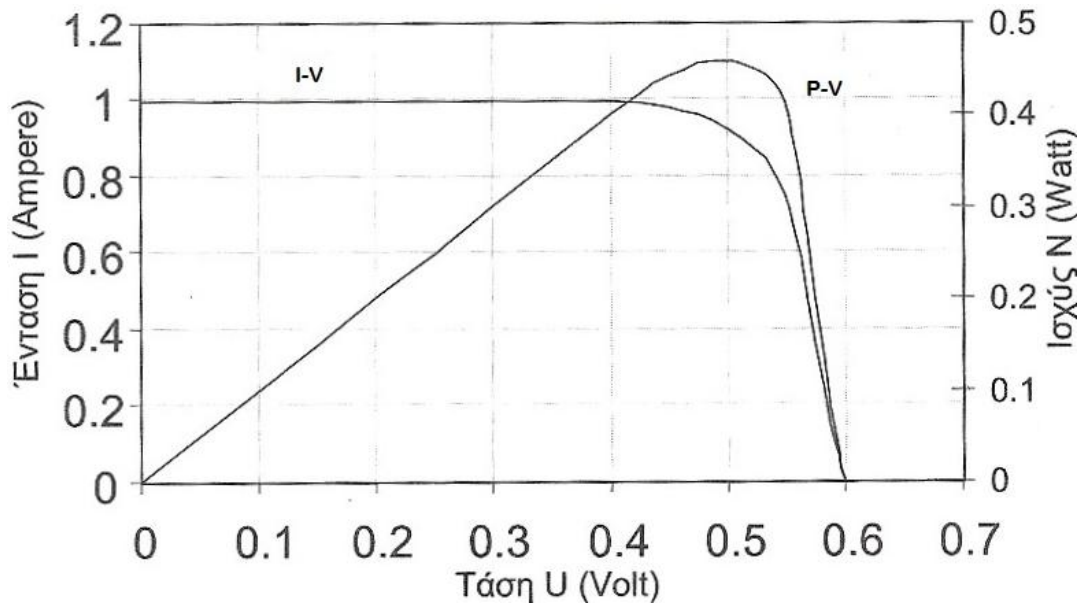
$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V+I \cdot R_s}{\alpha} \right)} - 1 \right] - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

Όπου:

- $I_L$ : το φωτορεύμα (A)
- $I_0$ : το ρεύμα κόρου της διόδου πόλωσης (A)
- $R_s$ : η αντίσταση σειράς (Ω)
- $R_{sh}$ : η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση διαρροής του Φ/Β (Ω)
- $\alpha = n \cdot k \cdot T$ : η θερμική τάση σε Volt (όπου n: σταθερά με τιμές 1 και 2, k: σταθερά του Boltzmann ίση με  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K, T: απόλυτη θερμοκρασία

### 3.2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης-τάσης (I-V) Φ/Β στοιχείου

Συνδέοντας το Φ/Β σε κύκλωμα που παραμβάλλεται ωμικό φορτίο (R), παρατηρείται μεταβολή της τάσης V συναρτήσεως της τιμής της αντίστασης απο το μηδέν έως την τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) (σχήμα 3.3). Παράλληλα με την αύξηση της αντίστασης η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή μέχρι ενός σημείου, ενώ στην συνέχεια μειώνεται απότομα. Η καμπύλη (I-V) του σχήματος 3.3 αποτελεί τυπική χαρακτηριστική Φ/Β στοιχείων ακτινοβολίας (G) και της θερμοκρασίας του πλαισίου.



Σχήμα 3.3-Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V ενός Φ/Β στοιχείου

**Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ )**, είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του στοιχείου, όταν δεν ενώνονται μεταξύ τους ή ενώνονται με τη βοήθεια μιας πολύ μεγάλης αντίστασης. Η σχέση που δίνει την τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3.3)$$

Όπου k: η σταθερά του Boltzmann

Τιμές της παράλληλης αντίστασης χαμηλότερες των 500 Ω, προκαλούν έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο μειώνεται η  $R_{sh}$ .

**Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ )**, είναι το ρεύμα που δίνει το στοιχείο, όταν τα άκρα του βραχυκυκλώνονται, δηλαδή ενώνονται με σύρμα μηδενικής αντίστασης. Για πολύ μικρή τιμή της σειριακής αντίστασης το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το φωτορεύμα ( $I_L = I_{sc}$ ).

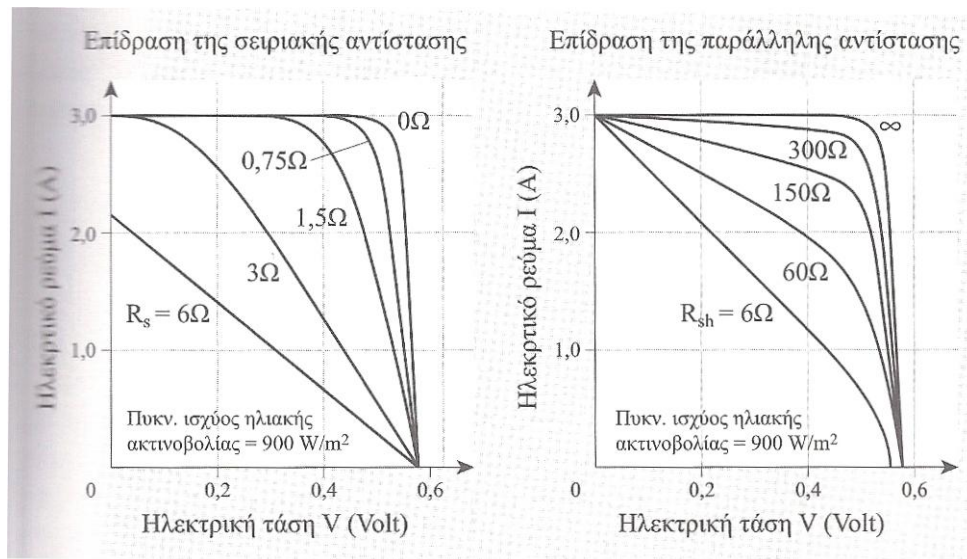
**Σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος, ΣΜΙ (Maximum power point, MPP)** προσδιορίζεται, αν παραστήσουμε γραφικά την παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ από ένα Φ/Β στοιχείο, υπο δεδομένη πυκνότητα ισχύος, E, πάνω σε μία μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση, ως συνάρτηση της τάσης V, στα άκρα του φορτίου. Παρουσιάζει ένα μέγιστο, που όπως διακρίνεται από τα διαγράμματα I-V και P-V, εντοπίζεται στο "γόνατο" της καμπύλης I-V όπου αρχίζει η έντονη πτώση της έντασης του ρεύματος (σχήμα 3.5).

Είναι προφανές πως, για αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του Φ/Β στοιχείου, πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή, που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του Φ/Β στοιχείου, έτσι ώστε

η τάση και το ρεύμα σ' αυτόν να αντιστοιχούν στο ΣΜΙ. Οι τιμές ρεύματος-τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με  $I_m$  και  $V_m$ . Η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να δώσει το Φ/Β στοιχείο, υπο δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας  $E$ , ισούται με:

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (3.4)$$

Η σειριακή και η παράλληλη αντίσταση σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο επιδρούν σημαντικά στην τιμή της μέγιστης ισχύος που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο (σχήμα 3.4).



Σχημα 3.4-Επίδραση της σειριακής και της παράλληλης αντίστασης σε ένα Φ/Β στοιχείο

### 3.2.3 Καμπύλη φορτίου

Μια χρήσιμη γραφική παράσταση, η οποία ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τα διαγράμματα I-V της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί μια διάταξη αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ μια ωμική αντίσταση, μια ηλεκτρική κινητήρια μηχανή κ.α), είναι η **καμπύλη φορτίου (ή φορτίο)**. Είναι η καμπύλη που προκύπτει ως γραφική παράσταση, του ρεύματος (I), που διαρρέει τη διάταξη, σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στην είσοδο της ηλεκτρική τάση (V). Η θεωρητική εξάρτηση του  $I=f(V)$  για το φορτίο προκύπτει με εφαρμογή των κανόνων Kirchhoff, στο αντίστοιχο κύκλωμα.

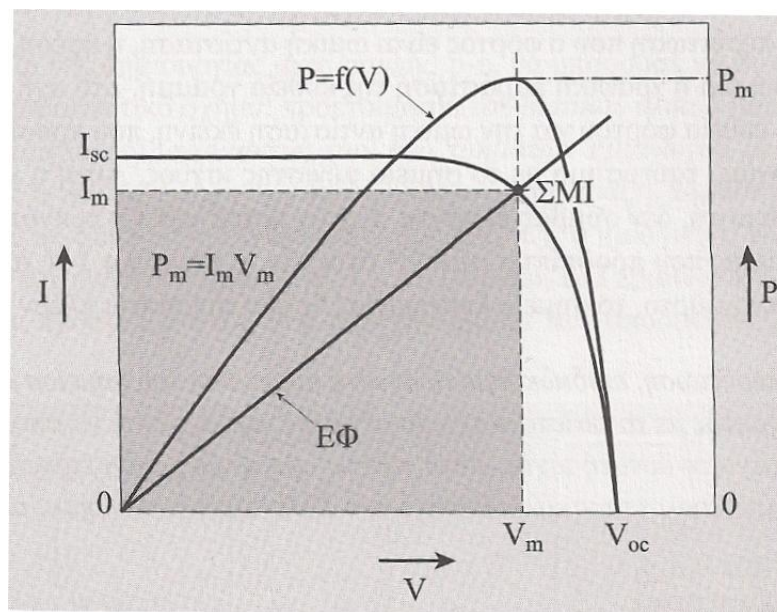
Πειραματικώς, η εξάρτηση του ρεύματος από την τάση προκύπτει με μέτρηση του ρεύματος (I), που διαρρέει το φορτίο και της τάσης στην είσοδο του.

Η καμπύλη φορτίου, τοποθετημένη στο διάγραμμα I-V του Φ/Β στοιχείου, τέμνει την χαρακτηριστική καμπύλη του, σε ένα σημείο, που αποτελεί κοινή λύση για τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο καμπύλες. Το σημείο αυτό καθορίζει το ρεύμα και την τάση στο φορτίο και ονομάζεται **σημείο λειτουργίας** του συστήματος. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμική αντίσταση, η σχέση  $I=f(V)$ , είναι αναλογική

και η γραφική παράσταση της ευθεία γραμμής. Στο σχήμα 3.5, έχει σχεδιαστεί η ευθεία φορτίου για την ωμική αντίσταση εκείνη, που προσδιορίζει σημείο λειτουργίας, ταυτόσημο με το σημείο μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Αυτή η κατάσταση, παρ' ότι επιθυμητή, δεν συμβαίνει πάντα. Για παράδειγμα αν μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο Φ/Β στοιχείο, η καμπύλη I-V αλλάζει και, για το δεδομένο φορτίο, το σημείο λειτουργίας δεν θα συμπίπτει πλέον με το ΣΜΙ.

**"Σε κάθε περίπτωση, επιδιώκουμε τη συνεχή σύμπτωση του σημείου λειτουργίας του συστήματος με το εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος, ώστε να αποδίδεται στο φορτίο η μέγιστη δυνατή ισχύς."**

Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων, παρακολούθησης του ΣΜΙ, όταν οι συνθήκες αλλάζουν.



Σχήμα 3.5-Ευθεία φορτίου (ΕΦ) και σημείο μέγιστης μεταφοράς ισχύος σε γραφικές παραστάσεις I-V και P-V

### 3.2.4 Ισχύς αιχμής

Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά μεγέθη των Φ/Β στοιχείων (τάση ανοικτού κυκλώματος, ρεύμα βραχυκύκλωσης, απόδοση κ.α) επιτρέπεται ο έλεγχος της αποδοτικότητας ενός Φ/Β στοιχείου κάτω ύπο ορισμένες συνθήκες, που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς οι ακόλουθες πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός Φ/Β στοιχείου (Standard Test Conditions, STC).

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου

- i. Θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου  $\theta_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- ii. Κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην όψη του Φ/Β στοιχείου

- iii. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέσμης παραλλήλων ακτίνων, πυκνότητας ισχύος  $E_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5

Σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της *ισχύος αιχμής* ( $P_p$ ), ως χαρακτηριστικό του Φ/Β στοιχείου, η δε μονάδα της στο SI, γράφεται εμφατικά  $W_p$  (Watt Peak).

**Ισχύς αιχμής (Peak Power)**, ενός Φ/Β στοιχείου είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω άπο τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC,  $P_p = P_{m,STC}$ ). Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται ομοίως, για το χαρακτηριστικό ενός Φ/Β πλαισίου ή Φ/Β συστοιχίας. Αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό στοιχείο με βάση το οποίο προσδιορίζεται το μέγεθος της Φ/Β συστοιχία ενός Φ/Β συστήματος.

### 3.2.5 Παράγοντας πλήρωσης και βαθμός απόδοσης του Φ/Β στοιχείου

Το διαγραμμισμένο παραλληλόγραμμο μέσα στην καμπύλη I-V (σχήμα 3.5), με πλευρές  $I_m$  και  $V_m$ , έχει εμβαδόν ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ από το Φ/Β στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού προς το εμβαδόν ενός άλλου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του Φ/Β στοιχείου, ως πηγή σταθερού ρεύματος, δίνει το μέτρο προσέγγισης αυτής της λειτουργίας της επαφής. Αυτό το πηλίκο ονομάζεται **παράγοντας πλήρωσης, FF (Fill Factor)** και οι τιμές του, που καθορίζονται από το υλικό του Φ/Β στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.5)$$

Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων  $0-V_{oc}$ . Σε αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση εν σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7-0,9 χαρακτηρίζουν Φ/Β στοιχεία με αποδέκτη έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση, αντίστοιχα.

Θεωρώντας ότι πάνω στην επιφάνεια ενός Φ/Β στοιχείου εμβαδού  $S$ , προσπίπτει ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ( $P_a = E \cdot S$ , όπου  $E$ , η πυκνότητα ισχύος της). Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος ( $P_m$ ), που αποδίδεται από το Φ/Β στοιχείο, στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας,  $P_a$ , καθορίζει τον **βαθμό απόδοσης ενέργειακής μετατροπής (energy conversion efficiency),  $\eta_c$** , του Φ/Β στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_m}{P_a} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_a} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_a} \quad (3.6)$$

Ο βαθμός απόδοσης του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό, αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας ( $E$ ) και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

### 3.3 Τρόποι σύνδεσης Φ/Β στοιχείων

Τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό, κατά τον τρόπο σύνδεσης των ηλεκτρικών πηγών. Η σύνδεση σε σειρά,  $N$  ομοίων Φ/Β στοιχείων, οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{t,oc} = N \cdot V_{oc}$ ). Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως ισούται με το αντίστοιχο του ενός ( $I_{t,sc} = I_{sc}$ ).

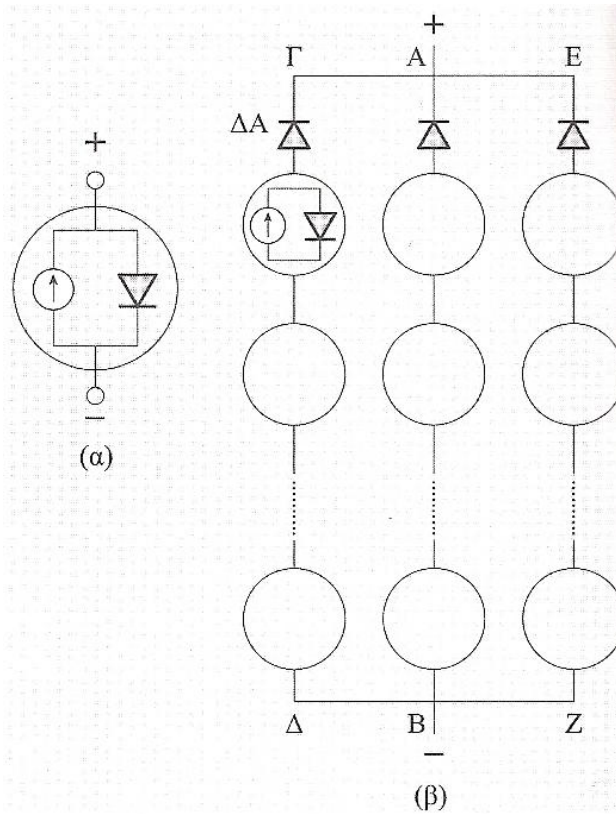
Η παράλληλη σύνδεση  $N$  ομοίων Φ/Β στοιχείων, δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{t,oc} = V_{oc}$ ), ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ισούται με  $N$  φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης έκαστου ( $I_{t,sc} = N \cdot I_{sc}$ , σχήμα 3.6β). Αν τα συνδεόμενα Φ/Β στοιχεία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ( $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ ), τότε η συνολική διάταξη των  $N$  στοιχείων παρουσιάζει σημαντική απόκλιση. Στην περίπτωση της εν σειρά σύνδεσης, το στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης επιβάλλει στο κύκλωμα, το δικό του ρεύμα (σχήμα 3.7).

Η χαρακτηριστική καμπύλη  $I$ - $V$ , για δύο Φ/Β στοιχεία μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής. Το σημείο που αντιστοιχεί σε ανοικτό κύκλωμα (σχήμα 3.7α), έχει τάση:

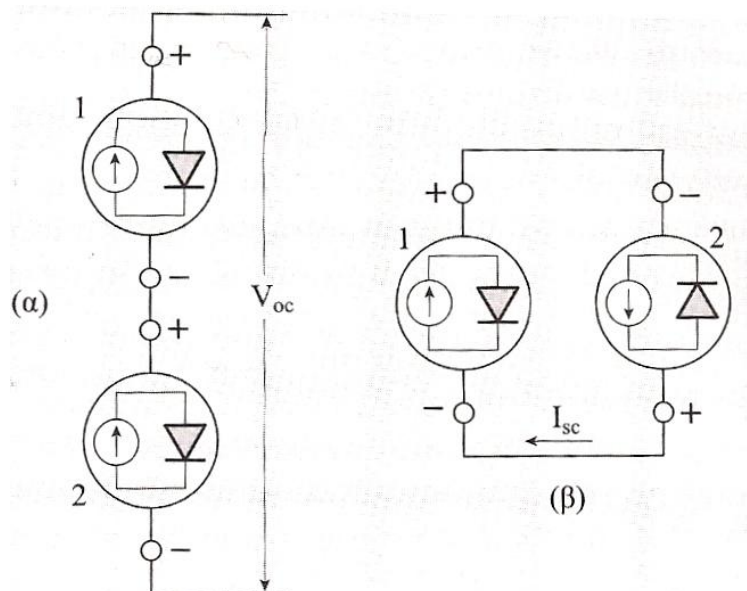
$$V_{oc} = V_{oc,1} + V_{oc,2} \quad (3.7)$$

Όπου:  $V_{oc,1}$  και  $V_{oc,2}$ , οι τάσεις ανοιχτού κυκλώματος έκαστου.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος προκύπτει, λαμβάνοντας υπ' όψην πως το καθένα από τα δύο πολώνει το άλλο σε ανάστροφη τάση (σχήμα 3.7β).

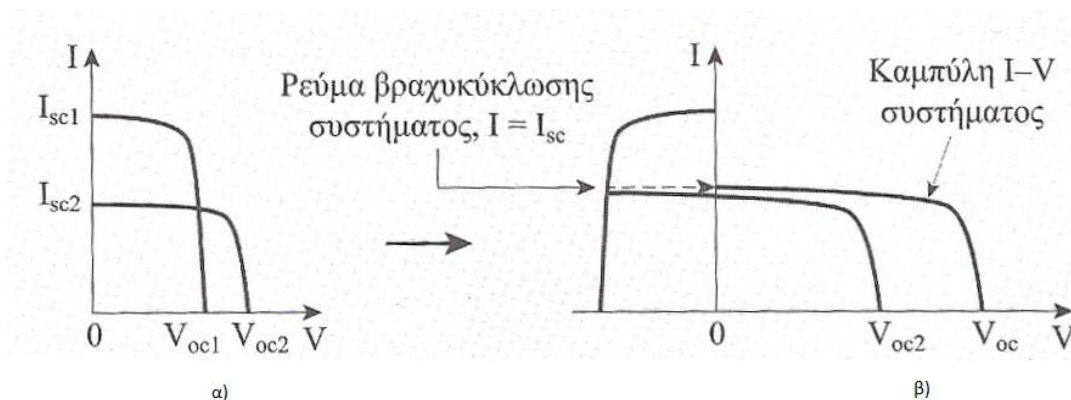


Σχημα 3.6- (α) Ισοδύναμο ηλεκτρονικό διάγραμμα Φ/Β στοιχείου, (β) Φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα δημιουργώντας μια συστοιχία



Σχημα 3.7- (α) Παραστατικό διάγραμμα σύνδεσης εν σειρά, (β) Το Φ/Β στοιχείο 1, πολώνει ανάστροφα το στοιχείο 2

Το σημείο τομής των δύο καμπυλών αντιστοιχεί στο ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, όταν η αντίσταση φορτίου είναι μηδενική. Αυτό είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σύστημα των δύο Φ/Β στοιχείων. Άρα όταν το σύστημα συνδεθεί στα άκρα μιας μεταβλητής αντίστασης, για  $R=0$  έχουμε την κατάσταση βραχυκύκλωσης και για  $R=\infty$ , έχουμε την κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Οι ενδιάμεσες τιμές  $I$ ,  $V$ , αντιστοιχούν στην καμπύλη του σχήματος 3.8α, η οποία είναι ίδια με αυτή του Φ/Β στοιχείου 2, αλλά έχει μετατοπιστεί έτσι ώστε να περατούται στο  $V_{oc}$ . Η συνολική καμπύλη χαρακτηρίζεται από μέγιστο ρεύμα, ελάχιστο μεγαλύτερο του ρεύματος βραχυκύκλωσης του Φ/Β με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης (σχήμα 3.8β). Συνεπώς σε κύκλωμα σε σειρά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων, εκείνο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος.



Σχήμα 3.8- (α) Χαρακτηριστικές και των δύο Φ/Β στοιχείων, (β) Καμπύλη I-V συστήματος

### 3.4 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

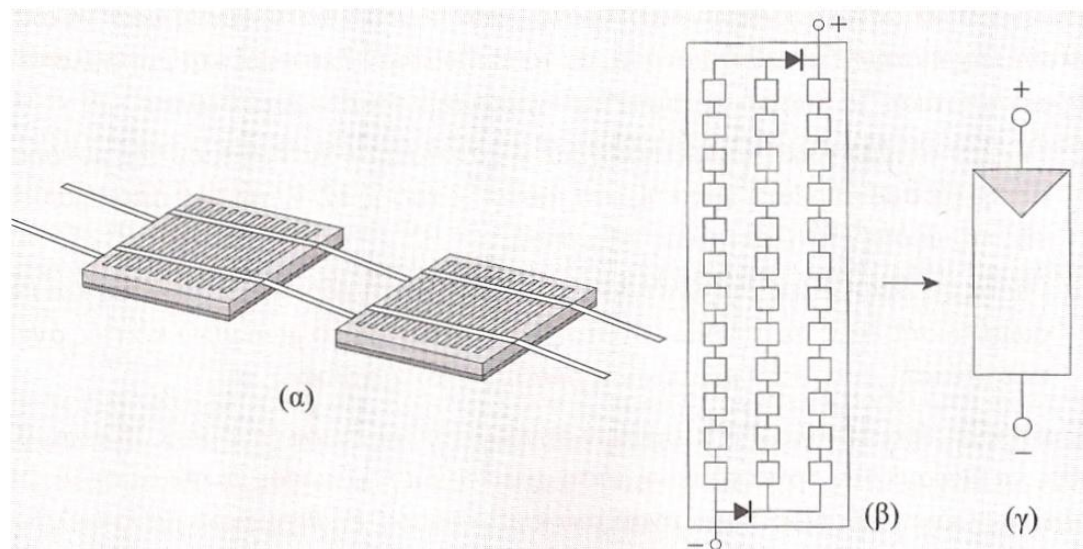
#### 3.4.1 Η έννοια του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά (σχήμα 3.9α και β), ώστε να εμφανίζουν συγκεκριμένη τάση ανοιχτού κυκλώματος, τοποθετούνται, σε επίπεδη γυάλινη πλάκα, υψηλής διαφάνειας, προσαρμοσμένης σε μεταλλικό πλαίσιο, υψηλής αντοχής, συνήθως από ανοδιωμένο αλουμίνιο. Η τελική κατασκευή πληρεί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και επιπλέον την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία.

Η διάταξη αυτή αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα (module) και ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πλαίσιο (photovoltaic module)**. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα κάθε μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή, της **φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array)**. Σπανιότερα

χρησιμοποιείται ο όρος **φωτοβολταϊκή γεννήτρια (photovoltaic generator)**.

Τυπικές τιμές ισχύος αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου στο εμπόριο κυμαίνονται απο μερικά  $W_p$  έως τα  $150 W_p$ . Διατίθενται επίσης σε μεγαλύτερες διαστάσεις, με περισσότερα Φ/Β στοιχεία, σε σειρά και παράλληλη εσωτερική σύνδεση, με τη μορφή σύνθετων διατάξεων, που χαρακτηρίζονται απο υψηλή ισχύ αιχμής και συνήθως υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος, κατάλληλες για ειδικές εφαρμογές. Το σύμβολο ηλεκτρολογικής σχεδίασης φαίνεται στο σχήμα 3.9γ.



Σχίμα 3.9- (α) Τρόπος σύνδεσης Φ/Β στοιχείων σε ένα Φ/Β πλαίσιο, (β) Εσωτερική δομή ενός Φ/Β πλαισίου, (γ) Ηλεκτρολογικό σύμβολο Φ/Β πλαισίου

Η αρχική μορφή των Φ/Β πλαισίων στο πλαίσιο ήταν κυκλική, με αποτέλεσμα να μένει αρκετή μη ενεργός επιφάνεια του πλαισίου. Σήμερα, τα Φ/Β στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β πλαίσια, έχουν τετραγωνικό σχήμα (mc-Si) ή τετραγωνικό με κομμένες τις γωνίες (κυψελίδες c-Si) ώστε να ελαχιστοποιείται η μη αξιοποιήσιμη επιφάνεια του πλαισίου.

### 3.4.2 Θερμική συμπεριφορά Φ/Β πλαισίου

Σε κάθε Φ/Β πλαίσιο, εκτός των στοιχείων που αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου, STC (ισχύς  $P_p$ , τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ ), αναγράφεται η θερμοκρασία, την οποία αποκτά το Φ/Β πλαίσιο ευρισκόμενο σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, που προσεγγίζουν μια μέση πραγματική κατάσταση. Η θερμοκρασιακή αυτή περιοχή ( $45-50^{\circ}C$ ), αφορά, προσεγγιστικά, τη μέση θερμοκρασιακή κατάσταση του υλικού του Φ/Β στοιχείου του πλαισίου, στο χρονικό διάστημα 2-3 ώρες πριν και μετά το μεσημέρι μιας αίθριας καλοκαιρινής ημέρας, σε μέσα γεωγραφικά πλάτη. Χαρακτηρίζεται ως **ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β κυψελίδας (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT)** και προσδιορίζεται κάτω απο τις επόμενες συνθήκες:

- Το Φ/Β πλαίσιο βρίσκεται σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος

- Μέση ταχύτητα ανέμου: 1 m/s
- Η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας:  $G_{\text{NOCT}}=800 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα:  $\theta_a=20^\circ\text{C}$

Όταν το Φ/Β πλαίσιο παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα σε φορτίο, σε συνθήκες ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα και ταχύτητας ανέμου, στις συνθήκες ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας Φ/Β κυψελίδας (NOCT), τότε η θερμοκρασία του,  $\theta_c$ , είναι λίγο μικρότερη ( $\sim 3^\circ\text{C}$ ), σε σχέση μ'αυτή που αντιστοιχεί σε κατάσταση ανοχτού κυκλώματος. Η ελάττωση αυτή αιτιολογείται με βάση τη διατήρηση της ενέργειας. Χαμηλή ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β κυψελίδας, αποτελεί ένδειξη ταχύτερης αποβολής προς το περιβάλλον, του μέρους εκείνου της ηλιακής ακτινοβολίας, που συμβάλει, ουσιαστικά, στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Συνεπώς, όσο μικρότερη η τιμή της για ένα πλαίσιο, τόσο μικρότερη η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με άλλο, ίδιας ισχύος αιχμής, του οποίου όμως, η θερμοκρασία NOCT είναι μεγαλύτερη.

Για την αποτελεσματικότερη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς, επειδή το Φ/Β πλαίσιο είναι ενθυλακώμενο χρησιμοποιούνται όργανα καταγραφής της υπέρυθρης ακτινοβολίας για την μέτρηση της θερμοκρασίας πλάτης του Φ/Β στοιχείου (π.χ υπέρυθρη κάμερα (IR camera), θερμόμετρο επαφής κ.α).

### 3.4.3 Απόδοση του Φ/Β πλαισίου

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου, εμβαδού  $S$ , προσδιορίζεται από το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος ( $P_m$ ), προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο, ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $E \cdot S$  (όπου  $E$ , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου):

$$\eta_m = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (3.8)$$

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης εξαρτάται από:

- τις φυσικές ιδιότητες των υλικών παρασκευής
- την θερμοκρασία των κυψελίδων
- την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Η τιμή αναφοράς του καθορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, η τιμή του καθορίζεται από τη διαφορά  $\theta_c - \theta_{\text{STC}}$ , των θερμοκρασιών της κυψελίδας στη δεδομένη κατάσταση φωτισμού και στην κατάσταση STC ( $25^\circ\text{C}$ ), αντίστοιχα καθώς και από την πυκνότητα ισχύος  $E$ , της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

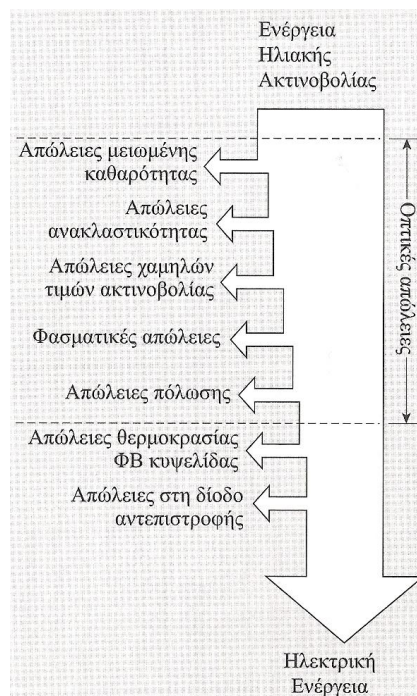
Η απόδοση του Φ/Β πλαισίου είναι μικρότερη της αντίστοιχης του Φ/Β στοιχείου εργαστηριακής παρασκευής. Οι βασικότεροι λόγοι είναι οι εξής:

- η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου
- η ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των Φ/Β στοιχείων που συνθέτουν το Φ/Β πλαίσιο και
- η μη πλήρης κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του απο επιφάνεια Φ/Β στοιχείων, η οποία καθορίζεται απο τον παράγοντα κάλυψης (packing factor)

Η αναπτυσσόμενη υψηλή θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων του πλαισίου, οι καταστάσεις θερμής κηλίδας (hot-spot), η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό τους και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής της Φ/Β κυψελίδας, μειώνουν σταδιακά την ενεργειακή απόδοσή τους. Το μέγεθος της επίδρασης εξαρτάται απο το υλικό του Φ/Β στοιχείου τον τύπο του και τη διαχρονική αξιοπιστία της μηχανικής κατασκευής και των ηλεκτρολογικών και μονωτικών υλικών. Επίσης, σκόνης και άλλα σωματίδια στην επιφάνεια όψης των πλαισίων, μειώνουν την απόδοσή τους.

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης του Φ/Β πλαισίου ( $\eta_m$ ), καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από τη τιμή  $\eta_{m,STC}$ , που προσδιορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Σε συντομία, οι απώλειες αυτές αφορούν:

- στη γήρανση του Φ/Β πλαισίου, δηλαδή στη μείωση της απόδοσης του λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των κυψελίδων του Φ/Β πλαισίου
- στις απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας κυψελίδας, που προκύπτουν λόγω της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασίας περιβάλλοντα αέρα, των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου σε σχέση με αυτά των πρότυπων συνθηκών
- στις απώλειες στη *δίοδο αντεπιστροφής* του Φ/Β πλαισίου, η οποία είναι μια δίοδος που αποτρέπει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου της Φ/Β συστοιχίας όταν αυτή δεν φωτίζεται



Σχημα 3.10- Ροή ενέργειας και απώλειες σε ένα Φ/Β πλαίσιο

### 3.4.4 Επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει αξιοσημείωτα την απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου είναι η **θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων** του. Έχει μετρηθεί ότι κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα Φ/Β στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Αν  $T_C$  είναι η θερμοκρασία του στοιχείου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εξαρτάται αυτή γραμμικά από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_a$ ) και την ηλιακή ακτινοβολία ( $G$ ), ως εξής:

$$T_C = T_a + h_w \cdot G \quad (3.9)$$

Όπου  $h_w$ : είναι ένας χαρακτηριστικός συντελεστής των Φ/Β πλαισίων, με τιμή  $h_w = 0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ .

Αυτό συνεπάγεται ότι ένα Φ/Β πλαίσιο που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ , θα έχει θερμοκρασία κατά  $30^\circ\text{C}$  μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία ακόμα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου και γίνεται καλύτερη απαγωγή θερμότητας όσο η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Ως γενικός κανόνας στους υπολογισμούς Φ/Β εγκαταστάσεων, που επαληθεύεται και από μετρήσεις σε πραγματικές εγκαταστάσεις, λαμβάνεται συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β πλαισίου κατά  $30^\circ\text{C}$  από αυτή του περιβάλλοντος. Αν υποθέσουμε ότι  $\eta_{m,STC}$  είναι η απόδοση του Φ/Β πλαισίου σε πρότυπες καταστάσεις λειτουργίας, τότε για να υπολογιστεί η απόδοση σε οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία χρειάζεται ένας διορθωτικός θερμοκρασιακός συντελεστής ( $\sigma_\theta$ ), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\theta = 1 - (T_c - 25) \cdot 0,004 \quad (3.10)$$

Η σχέση αυτή ισχύει για τα συμβατικά στοιχεία πυριτίου και υποδηλώνει μείωση της απόδοσης κατά  $0,004$  ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία των  $25^\circ\text{C}$ . Τελικά η απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία προκύπτει:

$$\eta_m = \sigma_\theta \cdot \eta_{m,STC} \quad (3.11)$$

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η **ρύπανση της επιφάνειάς** τους από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού κ.α. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή εύκολα να τη ξεπλύνει. Επομένως είναι σημαντικό όταν η φ/β γεννήτρια πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια περιοχή, που εκτιμάται ότι η ρύπανσή της θα είναι σημαντική να προβλεφθεί στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση

στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας ( $\sigma_p$ ). Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_p$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ. Τελικά η απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψη την ρύπανση της επιφάνειάς του, προκύπτει:

$$\eta_m = \sigma_p \cdot \eta_{m,k} \quad (3.12)$$

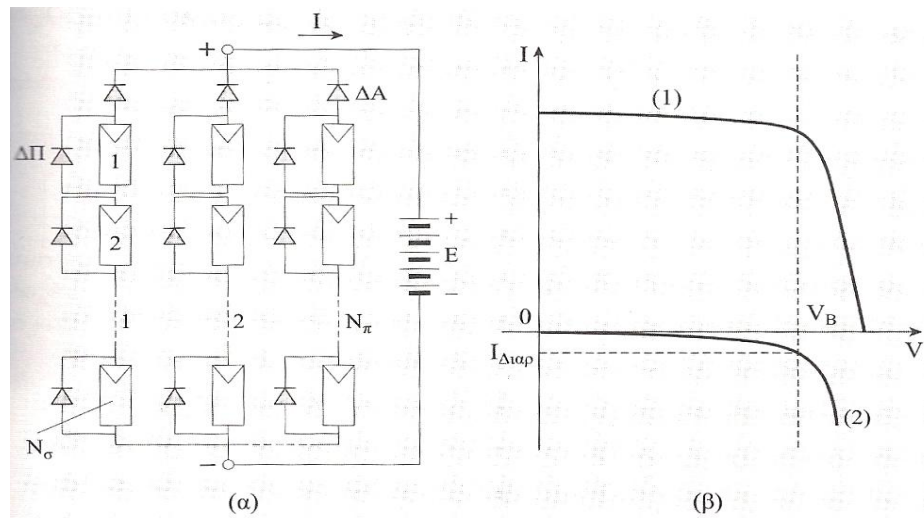
Όπου  $\eta_{m,k}$ : η απόδοση του Φ/Β στοιχείου όταν είναι καθαρό

### 3.4.5 Προβλήματα σκίασης ή βλάβης των Φ/Β πλαισίων

Ένα Φ/Β πλαίσιο αποτελείται από Φ/Β στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή βλάβη ενός και μόνο Φ/Β στοιχείου του, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρίστευση του. Μία σκιασμένη επιφάνεια συμπεριφέρεται, κατά βάση, όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις άλλες, τις "υγιείς", μόνες τους ή σε συνδυασμό με την τάση των συσσορευτών, στους οποίους πιθανόν να συνδέονται, μια υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα Φ/Β στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση, μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της (breakdown).

Στην πράξη, για τα τυπικά Φ/Β πλαίσια, η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδει ενέργεια, που προσφέρουν οι υπόλοιπες. Παρατεταμένος σκιασμός της, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπόλοιπων κυψελίδων, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήτευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης ενός καταστραμμένου στοιχείου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κατάσταση "θερμής κηλίδας" (hot spot).

Για την αποτροπή του φαινομένου αυτού, το Φ/Β πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους, οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων του πλαισίου, ακόμη και αν κάποιο Φ/Β στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί. Οι διόδους αυτοί ονομάζονται **δίοδοι παράκαμψης (bypass diodes)**. Τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεων, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του Φ/Β πλαισίου. Σε περιπτώσεις που είναι πιθανή παροδική, μερική σκίαση μέρους των Φ/Β πλαισίων μιας συστοιχίας, καθένα απ' αυτά παραλληλίζεται, με διόδους παράκαμψης (σχήμα 3.11α).



Σχημα 3.11- (α) Φ/Β συστοιχία, με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσορευτές. Τα Φ/Β πλαίσια κατανέμονται σε  $N_{\pi}$  ισοδύναμους κλάδους, συνδεδεμένους παράλληλα, καθένας απο τους οποίους αποτελείται απο  $N_{\sigma}$  Φ/Β στοιχεία σε σειρά. Διακρίνονται οι δίοδοι απομόνωσης ( $\Delta A$ ) και οι δίοδοι παράκαμψης ( $\Delta \Pi$ ), (β) Καμπύλες I-V Φ/Β συστοιχίας (1) υπο φωτισμό, (2) για σκοτάδι

Τα Φ/Β πλαίσια μιας Φ/Β συστοιχίας, συνδέονται έτσι ώστε να σχηματίζουν παράλληλους κλάδους, που καταλήγουν, μέσω του φορτιστή, στον συσσορευτή. Προκειμένου να αποκλιστεί, αφενός η εκφόρτιση του συσσορευτή μέσω των Φ/Β πλαισίων του κλάδου, κατα τη διάρκεια της νύχτας, αφετέρου η κυκλοφορία ρευμάτων που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους, κάθε κλάδος εφοδιάζεται με μια **δίοδο αντεπιστροφής ή απομόνωσης (blocking or isolation diode, σχήμα 3.11α)**, τοποθετημένη στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου. Αν οι γραμμές μεταφοράς από κάθε κλάδο καταλήγουν σε κεντρικό κιβώτιο, τότε σ'αυτό τοποθετούνται και οι δίοδοι αντεπιστροφής. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν δίοδοι αντεπιστροφής, το ρεύμα διαρροής της εγκατάστασης,  $I_{\Delta\text{ιαρ}}$  (σχήμα 3.11β), προσδιορίζεται απο την επιβαλλόμενη στο Φ/Β συγκρότημα τάση ορθής πόλωσης, δηλαδή, την τάση  $V_B$ , του συσσορευτή, κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η παρουσία της δίοδου αντεπιστροφής μηδενίζει το ρεύμα διαρροής τις νυχτερινές ώρες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για λόγους περιορισμού των πτώσεων τάσης στα κυκλώματα σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων και στις γραμμές μεταφοράς και άρα των αντίστοιχων καταναλώσεων, προτιμούνται οι δίοδοι Schottky, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρότερη τάη λειτουργίας σε ορθή πόλωση (περίπου 0,3 V), σε αντίθεση με τις κοινές δίοδους πυριτίου (περίπου 0,7 V).

## 3.5 Τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων

### 3.5.1 Φ/Β πλαίσια Πυριτίου

Το πιο διαδεδομένο υλικό στο κρυσταλλικό Φ/Β στοιχείο είναι το πυρίτιο το οποίο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στη γή μετά το οξυγόνο. Στην άμμο, το πυρίτιο περιέχεται με την μορφή οξειδίου ( $\text{SiO}_2$ ) και με διαδοχικές εργασίες καθαρισμού του προκύπτει το πυρίτιο (Si) με υψηλή καθαρότητα (99,9%). Τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής τους:

#### A) Κρυσταλλικού πυριτίου (single-crystal silicon)

Το βασικό υλικό αυτού του είδους είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και έχει σχετικά μεγάλο πάχος. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο τα άτομα είναι τοποθετημένα σε ορισμένη κανονική δομή που επαναλαμβάνεται σε όλο το στερεό (σχήμα 3.6). Η απόδοση τους σε μορφή κυψέλης είναι 21-24% ενώ με τη μορφή Φ/Β πλαισίου είναι μεταξύ 13-16% και έχει υψηλό κόστος κατασκευής.

#### B) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multicrystalline silicon)

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Αυτό το είδος αποτελείται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10-55  $\mu\text{m}$ . Η κρυσταλλική δομή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου δεν είναι η ίδια σε όλο το στερεό αλλά παίρνει διαφορετικό προσανατολισμό σε διάφορες περιοχές του στερεού που χωρίζονται μεταξύ τους με συγκεκριμένες νοητές γραμμές (σχήμα 3.7). Στην επιφάνεια της κυψέλης διακρίνονται διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όρια των περιοχών αυτών αποτελούν θέσεις παγίδευσης. Άρα όσο μικρότερο είναι το μήκος των οριακών περιοχών τόσο καλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους. Η απόδοση κυμαίνεται από 17-20% σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10-14% σε βιομηχανική μορφή Φ/Β πλαισίου. Ακόμα χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα ενώ το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό.

#### Γ) Αμόρφου πυριτίου (Amorphous silicon)

Πρόκειται για τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων με πολύ χαμηλό κόστος παρασκευής λόγω της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επιστρώμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους. Στα Φ/Β πλαίσια αμόρφου πυριτίου τα άτομα καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις και η δομή τους είναι τελείως ακανόνιστη (σχήμα 3.8). Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6-8%. Η

τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων Φ/Β στοιχείων με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Για παράδειγμα παρασκευάζονται Φ/Β στοιχεία από κράμα πυριτίου με άνθρακα και γερμάνιο, τριών επαφών, a-SiGe (1,4 eV), a-SiC(1,85 eV), με σταθερή απόδοση 13%. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών Φ/Β στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες πλαισίων.



Σχημα 3.12-Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου

#### Δ) Φ/Β στοιχεία ταινίας (ribbon silicon).

Δημιουργείται λεπτή ταινία από τηγμένο υλικό. Είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση κοντά στο 13%, έχει πολύ υψηλό κόστος και περιορισμένη βιομηχανική παραγωγή.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων, που χρησιμοποιούν Φ/Β πλαίσια διαφορετικών στοιχείων πυριτίου.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Μονοκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό	Αμόρφου πυριτίου
Απόδοση (%)	12-19	12-19	4-7
Μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για σύστημα με νότιο προσανατολισμό και βέλτιστη κλίση (kWh/m <sup>2</sup> )	160-185	130-160	65-140
Απαιτούμενη επιφάνεια (m <sup>2</sup> ) ανά kW <sub>p</sub>	7-8	8-10	10-20
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kgCO <sub>2</sub> /kW <sub>p</sub> )	1300	1300	1300-1400

Πίνακας 3.1- Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων για διαφορετικά είδη Φ/Β πλαισίων

### 3.5.2 Φ/Β πλαίσια άλλων υλικών

Εκτός από τα Φ/Β πλαίσια πυριτίου, τα οποία αποτελούν και τα πιο διαδεδομένα σήμερα στο κόσμο, κατασκευάζονται Φ/Β πλαίσια και από άλλα υλικά, τα οποία προς το παρόν εμφανίζουν μειονεκτήματα που περιορίζουν την χρήση τους. Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα πιο σημαντικά απ' αυτά τα Φ/Β στοιχεία, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του.

Υλικό	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<i>Δισεληνοειδιούχος Χαλκός (CIS)</i>	Άμεσο ενεργειακό διάκενο. Εργαστηριακή απόδοση 12-13%. (Βελτίωση των απόδοσης με προσθήκη Γαλλίου στο 17%). Απόδοση βιομηχανικού πλαισίου 8-11%	Χαμηλό κόστος παρασκευής, σταθερότητα ισοδύναμη του μονοκρυσταλλικού Πυριτίου	Χαμηλή απόδοση
<i>Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)</i>	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο	Εξαιρετική εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών
<i>Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)</i>	Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση $\approx 25\%$ . Χρησιμοποιείται για διαστημικές εφαρμογές	Υψηλή απόδοση βιομηχανικού Φ/Β πλαισίου	Υψηλό κατασκευαστικό κόστος
<i>Θειούχος Χαλκός-Θειούχο Κάδμιο (Cu<sub>2</sub>S/CdS)</i>	Πολυκρυσταλλικό. Απόδοση $\approx 10\%$	Χαμηλό κόστος κατασκευής	Μεταβλητή απόδοση

Πίνακας 3.2- Φ/Β πλαίσια λεπτών επιστρώσεων

### 3.7 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η ισχύουσα σήμερα νομοθεσία δεν προβλέπει την υποχρεωτική συλλογή και ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών (κάτι που σχεδιάζει και υλοποιεί εθελοντικά η βιομηχανία φωτοβολταϊκών μέχρι να γίνει υποχρεωτικό κάτι τέτοιο από τη νομοθεσία). Συγκεκριμένα, η ευρωπαϊκή βιομηχανία φωτοβολταϊκών έχει δεσμευτεί να συλλέγει το 65% κατ'ελάχιστον των φωτοβολταϊκών που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη από το 1990 και να ανακυκλώνει το 85% των υλικών (Πρωτοβουλία PVCYCLE).

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών τεχνολογίας πυριτίου και τελουριούχου καδμίου (CdTe) η υποχρέωση ανακύκλωσης αποτελεί ήδη πάγια πρακτική. Με την προμήθεια των πλαισίων αυτών, ο τελικός χρήστης δεσμεύεται με συμβόλαιο να παραδώσει τα φωτοβολταϊκά στην κατασκευάστρια εταιρία μετά τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους, η δε κατασκευάστρια εταιρία δεσμεύεται να τα ανακυκλώσει και να ανακτήσει το CdTe. Στην αρχική τιμή των πλαισίων αυτών περιλαμβάνεται και το κόστος συλλογής και ανακύκλωσης, έστω κι αν κάτι τέτοιο θα συμβεί μετά από 20-30 χρόνια. Έχει δημιουργηθεί μάλιστα και ειδικό ασφαλιστικό ταμείο το οποίο διασφαλίζει τη συλλογή και ανακύκλωση των πλαισίων ακόμη και αν εν τω μεταξύ εκλείψουν οι κατασκευάστριες εταιρίες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΑ ΖΕΥΓΗ

### 4.1 Τι είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος;

Οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν συνήθως το δίκτυο μιας εταιρίας παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ ΔΕΗ) ως κύρια πηγή για την τροφοδότηση της εγκατάστασης τους. Η εταιρία αυτή προσφέρει μονοφασικό και τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, ημιτονοειδούς μορφής με ονομαστικές τιμές:

*Συχνότητα (f) 50Hz, Ενεργό τιμή τάσης ( $V_{rms}$ ) φασική 230V/πολική 400V*

Υπάρχουν εφαρμογές στην πράξη, στις οποίες δεν επιτρέπεται ούτε η παραμικρή διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως π.χ:

- σε ευαίσθητες βιομηχανικές και στρατιωτικές εγκαταστάσεις
- σε δορυφορικούς σταθμούς
- στα χειρουργεία ενός νοσοκομείου
- στα on-line συστήματα των τραπεζών κ.λ.π

Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις που το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ Δ.Ε.Η) για πολλούς και διάφορους λόγους δεν μπορεί να μας εξυπηρετήσει, όπως συμβαίνει για παράδειγμα:

- σε μικρές (ορεινές ή νησιωτικές κυρίως) και απομονωμένες περιοχές
- στις υπαίθριες συναυλίες και εκδηλώσεις
- σε απομονωμένα οικίες
- σε κατασκηνώσεις κ.τ.λ

Για να περιορισθούν ή να μηδενισθούν τα παραπάνω προβλήματα που οφείλονται σε ακατάλληλη τάση, συχνότητα και σε διακοπές της κύριας ηλεκτρικής πηγής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ειδικά ζεύγη μηχανών, μιας κινητήριας μηχανής και μιας ηλεκτρογεννήτριας που μας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, τα οποία λέγονται **ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (Η/Ζ)**.

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος είναι ανεξάρτητη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται:

- ως εφεδρική πηγή στις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν ως κύρια πηγή το δίκτυο μιας εταιρίας (π.χ ΔΕΗ) και τροφοδοτεί μέρος ή ολόκληρη την

ηλεκτρική εγκατάσταση ενός κτιρίου, όταν η τάση και η συχνότητα γίνουν ακατάλληλες ή διακοπεί η παροχή από την κύρια πηγή

- ως κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις όπου δεν φθάνει το δίκτυο της εταιρίας διανομής και
- σε ειδικές περιπτώσεις, παράλληλα με το δίκτυο της εταιρίας διανομής, για να καλύψει την αιχμή του φορτίου της ηλεκτρικής εγκατάστασης



Σχήμα 4.1-Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

## 4.2 Βασικά μέρη ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους

Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους είναι η σύγχρονη γεννήτρια, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης, ο πίνακας ελέγχου και μεταγωγής ισχύος και η βάση στήριξης.

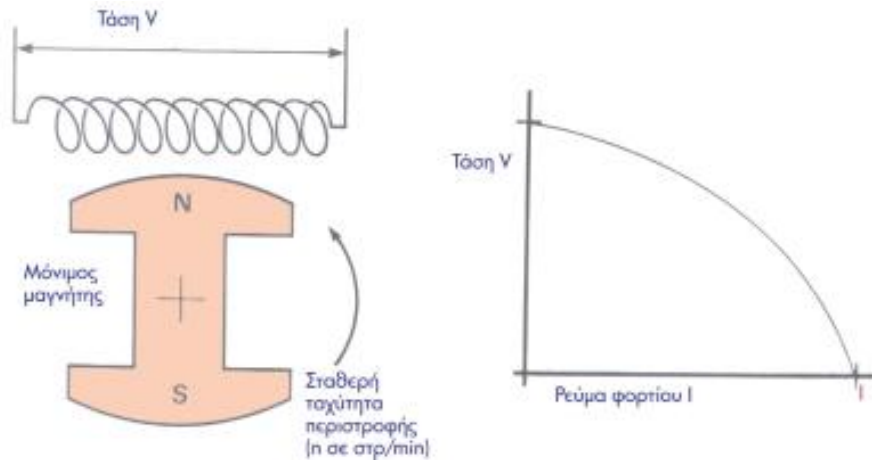
### 4.2.1 Σύγχρονη Γεννήτρια

Στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (H/Z) χρησιμοποιούνται **σύγχρονες γεννήτριες** εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του κινητήρα σε ηλεκτρική.

Η πιο απλή μορφή γεννήτρια φαίνεται στο σχήμα 4.2 και αποτελείται από έναν αγωγό σε μορφή πηνίου (επαγωγικό τύλιγμα ή τύλιγμα τυμπάνου) και ένα μόνιμο μαγνήτη (διέγερση), ο οποίος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα.

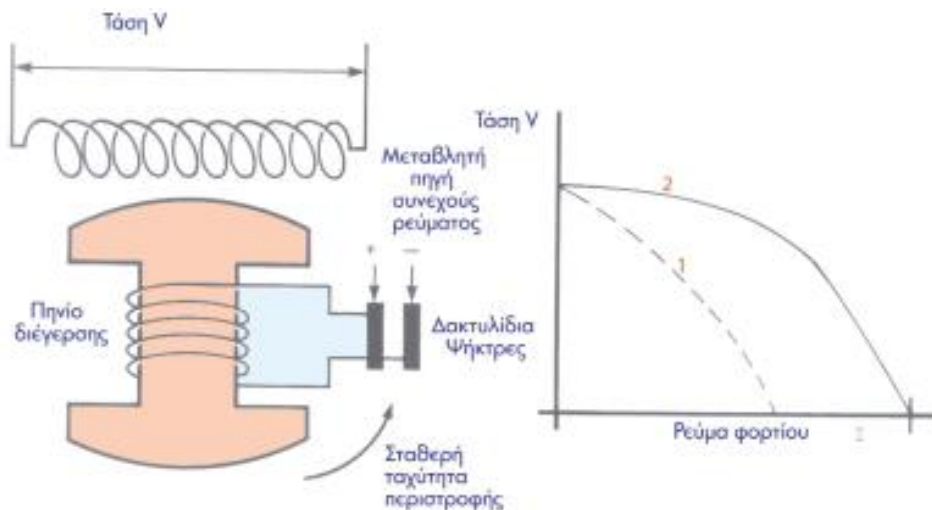
Στον αγωγό, λόγω του φαινομένου της επαγωγής, παράγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση). Εάν στον αγωγό δεν είναι συνδεδεμένο φορτίο, η τάση παραμένει σταθερή, επειδή η ένταση του μαγνητικού πεδίου παραμένει σταθερή. Εάν εφαρμόσουμε φορτίο στον αγωγό το ρεύμα που ρέει σε αυτό προκαλεί πτώση τάσης,

όπως φαίνεται και στην καμπύλη ρεύματος φορτίου-τάσης γεννήτριας που ονομάζεται **χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας** (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2-Γεννήτρια με διέγερση μόνιμου μαγνήτη και η χαρακτηριστική φορτίου της

Για να διατηρείται σταθερή η τάση της γεννήτριας, πρέπει για κάθε μεταβολή του φορτίου να μεταβάλλεται αντίστοιχα και η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Για να μπορούμε να μεταβάλουμε το μαγνητικό πεδίο, αντί για μόνιμο μαγνήτη χρησιμοποιούμε ηλεκτρομαγνήτη, δηλαδή πηνίο στο οποίο ρέει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (σχήμα 4.3). Το πηνίο αυτό ονομάζεται **πηνίο διέγερσης**. Μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος που ρέει στο πηνίο διέγερσης, μεταβάλλεται και η ένταση του μαγνητικού πεδίου και με τον τρόπο αυτό διατηρούμε σταθερή την τάση (σχήμα 4.3 καμπύλη 2), ενώ με σταθερή ένταση του πεδίου έχουμε την καμπύλη 1 (σχήμα 4.3). Επομένως, για τη σταθεροποίηση της τάσης χρειάζεται εξωτερική μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος.



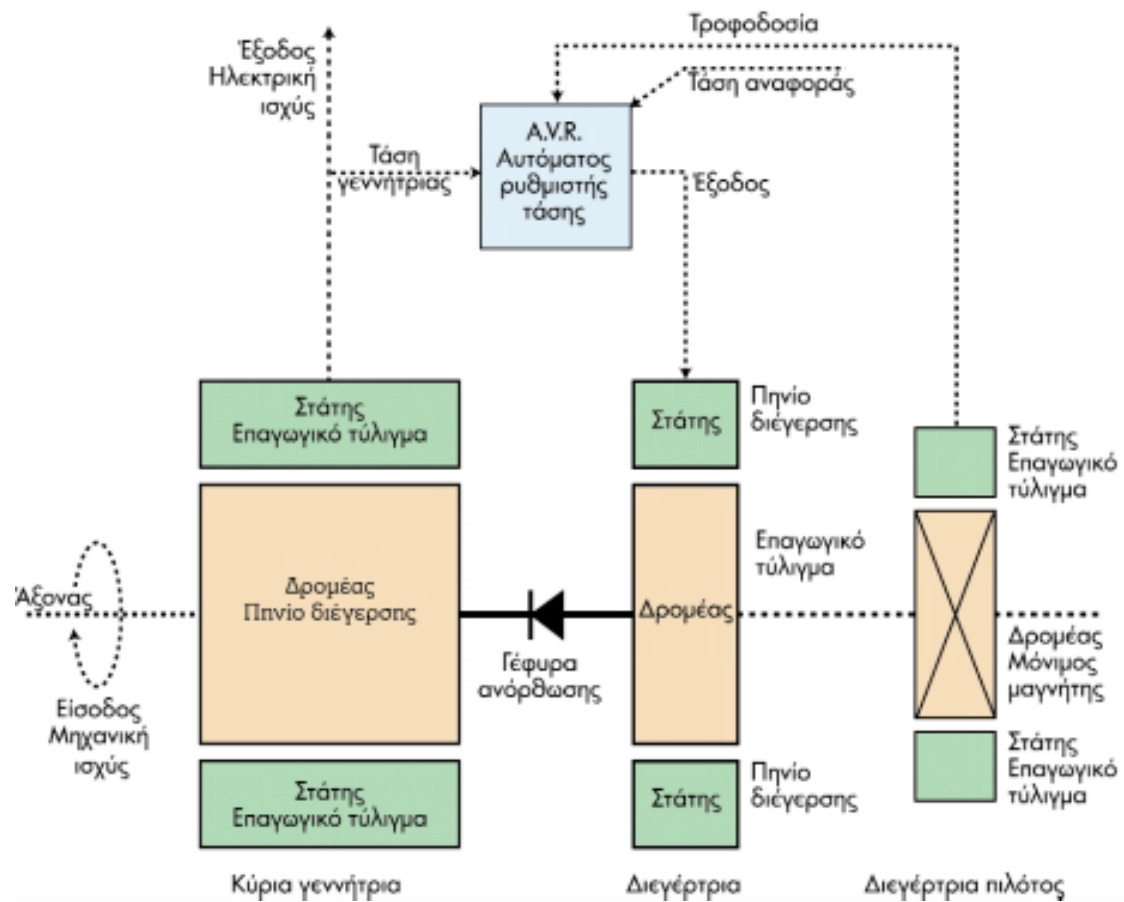
Σχήμα 4.3-Γεννήτρια με πηνίο διέγερσης και οι χαρακτηριστικές φορτίου με σταθερή ένταση του πεδίου (1) και με μεταβολή της έντασης πεδίου (2)



και του τυλίγματος πεδίου της κύριας γεννήτριας παρεμβάλλεται ανορθωτική γέφυρα η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.

Η τροφοδοσία του τυλίγματος πεδίου της διεγέρτριας γίνεται:

- απο την κύρια γεννήτρια, οπότε χαρακτηρίζεται ως **αυτοδιεγειρόμενη** (σχήμα 5.3)
- και απο ανεξάρτητη γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος με διέγερση απο μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται στο δρομέα (σχήμα 4.5). Η γεννήτρια αυτή ονομάζεται γεννήτρια πιλότος και ο δρομέας της βρίσκεται στον ίδιο άξονα με αυτόν της κύριας γεννήτριας. Η κύρια γεννήτρια χαρακτηρίζεται ως **γεννήτρια ανεξάρτητης διέγερσης**



Σχήμα 4.5 Γεννήτρια ανεξάρτητης διέγερσης

Οι γεννήτριες των οποίων το τύλιγμα πεδίου περιστρέφεται, δηλαδή βρίσκεται στο δρομέα χαρακτηρίζονται ως γεννήτριες περιστρεφόμενου πεδίου ή εσωτερικών πόλων (π.χ σχήμα 4.3). Ενώ, οι γεννήτριες των οποίων το τύλιγμα τυμπάνου περιστρέφεται, δηλαδή βρίσκεται στο δρομέα, χαρακτηρίζονται ως γεννήτριες περιστρεφόμενου επαγωγικού τυλίγματος ή εξωτερικών πόλων (π.χ η διεγέρτρια γεννήτρια στο σχήμα 4.4). Στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη χρησιμοποιούνται κυρίως αυτοδιεγειρόμενες γεννήτριες περιστρεφόμενου πεδίου, χωρίς ψήκτες.

## 4.2.2 Κινητήρας εσωτερικής καύσης

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα Η/Ζ είναι μηχανές εσωτερικής καύσης, ειδικά κατασκευασμένες για τα Η/Ζ. Στις μηχανές αυτές, η καύση του καυσίμου γίνεται σε περιορισμένο χώρο και τα αέρια προϊόντα της καύσης χρησιμοποιούνται άμεσα για την παραγωγή μηχανικής ισχύος. Ανάλογα με το είδος του καυσίμου, διακρίνουμε τις τρεις βασικές κατηγορίες κινητήρων εσωτερικής καύσης:

- **Κινητήρες πετρελαίου (Diesel)**

Είναι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης στις οποίες η ανάφλεξη του καυσίμου γίνεται με συμπίεση στο εσωτερικό του συστήματος εμβόλου-κυλίνδρου. Διακρίνονται σε δίχρονους ή τετράχρονους, ανάλογα με το αν ο κύκλος καύσης πραγματοποιείται σε δύο ή τέσσερις χρόνους. Κοστίζουν περισσότερο και είναι μεγαλύτερου βάρους από τους αντίστοιχους κινητήρες βενζίνης και αερίου. Πλεονεκοτούν σε στιβαρότητα και αξιοπιστία και διαθέτουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Έχουν μικρό λειτουργικό κόστος και είναι κατάλληλοι για συνεχή λειτουργία. Επιπροσθέτως, οι κίνδυνοι φωτιάς ή έκρηξης από τη χρήση πετρελαίου είναι μικρότεροι σε σχέση με τους κινητήρες που χρησιμοποιούν βενζίνη ή αέριο. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη κινητήρα πετρελαίου κατασκευάζονται για ισχύ από 2,5 kW έως και μερικά MW.

- **Κινητήρες βενζίνης**

Είναι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο τη βενζίνη και η ανάφλεξη γίνεται με σπινθήρα. Κοστίζουν λιγότερο σε σχέση με τους κινητήρες diesel και διαθέτουν γρήγορη εκκίνηση. Χαρακτηρίζονται όμως από σοβαρά μειονεκτήματα:

- Μεγάλο λειτουργικό κόστος
- Μικρό μέσο χρόνο συντήρησης
- Μικρό χώρο αποθήκευσης καυσίμου

Τα Η/Ζ με κινητήρα βενζίνης κατασκευάζονται για ισχύ μέχρι 100 kW.

- **Κινητήρες αερίου**

Είναι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο και η ανάφλεξη γίνεται με σπινθήρα. Διαθέτουν μεγάλη διάρκεια ζωής και απαιτούν μικρή συντήρηση, λόγω της χρήσης του φυσικού αερίου, που είναι καθαρό καύσιμο. Προσφέρουν γρήγορη εκκίνηση μετά από μακρά περίοδο διακοπής της λειτουργίας τους. Κοστίζουν το ίδιο με τους αντίστοιχους κινητήρες βενζίνης και κατασκευάζονται για ισχύ μέχρι 600 kW.



Σχήμα 4.6 Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη (απο αριστερά προς τα δεξιά) diesel, αερίου, βενζίνης

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι εξοπλισμένος με τα εξής συστήματα:

- Σύστημα εκκίνησης
- Σύστημα ψύξης
- Σύστημα λίπανσης
- Σύστημα ρύθμισης ταχύτητας

### **Σύστημα Εκκίνησης**

Είναι το σύστημα που περιστρέφει το στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα μέχρι να φθάσει στο κατάλληλο αριθμό στροφών, για να μπορέσει ο κινητήρας να τεθεί σε λειτουργία. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, διακρίνουμε δύο συστήματα εκκίνησης: Το υδραυλικό και το ηλεκτρικό. Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλης ισχύος Η/Ζ, όπου η εκκίνηση με το ηλεκτρικό σύστημα είναι αδύνατη. Το ηλεκτρικό σύστημα εκκίνησης είναι παρόμοιο με το σύστημα εκκίνησης των αυτοκινήτων, δηλαδή τα βασικά μέρη του είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (μίζα) και οι συσσορευτές που το τροφοδοτούν.

### **Σύστημα ψύξης**

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης ψύχονται με αέρα (αερόψυκτες) ή με νερό (υδρόψυκτες). Οι κινητήρες diesel που χρησιμοποιούνται κυρίως στα Η/Ζ διατίθενται με σύστημα ψύξης κλειστού κυκλώματος βεβιασμένης κυκλοφορίας νερού. Το σύστημα αυτό αποτελείται από την αντλία, το ψυγείο και τον ανεμιστήρα. Η αντλία κυκλοφορεί το νερό από τη μηχανή, όπου παραλαμβάνει θερμότητα, στο ψυγείο όπου αποδίδει θερμότητα στον αέρα και ξανά πίσω στη μηχανή, για να επαναληφθεί ο κύκλος.

### **Σύστημα λίπανσης**

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν σύστημα λίπανσης με φίλτρο λαδιού, βαλβίδα και μανόμετρο για προστασία σε περίπτωση χαμηλής πίεσης του λιπαντελαίου.

### Σύστημα ρύθμισης ταχύτητας

Όταν προστίθεται ή αφαιρείται ηλεκτρικό φορτίο από το H/Z, τότε η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται ή αυξάνεται αντίστοιχα. Η μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας. Η συχνότητα όμως πρέπει να διατηρείται σταθερή, διαφορετικά οι ηλεκτρικές συσκευές δε λειτουργούν σωστά. Για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα, ο κινητήρας εξοπλίζεται με **ρυθμιστή ταχύτητας**.

Ο ρυθμιστής ταχύτητας είναι σύστημα αυτοματισμού που παρακολουθεί και ελέγχει αυτόματ την ταχύτητα του κινητήρα, με σκοπό να τη διατηρεί σταθερή. Όταν προστίθεται ή αφαιρείται φορτίο, η ταχύτητα και η συχνότητα βυθίζονται ή ανυψώνονται στιγμιαία (1-3 sec), πριν ο ρυθμιστής ταχύτητας τις σταθεροποιήσει. Διακρίνουμε δύο τρόπους λειτουργίας των ρυθμιστών ταχύτητας:

- i. με πτώση ταχύτητας
- ii. ισόχρονη

Η πτώση της ταχύτητας ( $\Pi_T\%$ ) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Pi_T \% = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Όπου:

- $n_0$ : η ταχύτητα του κινητήρα χωρίς φορτίο
- $n_N$ : η ταχύτητα του κινητήρα σε πλήρες φορτίο

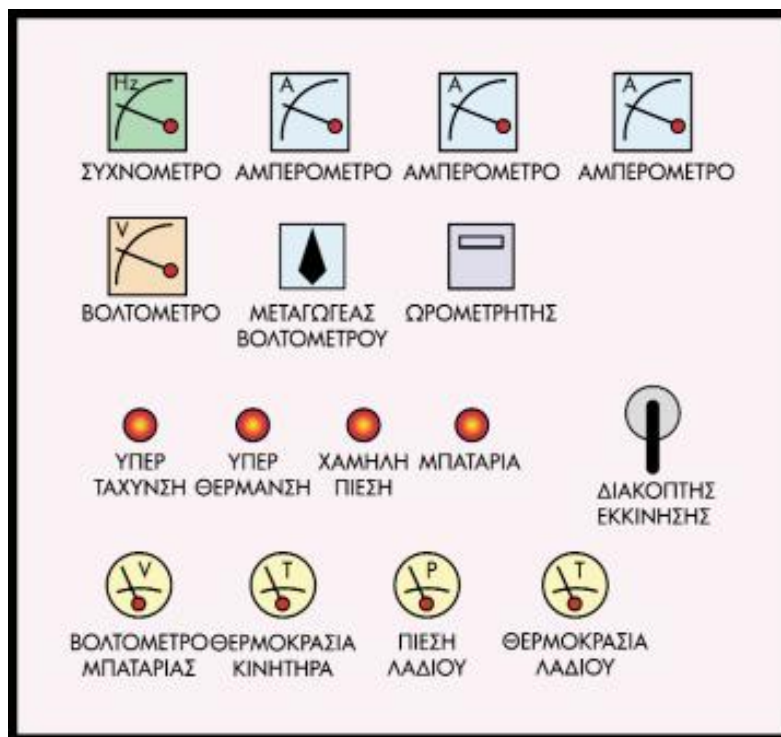
Στην ισόχρονη λειτουργία, οι ρυθμιστές ταχύτητας διατηρούν τη ταχύτητα σταθερή για κάθε φορτίο, δηλαδή η πτώση ταχύτητας είναι μηδενική. Στη λειτουργία με πτώση, οι ρυθμιστές ταχύτητας επιτρέπουν πτώση ταχύτητας συνήθως 3-4%. Επίσης, με σταθερό φορτίο η ηλεκτρική συχνότητα μεταβάλλεται ελαφρώς προς τα πάνω και προς τα κάτω. Σε ισόχρονη λειτουργία, η μεταβολή αυτή δεν υπερβαίνει το 0,25%, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς.

Η επιλογή λειτουργίας του ρυθμιστή ταχύτητας με πτώση ταχύτητας ή ισόχρονη εξαρτάται από τις απαιτήσεις της ηλεκτρικής εγκατάστασης στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το H/Z. Σε εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν ηλεκτρονικοί υπολογιστές, συστήματα τηλεπικοινωνιών, απαιτείται ισόχρονη λειτουργία του ρυθμιστή, δηλαδή συχνότητα 50Hz με διακύμανση 0,25%.

Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, οι ρυθμιστές ταχύτητας διακρίνονται σε μηχανικούς και ηλεκτρονικούς. Οι μηχανικοί ρυθμιστές χρησιμοποιούνται για λειτουργία με πτώση ενώ οι ηλεκτρονικοί για πτώση και για ισόχρονη.

### 4.2.3 Πίνακας ελέγχου και μεταγωγής ισχύος

Ο πίνακας έχει την μορφή ερμαρίου (ντουλαπιού), κατασκευάζεται απο χαλυβδόφυλλα, διαθέτει πόρτα επιθεώρησης και περιέχει τα όργανα, τις συσκευές και τις διατάξεις που είναι απαραίτητα για την προστασία και για τη χειροκίνητη ή αυτόματη λειτουργία του Η/Ζ



Σχήμα 4.7 Εξωτερική όψη πίνακα ελέγχου και μεταγωγής Η/Ζ

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 4.7) το εξωτερικό ενός πίνακα ελέγχου Η/Ζ περιλαμβάνει τα εξής:

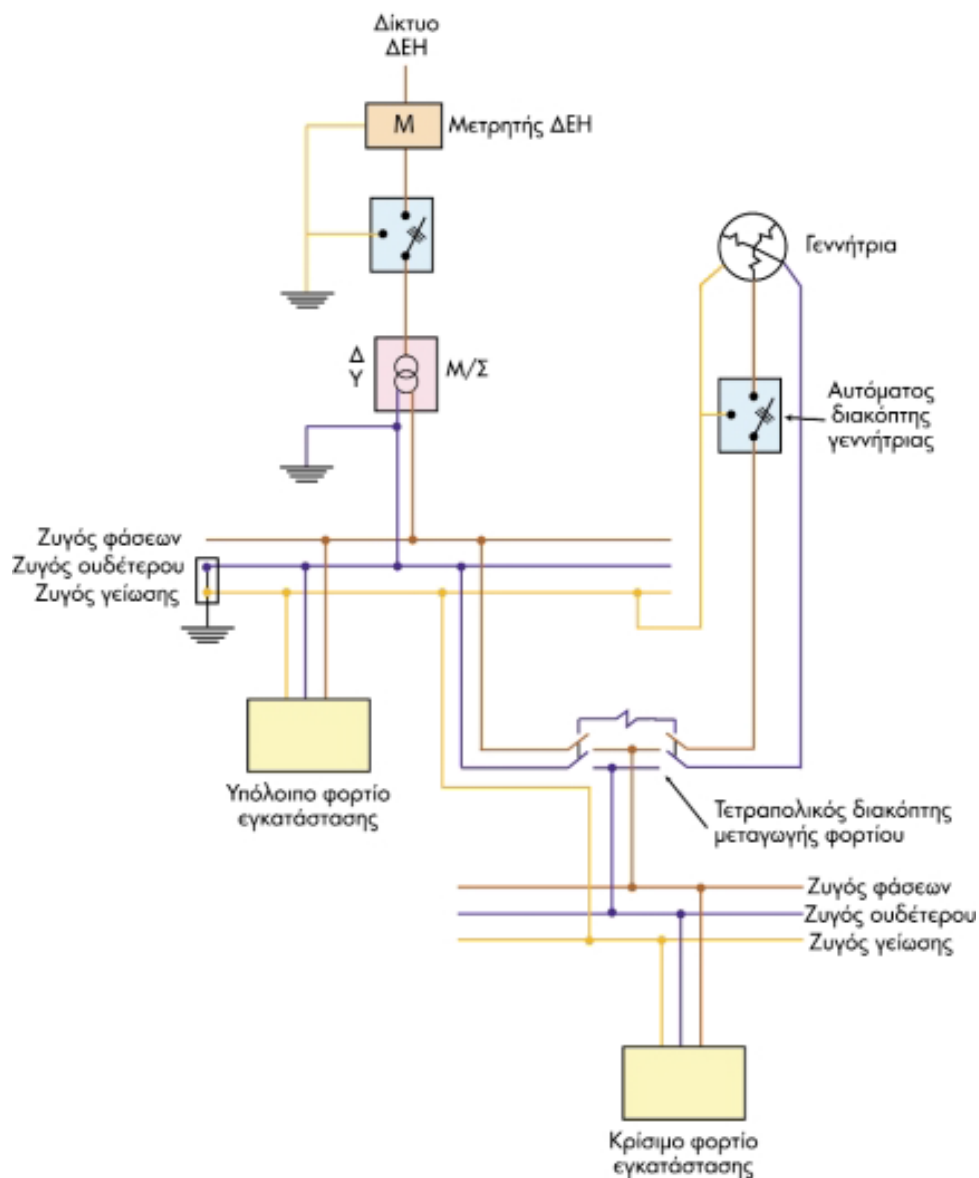
- Συχνόμετρο 43-57Hz
- Αμπερόμετρα, ένα για κάθε φάση
- Βολτόμετρο 0-500V
- Μεταγωγέα Βολτομέτρου (συνήθως 6 θέσεων)
- Βολτόμετρο, για την μέτρηση της τάσεως των συσσορευτών
- Μανόμετρο λαδιού, το οποίο μετράει την πίεση του λαδιού
- Ωρομετρητή, για μέτρηση των ωρών λειτουργία του κινητήρα
- Θερμόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης
- Λυχνίες υπερτάχυνσης, υπερθέρμανσης, μπαταρίας και χαμηλής πίεσης
- Διακόπτη εκκίνησης

Το εσωτερικό σύστημα του πίνακα περιλαμβάνει:

- Το σύστημα προστασία της γεννήτριας απο υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα. Χρησιμοποιείται συνήθως αυτόματος τριπολικός διακόπτης (circuit breaker),

ο οποίος διαθέτει θερμικό στοιχείο για την προστασία απο υπερφόρτιση και ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο για προστασία απο βραχυκυκλώματα.

- Τα συστήματα προστασίας του κινητήρα απο υπερτάχυνση, χαμηλή πίεση λαδιού και υψηλή θερμοκρασία νερού
- Κύκλωμα αυτοματισμού αποτελούμενο απο τους ηλεκτρονόμους των βοηθητικών κυκλωμάτων, τα ρυθμιζόμενα χρονικά για την εκκίνηση και το σταμάτημα του Η/Ζ, και τις ασφάλειες των βοηθητικών κυκλωμάτων
- Φορτιστή 12 ή 24 V (DC) για συντηρητική φόρτιση των συσσωρευτών απο το δίκτυο
- Μετασχηματιστές ρεύματος (ένας για κάθε αμπερόμετρο)
- Κύκλωμα ισχύος στο οποίο περιέχεται ο μεταγωγικός διακόπτης, που αποτελείται απο δύο αυτόματους ισχύος με μηχανική και ηλεκτρική μανδάλωση για τον αποκλεισμό της τροφοδοσίας του φορτίου ταυτόχρονα απο το δίκτυο της ΔΕΗ και απο το Η/Ζ (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 Κύκλωμα ισχύος-μεταγωγής φορτίου

#### 4.2.4 Αντικραδασμική βάση στήριξης

Το σώμα του κινητήρα και της γεννήτριας συνδέονται σταθερά μεταξύ τους. Επίσης, για τη μεταφορά της κίνησης, ο στροφαλοφόρος άξονας του κινητήρα συνδέεται μέσω πολύφυλλου μεταλλικού συνδέσμου με τον άξονα του ρότορα της γεννήτριας. Το συνδεδεμένο ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας τοποθετείται σε μεταλλική βάση. Η βάση έχει μορφή πλαισίου, φέρει πλαστικά αντικραδασμικά στηρίγματα, για να μην μεταφέρονται οι κραδασμοί στο κτίριο, και διαθέτει υποδοχές για την ανύψωση και μεταφορά του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Οι σύγχρονες βάσεις κατασκευάζονται από διπλό πλαίσιο και μεταξύ των πλαισίων τοποθετούνται τα αντικραδασμικά στηρίγματα.

#### 4.3 Ισχύς και φόρτιση

Η ισχύς που αναφέρεται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών H/Z συνοδεύεται και με χαρακτηρισμό ο οποίος καθορίζει τον τρόπο και το χρόνο φόρτισης του H/Z, σύμφωνα με ο διεθνή κανονισμό ISO 3046. Διακρίνουμε τους παρακάτω χαρακτηρισμούς ισχύος:

- **Κύρια (Prime power).** Το ζεύγος με κύρια ισχύ είναι κατασκευασμένο για συνεχή λειτουργία με μεταβαλλόμενο φορτίο, δεν πρέπει να λειτουργεί με το 100% της ισχύος του για περισσότερες από 500 ώρες το χρόνο, μπορεί να υπερφορτίζεται κατά 10% για 1 ώρα ανά 12 ώρες συνεχούς λειτουργίας και οι συνολικές ώρες υπερφόρτισης το χρόνο δεν πρέπει να ξεπερνούν τις 25.
- **Εφεδρική (Stand-by power).** Το ζεύγος με εφεδρική ισχύ είναι κατασκευασμένο για 200 ώρες λειτουργίας το χρόνο, δεν πρέπει να λειτουργεί για περισσότερες από 25 ώρες το χρόνο στο 100% της ισχύος του και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ως εφεδρική πηγή.

Επομένως, εάν το H/Z με κύρια ισχύ πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως κύρια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για συνεχή λειτουργία επί 24 ώρες την ημέρα, δεν πρέπει να φορτίζεται στο 100% της ισχύος, αλλά σε μικρότερη (85-90%), ανάλογα με τις δυνατότητες του κινητήρα.

#### 4.4 Τρόποι λειτουργίας

Στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη διακρίνουμε δύο τρόπους λειτουργίας την χειροκίνητη και την αυτόματη:

- **Χειροκίνητη.** Στη χειροκίνητη λειτουργία η λειτουργία του H/Z και η μεταγωγή του φορτίου από την κύρια πηγή στο H/Z γίνεται από τον υπεύθυνο τεχνικό με κατάλληλο χειρισμό. Η μεταγωγή του ηλεκτρικού φορτίου γίνεται

αφού ο τεχνικός διαπιστώσει από τα όργανα πως η τάση και η συχνότητα της γεννήτριας έχουν σταθεροποιηθεί και είναι οι σωστές

- **Αυτόματη.** Στην αυτόματη λειτουργία, μετά την αποτυχία του δικτύου (διακοπή ή ακαταλληλότητα τάσης), τίθεται αυτόματα σε λειτουργία το H/Z με χρονική καθυστέρηση μερικών δευτερολέπτων. Η καθυστέρηση αυτή προβλέπεται για την αποφυγή άσκοπων εκκινήσεων του H/Z, που οφείλονται σε διακοπές μικρής διάρκειας της κύριας πηγής. Σε περίπτωση αποτυχίας της πρώτης αυτόματης εκκίνησης του H/Z, προβλέπονται συνήθως άλλες δύο αυτόματες προσπάθειες εκκίνησης. Μετά την εκκίνηση του H/Z, γίνεται μεταγωγή του ηλεκτρικού φορτίου από την κύρια πηγή στη γεννήτρια. Όταν η τάση στην κύρια πηγή (δίκτυο της ΔΕΗ) αποκατασταθεί, η μεταγωγή του φορτίου στο δίκτυο της κύριας πηγής γίνεται με χρονοκαθυστέρηση συνήθως 60 sec. Μετά από τη μεταγωγή του φορτίου στο δίκτυο της κύριας πηγής, το H/Z συνεχίζει να λειτουργεί για μερικά λεπτά, για να ψυχθεί ο κινητήρας.

#### 4.5 Συντήρηση

Η συντήρηση είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη διατήρηση του H/Z σε άριστες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, με τη συντήρηση προλαμβάνουμε τη δημιουργία βλαβών. Για τη δημιουργία προγράμματος προληπτικής συντήρησης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη:

- Το εγχειρίδιο συντήρησης της γεννήτριας
- Το εγχειρίδιο συντήρησης της κινητήριας μηχανής
- Η χρήση του H/Z ως κύριας ή εφεδρικής πηγής που καθορίζει το χρόνο λειτουργίας του

Στη συνέχεια, δίνεται ενδεικτική συντήρηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους:

Ημερίσια συντήρηση	Εξαμηνιαία συντήρηση	Ετήσια συντήρηση
Έλεγχος στάθμης λαδιού και καυσίμου	Αλλάγη λαδιού	Έλεγχος μάντων
Έλεγχος μπαταριών και οργάνων	Αλλάγη φίλτρου λαδιού	Έλεγχος αντικραδαστικών στηριγμάτων βάσης
Έλεγχος ψυγείου	Αλλαγή φίλτρου πετρελαίου	Αλλαγή φίλτρου αέρα
Έλεγχος κολάρων		
Έλεγχος καλωδιώσεων		

Πίνακας 4.1- Ενδεικτική συντήρηση H/Z

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

# **ΣΥΣΣΟΡΕΥΤΕΣ**

### **5.1 Ηλεκτρικοί συσσορευτές**

Οι συσσορευτές παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου αποτελούν και ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της οικονομικής επιβάρυνσης. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα δεν υπάρχει λόγος χρησιμοποίησης συσσορευτών, εκτός και αν το διασυνδεδεμένο σύστημα τροφοδοτεί άμεσα κάποια φορτία (τα φορτία δηλαδή αυτά τροφοδοτούνται κατευθείαν από το Φ/Β σύστημα και όχι μέσω του κεντρικού δικτύου) και τα οποία θεωρούνται ότι δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να μείνουν εκτός λειτουργίας σε μια ενδεχόμενη βλάβη. Τα αυτόνομα φ/β συστήματα επομένως χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της φ/β γεννήτριας. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις και κυρίως από το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχόμενων ημερών συννεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών.

Η καλύτερη δυνατή λύση, από πλευράς κόστους είναι η χρησιμοποίηση των διαφόρων τύπων συσσορευτών, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από αντιστρεπτότητα των χημικών αντιδράσεων στα ηλεκτρόδια τους. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν οι συσσορευτές μολύβδου-οξέως, οι συσσορευτές νικελίου-καδμίου κ.α. Εκτός των ηλεκτρικών συσσορευτών, που ονομάζονται **δευτερογενή στοιχεία ή ηλεκτρικά στοιχεία δευτέρας τάξεως**, υπάρχουν και εκείνα τα οποία δίνουν ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντας την δυναμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο εσωτερικό τους, κατά τις χημικές αντιδράσεις, που έγιναν μεταξύ ενώσεων ή στοιχείων. Ονομάζονται **πρωτογενή στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξεως**. Διακρίνονται από τους ηλεκτρικούς συσσορευτές κατά το ότι δεν έχουν τη δυνατότητα επαναφόρτισης και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα που απαιτούν μικρούς ρυθμούς εκφόρτισης και μικρό αρχικό κόστος.

## 5.2 Αρχή λειτουργίας και δομή των συσσωρευτών

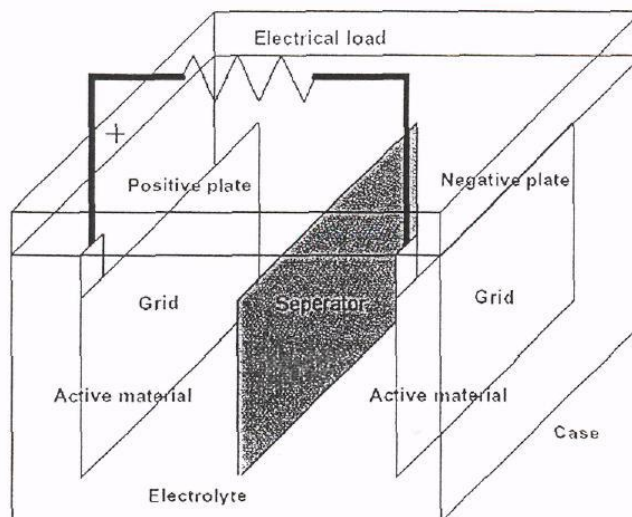
Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην δημιουργία διαφοράς δυναμικού (τάσης) ανάμεσα σε δύο διαφορετικά στοιχεία (ηλεκτρόδια) όταν αυτά βρίσκονται σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία που με λίγα λόγια μετατρέπουν την χημική σε ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά υπάρχουν πολλών ειδών μπαταρίες, από μια απλή μπαταρία ρολογιού έως μια πολύ μεγάλη μπαταρία βιομηχανίας. Όλες όμως διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά ως προς τη δομή τους. Αποτελούνται λοιπόν από το δοχείο ή το κουτί όπου περιέχονται τα υλικά της μπαταρίας. Μέσα στο δοχείο υπάρχουν 2 μεταλλικά ηλεκτρόδια ή πλάκες, ένα για το θετικό πόλο (+, άνοδος) και ένα για τον αρνητικό πόλο (-, κάθοδος).

Ακόμη υπάρχει ένα υγρό ή στερεό υλικό που παίζει το ρόλο του ηλεκτρολύτη για να γίνει η αντίδραση με τα ηλεκτρόδια ώστε έτσι να υπάρξει ροή ιόντων. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι οι κύκλοι λειτουργίας τους. Μπορούν να έχουν ρηχούς κύκλους λειτουργίας μεταξύ 10-15% της συνολικής δυναμικότητας της μπαταρίας ή βαθιούς κύκλους λειτουργίας με 50-80%. Για τους ρηχούς κύκλους λειτουργίας όπως αυτός ενός αυτοκινήτου όταν ξεκινά, οι μπαταρίες είναι σχεδιασμένες να δίνουν πολλά Ampere σε μικρό χρονικό διάστημα και στην συνέχεια το δυναμό επαναφορτίζει την μπαταρία άμεσα. Αυτές με τους βαθιούς κύκλους λειτουργίας παρέχουν λίγα Amp για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση χρήσης τους με ηλιακά συστήματα πρέπει να επιλέγουμε τέτοιου είδους μπαταρίες.

### Δομή κυψελίδων-κυττάρων (Cell)

Η κατασκευή των δευτερευόντων συσσωρευτών είναι μία βαριά βιομηχανική διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση επικίνδυνων και τοξικών ουσιών. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως μαζική και συνδυάζει πλήθος σειριακών και παραλλήλων επεξεργασιών. Αν και η διαδικασία κατασκευής ποικίλει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, ωστόσο ορισμένα χαρακτηριστικά είναι κοινά σε όλες σχεδόν τις μπαταρίες. Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell), και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται στο Σχήμα 5.1. Η κυψελίδα είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα της μπαταρίας, συνίσταται από μία θετική και μία αρνητική πλάκα που είναι βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περικλείονται σε ένα δοχείο. Με τη βοήθεια του σχήματος 5.1 θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.



Σχήμα 5.1-Δομή κυψελίδας

**Ενεργό υλικό (Active material):** Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία από τη θετική και την αρνητική πλάκα, είναι οι βασικοί συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητας της. Σε μία τυπική μπαταρία μολύβδου, όπως είναι και η περίπτωση της μπαταρίας που χρησιμοποιούμε, το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου ( $PbO_2$ ) στη θετική πλάκα με μεταλλικό πορώδη μολύβδο ( $Pb$ ) στην αρνητική, που αντιδρούν σε διάλυμα θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

**Ηλεκτρολύτης (Electrolyte):** Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγωγίμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας. Στις μπαταρίες μολύβδου είναι ι διάλυμα θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ) σε υγρή μορφή ή σε μορφή gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου ( $Ni$ ) είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου ( $KOH$ ). Σε περιπτώσεις σαν τη δική μας, που ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα, συχνά, απαιτείται η αναπλήρωση νερού λόγω του φαινομένου της εξαέρωσης.

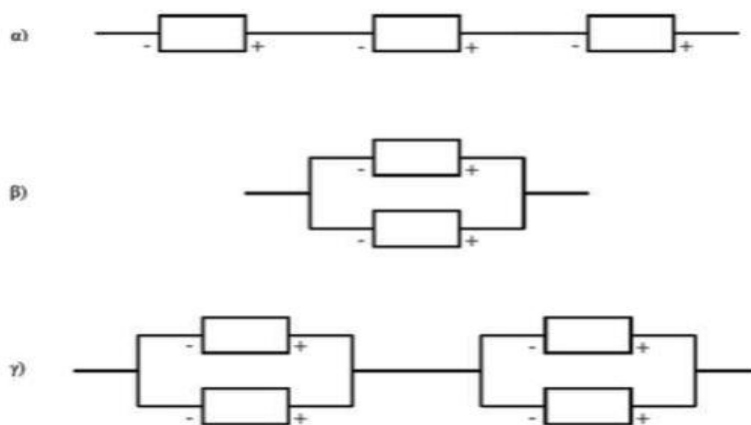
**Διαχωριστής (Separator):** Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που εμποδίζει την αγωγή επαφή μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο, εμποδίζοντας τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

**Πλάκες (Plates):** Οι πλάκες, που συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, είναι το βασικό στοιχείο της μπαταρίας και συνήθως αναφέρονται ως ηλεκτρόδια. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών, συνδεδεμένων παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και η σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, έχουν καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

**Πόλοι ή Τερματικοί πόλοι (Terminal poles):** Οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές ή αρνητικές, ηλεκτρικές συνδέσεις της μπαταρίας. Ένα φορτίο ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται με τη μπαταρία μέσω των πόλων.

### Συνδεσμολογία κυψελίδων

Σε γενικές γραμμές, μια μπαταρία αποτελείται από μία ή περισσότερες κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά ή και παράλληλα. Με τη σύνδεση των κυττάρων παράλληλα, η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας αυξάνεται, αλλά η τάση παραμένει ίδια. Η σύνδεση των κυττάρων σε σειρά έχει ως συνέπεια την αύξηση της συνολικής τάσης, ενώ η χωρητικότητα παραμένει η ίδια. Συνδυασμοί σε σειρά και παράλληλα είναι κοινά και έχουν σχεδιαστεί για να ταιριάζουν σε εφαρμογές χειρισμού.



Σχήμα 5.2 - α) Σε σειρά συνδεσμολογία, β) Παράλληλη συνδεσμολογία, γ) Μικτή συνδεσμολογία

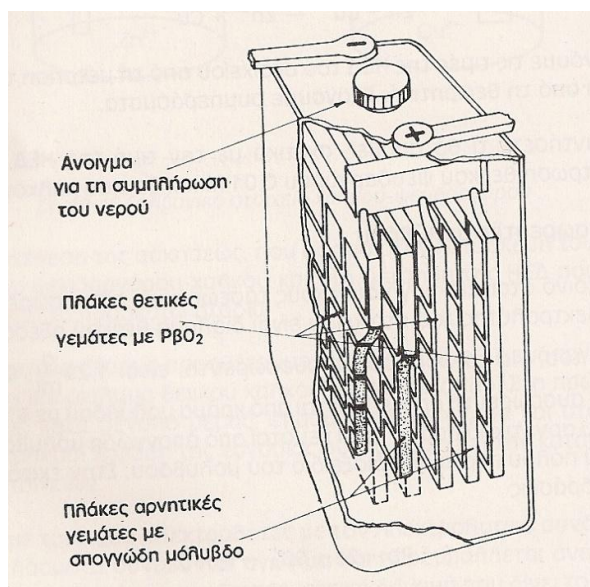
## 5.3 Είδη συσσορευτών

### 5.3.1 Συσσορευτές μολύβδου-οξέως (Lead-Acid)

Η μπαταρία μολύβδου-οξέως έχει μια επιτυχημένη παρουσία στο εμπόριο πάνω από έναν αιώνα. Η παραγωγή και η χρήση του συνεχίζεται να αυξάνεται λόγω των νέων εφαρμογών για την ενέργεια της μπαταρίας στο τομέα της αποθήκευσης της ενέργειας, της ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης, σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα και τύπους SLI (Starting, Lighting, Ignition), στην επικοινωνία, σε συστήματα φωτισμού έκτακτης ανάγκης και σε πολλές ακόμη εφαρμογές. Η πληθώρα των μεγεθών και σχεδίων καθώς και η μεγάλη γκάμα τάσεων αντιπροσωπεύονται από το χαμηλό κόστος και την ευκολία της κατασκευής αυτής και εξακολουθούν να έχουν καλή απόδοση και ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Με τις βελτιώσεις που έχουν γίνει έχουν επιτευχθεί μπαταρίες με τάσεις από 100 έως 300 Volt και με ομοιόμορφη απόδοση καθώς έχουν και υψηλή ηλεκτρική αποδοτικότητα ανάκαμψης 75-80%.

Αυτό καθιστά τις μπαταρίες αυτές ελκυστικές για εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα και εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Για κάθε τύπο εφαρμογής οι μπαταρίες αυτού του τύπου έχουν και διαφορετικά χαρακτηριστικά επιδόσεων. Μερικοί τύποι μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι οι:

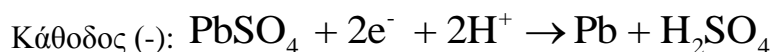
- Εκκίνησης, φωτισμού και έναυσης, SLI (αυτοκίνητα, αεροσκάφη)
- Διατάξεις έκτακτης τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας (τηλεφωνία, UPS)
- Ηλεκτρικών οχημάτων (οχήματα φόρτωσης-εκφόρτωσης, ηλεκτρικά οχήματα)
- Στατικής ή βιομηχανικής χρήσης (τραίνα, υποβρύχια)
- Αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Αυτόνομα Φ/Β συστήματα και υβριδικά συστήματα)



Σχήμα 5.3 - Συσσωρευτής μολύβδου-οξέως

### Διαδικασία φόρτισης συσσωρευτή μολύβδου

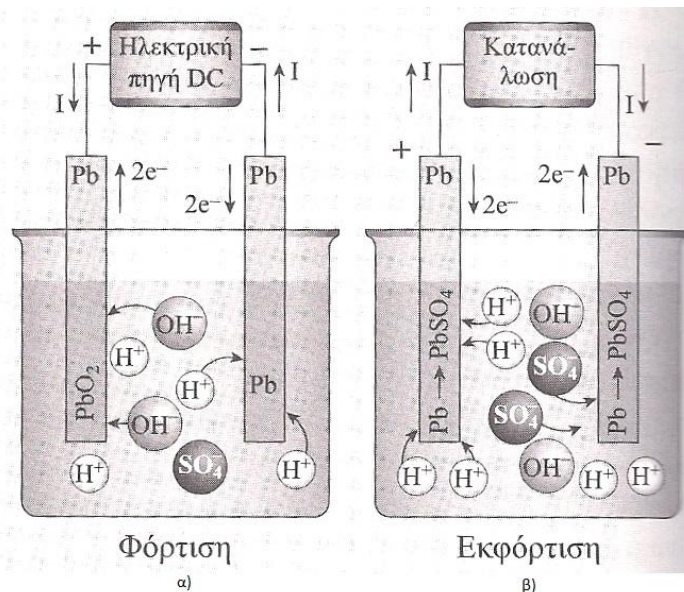
Η φόρτιση του συσσωρευτή γίνεται με εφαρμογή συνεχούς τάσεως στους πόλους του συσσωρευτή, έτσι ώστε το σύστημα να διαρρέεται από ορισμένο ρεύμα (σχήμα 5.4α). Γενικά, συνίσταται φόρτιση με ρεύμα χαμηλής τιμής. Αν η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι C (σε Ah), η φόρτιση του με ρεύμα C/20 (σε A), ονομάζεται *κανονικός ρυθμός φόρτισης*. Για συσσωρευτές ενισχυμένης κατασκευής πλακών (συσσωρευτές φωτοβολταϊκής ή βιομηχανικής χρήσης), επιτρέπεται ρεύμα φόρτισης μέχρι  $I = C/10$  (A). Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στα δύο ηλεκτρόδια είναι οι ακόλουθες:



Η ολική δράση κατά τη φόρτιση περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:



Συνεπώς, κατά τη φόρτιση αυξάνεται η περιεκτικότητα του θειικού οξέος στο διάλυμα, δηλαδή, η πυκνότητα του αυξάνει προς τη τιμή του καθαρού ηλεκτρολύτη (1,24 έως 1,29 gr/cm<sup>3</sup>).



Σχήμα 5.4 - Διαδικασίες α) φόρτισης, β) και εκφόρτισης συσσορευτή μολύβδου-οξέος

### Διαδικασία εκφόρτισης συσσορευτή μολύβδου

Αν στα άκρα του συσσορευτή συνδεθεί ένας καταναλωτής (σχήμα 5.4β), τότε συμβαίνει εκφόρτιση του και, κατά τις χημικές αντιδράσεις στις επιφάνειες των δύο ηλεκτροδίων, μετατρέπονται σταδιακά και τα δύο σε θειικό άλας (PbSO<sub>4</sub>). Άρα, κατά την εκφόρτιση του συσσορευτή ελλατώνεται η περιεκτικότητα του θειικού οξέος στο διάλυμα. Η παρακολούθηση της περιεκτικότητας του H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> στο διάλυμα, εκφραζόμενη με την μεταβολή της πυκνότητας του, κατά τους χρόνους φόρτισης-εκφόρτιση, αποτελεί ένα πολύ απλό τρόπο ελέγχου της καταστάσεως φόρτισης του συσσορευτή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μπαταριών τύπου μολύβδου-οξέος σε σύγκριση με άλλους τύπους.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Με το δημοφιλές χαμηλό κόστος δευτεροβάθμιας μπαταρίας είναι ικανή να παράγεται σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο, από χαμηλούς σε υψηλούς ρυθμούς παραγωγής	Σχετικά χαμηλό κύκλο ζωής 50-500 κύκλοι (μέχρι τους 2.000 κύκλους μπορεί να επιτευχθεί με ειδικούς σχεδιασμούς)
Διατίθενται σε μεγάλες ποσότητες και σε μια ποικιλία μεγεθών και σχεδίων που κατασκευάζονται σε μεγέθη από τις μικρότερες του 1 Ah σε αρκετές χιλιάδες Ampere-ώρες	Η μακροχρόνια αποθήκευση σε μια κατάσταση εκφόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμη πόλωση των ηλεκτροδίων (αυλάκωση)

Υψηλό ποσοστό απόδοσης, κατάλληλο για την εκκίνηση του κινητήρα (αλλά πολύ καλύτερες επιδόσεις από μερικούς τύπους νικελίου-καδμίου και νικελίου-υδριδίου μετάλλου μπαταριών)	Παραγωγή υδρογόνου σε ορισμένα σχέδια που μπορεί να υπάρξει κίνδυνος έκρηξης (έχουν εγκατασταθεί ανασχετικά φλόγας για την αποτροπή αυτού του κινδύνου)
Μέτρια έως καλή επίδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες	Θερμικές απώλειες σε ακατάλληλα σχεδιασμένες μπαταρίες ή εξοπλισμό φόρτισης
Ηλεκτρικά αποτελεσματικό/ικανότητα ανάκαμψης της αποδοτικότητας πάνω από 70%, συγκρίνοντας την ενέργεια εκφόρτισης με αυτήν της ενέργειας φόρτισης	Περιορισμένη πυκνότητα ενέργειας, συνήθως 30-40 Wh /kg
Υψηλής τάσης στοιχείων/τάση ανοικτού κυκλώματος >2 V που είναι το υψηλότερο όλων των υδατικών ηλεκτρολύτων	Δύσκολο στην κατασκευή πολύ μικρών μεγεθών
Εύκολη ένδειξη κατάστασης φόρτισης	
Χαμηλό κόστος σε σύγκριση με άλλες δευτερεύουσες μπαταρίες	
Εύκολη ανακυκλωσιμότητα των στοιχείων του συσσωρευτή	

Πίνακας 5.1- Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα συσσωρευτών μολύβδου-οξέως

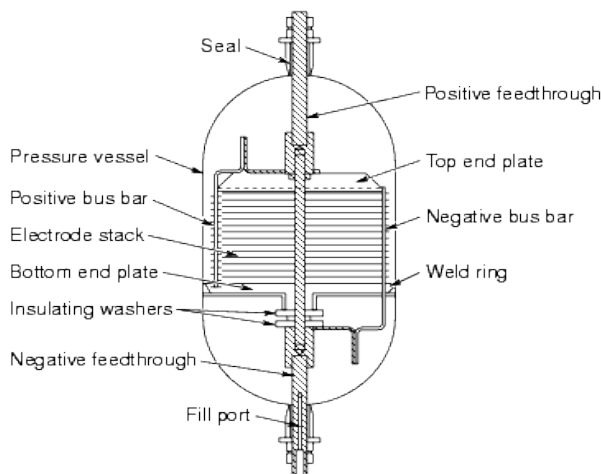
### 5.3.2 Συσσωρευτές Νικελίου-Υδρογόνου (Nickel-Hydrogen)

Μια κλειστού τύπου μπαταρία νικελίου-υδρογόνου (Ni-H<sub>2</sub>) είναι μια υβριδική μπαταρία που συνδυάζει την τεχνολογία κυψέλης καυσίμου. Το οξείδιο του νικελίου που είναι το θετικό ηλεκτρόδιο προέρχεται από το στοιχείο νικελίου-καδμίου και το αρνητικό από την κυψέλη καυσίμου (fuel cell) υδρογόνου-οξυγόνου. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του υβριδικού τύπου μπαταρίας Ni-H<sub>2</sub> είναι η μακρά διάρκεια του κύκλου ζωής που έχει και που ξεπερνά οποιαδήποτε άλλη μπαταρία Β' τάξης.

Ακόμη ένα χαρακτηριστικό είναι η υψηλή ειδική ενέργεια και η σταθερή πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες με υδατικούς ηλεκτρολύτες.

Τέλος, έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος (παλμός ή μέγιστη ικανότητα ισχύος) και έχουν μια ανοχή σε υπερφόρτιση ή αναστροφή. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι που κάνουν αυτό τον τύπο μπαταριών και το υποσύστημα αποθήκευσης ενέργειας να χρησιμοποιούνται σε πολλές απαιτητικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στις διαστημικές εφαρμογές όπως αεροδιαστημική, εμπορικούς δορυφόρους επικοινωνιών ακόμη και στο σύγχρονο διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Πρόσφατα όμως προγράμματα έχουν

ξεκινήσει και για επίγειες εφαρμογές όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 5.5: Εσωτερικό συσσωρευτή νικελίου-υδραργύρου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μπαταριών τύπου νικελίου-υδραργύρου:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηλή ειδική ενέργεια (60 Wh/kg)	Υψηλό αρχικό κόστος
Μεγάλη διάρκεια κύκλων ζωής για διαστημικές εφαρμογές	Αυτοεκφόρτιση με ανάλογη πίεση του υδρογόνου
Η πίεση του υδρογόνου δίνει μια ένδειξη της κατάστασης της φόρτισης της μπαταρίας.	Χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας: 50-90 Wh/L (στοιχείων) 20-40 Wh/L (μπαταρία)
Τα στοιχεία των μπαταριών μπορούν να ανεχτούν επιπλέον επιβάρυνση	
Μεγάλη διάρκεια ζωής (περισσότερα από 15 χρόνια)	

Πίνακας 5.2- Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα συσσωρευτών νικελίου-υδρογόνου

### 5.3.3 Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (Nickel-Cadmium)

Τα αεριζόμενα θυλάκια των πλακών των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου είναι τα παλαιότερα και πιο ώριμα από τους διάφορους σχεδιασμούς που είναι διαθέσιμα. Είναι ένα πολύ αξιόπιστο και ανθεκτικό σύστημα μπαταρίας με μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε σχετικά υψηλά ποσοστά εκφορτίσεων και σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Έχουν πολύ καλές ιδιότητες διατήρησης της φόρτισης και μπορούν να αποθηκεύουν για μεγάλα χρονικά

διαστήματα σε οποιαδήποτε κατάσταση χωρίς να υποστεί αλλοίωση.

Τα θυλάκια των πλακών των μπαταριών μπορούν να αντέξουν μηχανική και ηλεκτρική καταπόνηση όπως υπερφορτίσεις, αντιστροφές και βραχυκυκλώματα. Μια μικρή συντήρηση είναι απαραίτητη για αυτές τις μπαταρίες.

Το κόστος είναι χαμηλότερο από οποιοδήποτε τύπο αλκαλικής μπαταρίας αποθήκευσης και υψηλότερο από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος με βάση τις βατώρες (Watthours).

Κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα δυναμικότητας από 5 έως και περισσότερα από 1200 Ah (αμπερώρες) και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Οι περισσότερες από αυτές έχουν βιομηχανικό χαρακτήρα όπως σε εφαρμογές σιδηροδρόμων, λειτουργία διακοπών, των τηλεπικοινωνιών, Φ/Β πάρκων, τροφοδοσία συνεχούς παροχής ισχύος και φωτισμού ασφαλείας. Επίσης γίνεται χρήση και σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές.



Σχήμα 5.6: Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου βιομηχανικών και λοιπών εφαρμογών

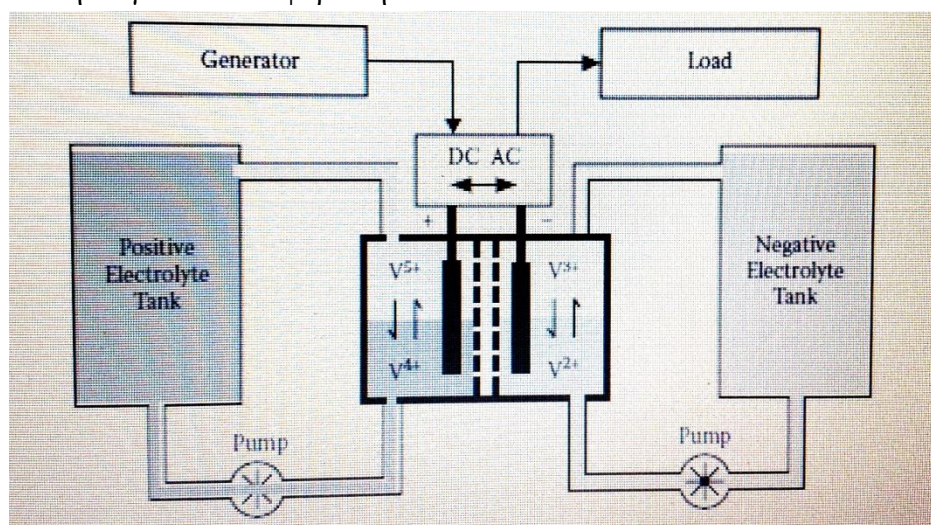
Παρακάτω φαίνονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βιομηχανικών συσσωρευτών.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μεγάλη διάρκεια ζωής κύκλων λειτουργίας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας
Ανθεκτικές σε μηχανικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις	Υψηλότερο κόστος από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος
Καλή διατήρηση φόρτισης.	Περιέχουν κάδμιο, ιδιαίτερα επιβλαβές για την υγεία
Άριστη μακροπρόθεσμη αποθήκευση	
Χαμηλή συντήρηση, αξιοπιστία	

Πίνακας 5.3- Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα συσσωρευτών νικελίου-καδμίου

### 5.3.4 Συσσωρευτές ροής

Η μπαταρία ροής μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ηλεκτρολύτης που περιέχει ένα ή περισσότερα είδη διαλυμένου ηλεκτρικού πολυμερούς ρέει μέσα σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο. Πρόσθετος ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται εξωτερικά, (κυρίως σε δεξαμενές) και συνήθως αντλείται διαμέσου του αντιδραστήρα, αν και τα συστήματα τροφοδοσίας με βαρύτητα είναι ευρέως διαδεδομένα. Τα μεγέθη της ενέργειας και της ισχύος είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι μπαταρίες ροής μπορεί να επαναφορτίζονται γρήγορα με την αντικατάσταση του υγρού ηλεκτρολύτη, ενώ ταυτόχρονα ανακτάται το υλικό που ήδη έχει χρησιμοποιηθεί για εκ νέου φόρτιση.



Σχήμα 5.7- Διάγραμμα οξειδοαναγωγικού συσσωρευτή βαναδίου

Το βανάδιο μπορεί να υπάρχει σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης, έτσι η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου (vanadium redox battery) το χρησιμοποιεί για την δημιουργία μπαταρίας η οποία θα έχει ένα χημικό ηλεκτρολύτη, αντί για δύο (σχήμα 5.7). Ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο δεξαμενών ηλεκτρολύτη μέσω της διαπερατής μεμβράνης πολυμερούς. Η καθαρή απόδοση της μπαταρίας αυτής μπορεί και να φτάσει και το 85%.

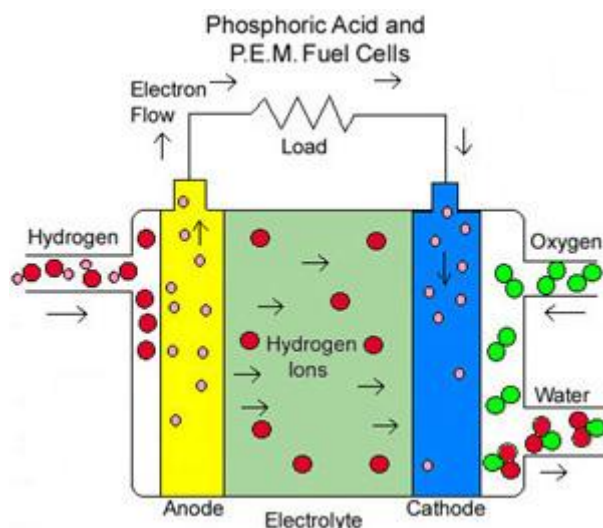
### 5.3.5 Κυψέλες καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου είναι μια γαλβανική συσκευή η οποία μετατρέπει συνεχώς τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου (και οξειδωτικό) σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως οι μπαταρίες έτσι και οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν την ενέργεια αυτή ηλεκτροχημικά προσφέροντας έτσι δυνατότητες για μετατροπή υψηλής απόδοσης. Η βασική διαφορά μεταξύ μιας κυψέλης καυσίμου και μιας μπαταρίας είναι ο τρόπος για την παροχή της πηγής ενέργειας. Σε μια κυψέλη καυσίμου, το καύσιμο και το οξειδωτικό παρέχονται συνεχώς από μια εξωτερική πηγή ενέργειας όταν είναι επιθυμητή. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για όσο διάστημα τα ενεργά υλικά τροφοδοτούν τα ηλεκτρόδια. Σε μια μπαταρία, το καύσιμο

και το οξειδωτικό (εξαιρούνται οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα) αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της συσκευής. Η μπαταρία θα σταματήσει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν το περιοριστικό αντιδρών καταναλώνεται και τότε θα πρέπει να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί.

Το υλικό του ηλεκτροδίου της κυψέλης καυσίμου είναι αδρανές με την έννοια ότι δεν καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης των κυψελών, αλλά έχει καταλυτικές ιδιότητες που ενισχύουν την ηλεκτροελλάτωση ή ηλεκτρική οξείδωση των αντιδρώντων (ενεργά υλικά).

Τα ενεργά υλικά ανόδου που χρησιμοποιούν οι κυψέλες καυσίμων είναι γενικά αέρια ή υγρά καύσιμα (σε σύγκριση με το μέταλλο ανόδου που χρησιμοποιείται στις περισσότερες μπαταρίες), όπως το υδρογόνο, μεθανόλη, υδρογονάνθρακες, φυσικό αέριο, τα οποία καύσιμα τροφοδοτούν την πλευρά της ανόδου στην κυψέλη καυσίμου. Δεδομένου ότι πρόκειται για υλικά όπως τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε μηχανές θερμότητας, ο όρος «κυψέλη καυσίμου» έχει γίνει δημοφιλής για να περιγράψει αυτές τις συσκευές. Το οξυγόνο και πιο συχνά ο αέρας, είναι το κυρίαρχο οξειδωτικό και τροφοδοτείται στην κάθοδο. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.8) παρουσιάζεται η τυπική δομή της κυψέλης καυσίμου:



Σχήμα 5.8- Δομή κυψέλης καυσίμου

Η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες.

- Άμεσα συστήματα, όπου τα καύσιμα όπως το υδρογόνο, μεθανόλη και υδραζίνη μπορούν να αντιδράσουν άμεσα στην κυψέλη καυσίμου.
- Έμμεσα συστήματα, στα οποία το καύσιμο, όπως το φυσικό αέριο ή άλλα ορυκτά καύσιμα, μετασχηματίζεται πρώτα σε ένα πλούσιο σε υδρογόνο αέριο το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται στη κυψέλη καυσίμου.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να λάβουν μια σειρά από διάφορες διαμορφώσεις ανάλογα με τους συνδυασμούς των καυσίμων και οξειδωτικών, τον τύπο του ηλεκτρολύτη, την θερμοκρασία λειτουργίας, την

εφαρμογή κ.α. Σύμφωνα με αυτές τις διαμορφώσεις δημιουργούνται οι παρακάτω κατηγορίες:

- Στερεού οξειδίου (SOFC)
- Λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)
- Φωσφορικού οξέως (PAFC)
- Άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- Αλκαλικοί (AFC)
- Μembrάνης ανταλλαγής πρωτονίου (PEM)
- Αναγεννητικοί (RFC)

## 5.4 Χαρακτηρηστικά συσσορευτών

### 5.4.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Όλοι οι συσσορευτές (μπαταρίες) διακρίνονται από:

- Την **τάση** που έχουν στα άκρα των δύο πόλων τους (6 V, 12 V, 24 V κλπ. ) ανάλογα την εφαρμογή.

- Την **εσωτερική αντίσταση** της μπαταρίας, που οφείλεται σε διάφορες επί μέρους αντιστάσεις, όπως η αντίσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη, η αντίσταση των πλακών, η αντίσταση στις εσωτερικές συνδέσεις, η αντίσταση του ηλεκτρολύτη στην ροή των ιόντων (τα ιόντα είναι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια τα οποία κινούνται στον ηλεκτρολύτη). Επιπροσθέτως, η εσωτερική αντίσταση εξαρτάται από την στάθμη φορτίσεως και την θερμοκρασία της μπαταρίας. Όσο εκφορτίζεται η μπαταρία ή πέφτει η θερμοκρασία της, τόσο αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση. Οι κατασκευαστές μπορούν να μεταβάλλουν την εσωτερική αντίσταση αυξομειώνοντας την επιφάνεια των πλακών. Οι μπαταρίες με μεγάλο αριθμό πλακών (άρα και με μεγαλύτερη χωρητικότητα) έχουν χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση. Καθώς οι μπαταρίες γερνάνε, ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν είναι η αύξηση της εσωτερικής αντιστάσεώς τους.

- Την **χωρητικότητα, C** η οποία αφορά το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του συσσορευτή, με τη μορφή χημικής ενέργειας, υπο ορισμένες συνθήκες (που καθορίζονται κυρίως απο την θερμοκρασία). Με άλλα λόγια, εκφράζεται το ποσό του ρεύματος εκφόρτισης που είναι δυνατόν να παραχθεί κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου. Εκφράζεται σε αμπερώρια (Ah) και σε ιδανικές συνθήκες ισούται με το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος  $I$  που δίνει ο συσσορευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί τελείως, ξεκινώντας απο πλήρη φόρτιση. Άλλο μέτρο της χωρητικότητας του συσσορευτή είναι η κατάσταση φόρτισης (State of Charge ή SOC ), που ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και εκφράζεται ως το ποσοστό της ενέργειας ενός πλήρως φορτισμένου συσσορευτή.

Έτσι, ένας συσσωρευτής του οποίου τα 3/4 της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC.

- Την **πυκνότητα ισχύος** (W/kg). Είναι η ροή της ισχύος ανά μονάδα μάζας ή του βάρους της μπαταρίας. Υποδηλώνει και την μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει ένας συσσωρευτής. Μάλιστα σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων, βάση αυτού εξαρτώνται οι επιδόσεις ενός οχήματος (επιτάχυνση, τελική ταχύτητα).
- Την **ενεργειακή πυκνότητα μάζας** (Wh/kg), που εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας ή βάρους της μπαταρίας.
- Την **ενεργειακή πυκνότητα όγκου** (Wh/m<sup>3</sup>). Είναι το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει μία μπαταρία ανά μονάδα του όγκου της. Ισχύει για συγκεκριμένη περίοδο φόρτισης-εκφόρτισης και καθορίζει το μέγεθος της. Όσο μεγαλύτερη η ενεργειακή πυκνότητα τόσο μικρότερος ο όγκος της μπαταρίας.
- Τέλος, ο **βαθμός απόδοσης** ( $\eta$ ). Είναι ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απορροφάται κατά τη φόρτιση (βλ. παράγραφο 5.4.7).

#### 5.4.2 Επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης

Το **επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης** (depth of discharge ή DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τη μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφόρτισης και από τον ρυθμό εκφόρτισης. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα, προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης για δεδομένο ρυθμό εκφόρτισης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου DOD μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας.

Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνεται η πυκνότητα του διαλύματος του ηλεκτρολύτη, δηλαδή μειώνεται το ειδικό του βάρος. Το φαινόμενο της μείωσης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για λειτουργία του συσσωρευτή σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τη θερμοκρασία στερεοποίησης του νερού (0°C). Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η συγκέντρωση ηλεκτρολύτη στο διάλυμα είναι περίπου 35% κατά βάρος και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος είναι πολύ χαμηλό (περίπου -60°C). Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, το διάλυμα του ηλεκτρολύτη αραιώνεται και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος πλησιάζει το σημείο στερεοποίησης του νερού (0°C). Υπάρχει λοιπόν το ενδεχόμενο της στερεοποίησης του με αποτέλεσμα τη διαστολή και την πιθανή διάρρηξη των τοιχωμάτων του δοχείου της κυψελίδας. Για να αποφευχθεί αυτή η εξέλιξη, το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης πρέπει να μειώνεται θέτοντας την τάση αποκοπής του φορτίου στην συσκευή ρυθμιστή φόρτισης σε κατάλληλο σημείο. Το αποτέλεσμα θα είναι ο συσσωρευτής να μην εκφορτίζεται

πλήρως και η θερμοκρασία στερεοποίησης να διατηρείται χαμηλά. Το κόστος θα είναι η μείωση της αυτονομίας του συστήματος μπαταρίας-συσσωρευτή.

Για να διατηρείται η αυτονομία, η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τη μείωση της σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και το DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

### 5.4.3 Χρόνος ζωής

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολύ υψηλή τάση για αυτούς (overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα όριο (overdischarging). Η υπερφόρτιση έχει ως επακόλουθο την ηλεκτρόλυση, δηλαδή την παραγωγή υδρογόνου, με ταυτόχρονη έντονη ελλάτωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη. Ο χρόνος ζωής ενός συσσωρευτή εκφράζεται σε **κύκλους λειτουργίας**, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδοχικές διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισης του.

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή (C) δεν παραμένει σταθερή, καθώς μειώνεται όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας. Αν το βάθος εκφόρτισης αυξηθεί κατά 40%, οι κύκλοι λειτουργίας ελαττώνονται κάτω από τους μισούς. Ένας κανόνας που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και πρακτικά, περιγράφει το χρόνο ζωής τους, είναι ο ακόλουθος:

**Το γινόμενο βάθους εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι, με καλή προσέγγιση, σταθερό. Δηλαδή:**

$$\beta_{εκφ} \cdot N_{κ} = \text{σταθερό}$$

Όπου

- $N_{κ}$ : το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή.
- $\beta_{εκφ}$ : βάθος εκφόρτισης

Για συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης (π.χ Φ/B συσσωρευτές), το γινόμενο αυτό παίρνει την τιμή 1200, ενώ για κοινούς συσσωρευτες την τιμή 120.

### 5.4.4 Ρεύμα φόρτισης

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τον συσσωρευτή. Οι μέθοδοι φόρτισης που εφαρμόζονται από τους ρυθμιστές φόρτισης στα φωτοβολταϊκά συστήματα διαφέρουν γενικά από αυτές που εφαρμόζουν οι κατασκευαστές για να καθορίσουν τις επιδόσεις της μπαταρίας. Οι προδιαγραφές δεν περιορίζουν κατά κανόνα το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή εφόσον δεν γίνει υπέρβαση της τάσης

εκλύσεως αερίων. Ωστόσο, η τάση εκλύσεως αερίων γίνεται μικρότερη καθώς το ρεύμα φόρτισης γίνεται μεγαλύτερο.

Γενικά η έκλυση αερίων είναι αναπόφευκτη αφού συμβαίνει τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και μετά την υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Για σωστή φόρτιση του συσσωρευτή ένα σωστό σημείο ισορροπίας πρέπει να αναζητείται μεταξύ της μέγιστης δυνατής φόρτισης και της τάσης εκλύσεως αερίων, αφού και οι δύο είναι παράγοντες που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.

Άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το επιδιωκόμενο SOC είναι η - θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, το μέγιστο SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων.

Συνεπώς για την λειτουργία των συσσωρευτών σε κανονικά πλαίσια, κατά τη φόρτιση, εφαρμόζουμε τα παρακάτω:

- για κοινούς συσσωρευτές αυτοκινήτων και UPS: φόρτιση με κανονικό ρυθμό, δηλαδή, με ηλεκτρικό ρεύμα,  $I=C/20$  A
- για φωτοβολταϊκούς συσσωρευτές, με ρυθμό,  $I=C/10$  A

Όπου C: η ονομαστική χωρητικότητα τους συσσωρευτή.

### 5.4.5 Αυτοεκφόρτιση

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση του SOC (state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση. Οφείλεται στη συνεχή δράση του  $H_2SO_4$  στα ηλεκτρόδια, κατά την οποία, ο Pb και ο  $PbO_2$  μετατρέπονται σε  $PbSO_4$ , με ταυτόχρονη έκλυση των αερίων  $H_2$  και  $O_2$ . Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Τυπικοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης ενός συσσωρευτή, είναι:

- σε θερμοκρασία  $5^\circ C$ , η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 2% ανά μήνα.
- σε θερμοκρασία  $15^\circ C$ , η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 4% ανά μήνα.
- σε θερμοκρασία  $25^\circ C$ , η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 10% ανά μήνα.

### 5.4.6 Συντελεστής γήρανσης

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή, με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του. Η μείωση αυτή (**γήρανση**) πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του, να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια που απαιτούν οι καταναλώσεις της εφαρμογής, με το βάθος εκφόρτισης ( $\beta$ ). Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μειώνεται

σταδιακά και μέχρι το πέρας της ζωής του έχει μειωθεί στο 80% της αρχικής ονομαστικής του χωρητικότητας. Συνεπώς, ως τυπική τιμή του συντελεστή γήρανσης του συσσωρευτή επιλέγεται η τιμή  $\eta_{\gamma}=0,8$ .

#### 5.4.7 Βαθμός απόδοσης ενέργειας και φορτίου

Με την φόρτιση ενός συσσωρευτή, ένα ποσοστό της τάξεως του 10-20% της προσφερόμενης σ'αυτόν ενέργειας χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση. Έτσι, ένας συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο **βαθμό απόδοσης ενέργειας,  $\eta_E$** . Ορίζεται ως ο λόγος του ηλεκτρικού έργου που αποδίδει ο συσσωρευτής κατά την εκφόρτιση ( $W=V \cdot I \cdot t$ ), προς το έργο που προσφέρθηκε κατά την προηγούμενη φόρτιση του. Τυπική τιμή 80-85%.

$$\eta_E = \frac{W_{\text{εκφόρτισης}}}{W_{\text{φόρτισης}}} \quad (5.1)$$

Εκτός από τον βαθμό ενεργειακής απόδοσης, χρησιμοποιείται επίσης, ο αντίστοιχος **βαθμός απόδοσης φορτίου,  $\eta_{\Phi}$** , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου κατά την εκφόρτιση, προς το φορτίο κατά τη φόρτιση:

$$\eta_{\Phi} = \frac{Q_{\text{εκφόρτισης}}}{Q_{\text{φόρτισης}}} \quad (5.2)$$

Τυπική τιμή βαθμού απόδοσης φορτίου  $\eta_{\Phi} \sim 90\%$ .

### 5.5 Διαστασιολόγηση Συσσωρευτή

Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε μπορούμε να διαστασιολογήσουμε τον συσσωρευτή. Δηλαδή ένας συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$ , έχει αξιοποιήσιμη (ενεργό) χωρητικότητα  $C$ :

$$C = \beta \cdot C_N \quad (5.3)$$

όπου  $\beta$ : το βάθος εκφόρτισης.

Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί και να ανακτηθεί, σε ιδανικές συνθήκες είναι:

$$E = C \cdot V = \beta \cdot C_N \cdot V \quad (5.4)$$

Ως συντελεστής απόδοσης  $\alpha$ , ενός συσσωρευτή ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί προς την ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, σε κάθε κύκλο -εκφόρτισης. Επομένως η

ενέργεια που ζητείται από τον συσσωρευτή αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης  $E_{\Phi}$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\Phi} = \frac{E}{\alpha} \quad (5.5)$$

Λόγω της σχέσης αυτής και της 5.4 προκύπτει η ονομαστική χωρητικότητα:

$$C_N = \frac{E_{\Phi}}{\beta \cdot V} = \frac{E}{\alpha \cdot \beta \cdot V} \quad (5.6)$$

Αν είναι γνωστή η μέση ισχύς της κατανάλωσης που απαιτείται για διάστημα  $n$  ημερών, τότε μπορεί να υπολογιστεί η ενεργός χωρητικότητα του συσσωρευτή:

$$C = \frac{24 \cdot n \cdot P}{\alpha \cdot V} \quad (5.7)$$

## 5.6 Συσσωρευτές στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Για τη σωστή επιλογή και λειτουργία των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη πολλές παράμετροι:

- τα χαρακτηριστικά της Φ/Β συστοιχίας
- το υπο μελέτη φορτίο
- οι συσκευές προσαρμογής και ελέγχου της ισχύος
- οι μετεωρολογικές συνθήκες
- ο τύπος του συσσωρευτή

Ειδικότερα, στα αυτόνομα Φ/Β συστήματα, όπου δεν επιτρέπεται η διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, οι συσσωρευτές οφείλουν να παρέχουν την απαραίτητα ενέργεια ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία και κατά την διάρκεια παρατεταμένων περιόδων χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Η χωρητικότητα αποθήκευσης μπορεί να κυμαίνεται από 1-2 ημέρες μέχρι έναν μήνα και εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες του τόπου και τον συντελεστή ασφαλείας που επιθυμούμε.

Για τον υπολογισμό των συσσωρευτών ενός Φ/Β συστήματος πρέπει να ληφθούν υπ' όψη η χωρητικότητα που απαιτείται με βάση το φορτίο, ο συντελεστής ασφαλείας, η αυτοεκφόρτιση, οι απώλειες για τη λειτουργία των βοηθητικών συσκευών και το γεγονός ότι πολλοί τύποι συσσωρευτών δεν καταστρέφονται απότομα αλλά υφίστανται μια βαθμιαία μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητάς τους καθώς πλησιάζουν προς το τέλος της ζωής τους. Όσον αφορά το τελευταίο, αποτελεί πάγια τακτική για τους κατασκευαστές των συσσωρευτών να καθορίζουν σαν τέλος

του χρόνου ζωής τους το σημείο όπου η διαθέσιμη χωρητικότητα πέφτει κάτω από το 80% της ονομαστικής.

Για να εξασφαλίσουμε αρκετή διαθέσιμη χωρητικότητα κατά την διάρκεια της ζωής του συσσορευτή σε ένα αυτόνομο σύστημα για μια κυκλική χρήση, πρέπει να εγκαταστήσουμε, αρχικώς, χωρητικότητα ίση με το 125% της επιθυμητής.

Γενικά, οι συσσορευτές αυτόνομων Φ/Β συστημάτων πρέπει να συγκεντρώνουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- συνδυασμό χαμηλής τιμής και απόδοσης
- μεγάλη διάρκεια ζωής
- ικανότητα φόρτισης με χαμηλά ρεύματα
- υψηλή ενέργεια και πυκνότητα ισχύος
- ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
- ανθεκτικότητα (για μεταφορά εν κινήσει)
- ανακυκλώσιμες (για αποφυγή ρύπανσης του περιβάλλοντος)

Κανένας τύπος συσσορευτή δεν συγκεντρώνει όλες τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν στον ίδιο βαθμό. Όμως, έχει επικρατήσει, στα αυτόνομα συστήματα φωτοβολταϊκών που τροφοδοτούν κατοικίες να χρησιμοποιούμε συσσορευτές μολύβδου και σε πιο σπάνιες περιπτώσεις συσσορευτές νικελίου-υδρογόνου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

# **ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ**

### **6.1 Γενικά**

Η διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, απαιτεί την παρεμβολή κατάλληλων ηλεκτρονικών συσκευών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς της ενέργειας κατά τον οικονομικότερο τρόπο καθώς και την προστασία του συσσορευτή από υπερφόρτιση ή από υπερεκφόρτιση. Απο λειτουργικής πλευράς, δύο είναι οι βασικότερες ηλεκτρονικές διατάξεις:

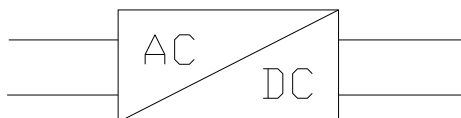
1. Οι μετατροπείς ισχύος
2. και ο ελεγκτής της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης (charge controller)

Ο ελεγκτής φόρτισης τοποθετείται συνήθως σε χωριστή μονάδα σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις, μπορεί όμως να βρίσκεται ενσωματωμένος με τον αντιστροφέα, σε μία ολοκληρωμένη μονάδα.

### **6.2 Μετατροπέας AC/DC**

Ο μετατροπέας AC/DC ή ανορθωτής χρησιμοποιείται για την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης (AC), σε συνεχή (DC). Η μονάδα αυτή (σχήμα 6.1) στα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιείται για την ανόρθωση του εναλλασσόμενου σήματος που μπορεί να προέρχεται από μια ανεμογεννήτρια ή ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ώστε να εξασφαλίζεται και με την βοήθεια του ελεγκτή φόρτισης η φόρτιση των συσσορευτών. Υπάρχουν δύο ειδών μετατροπείς:

- Με διόδους (μη ελεγχόμενη ανόρθωση)
- Με Θυρίστορ ή ελεγχόμενης φάσης (ελεγχόμενη ανόρθωση)



Σχήμα 6.1- Συμβολική παράσταση μετατροπέα AC-DC

- **Μετατροπέας AC/DC με διόδους**

Μετατροπέας AC/DC με διόδους είναι εκείνοι οι μετατροπείς που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση δικτύου σε συνεχή χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διατάξεις με διόδους. Λόγω του ότι οι δίοδοι είναι ημιαγωγοί των οποίων η έναυσή τους δεν μπορεί να ελεγχθεί κατά συνέπεια και η τάση εξόδου αυτών των ανορθωτικών διατάξεων δεν μπορεί να ελέγχεται. Δηλαδή όταν η τάση εισόδου αυτών των διατάξεων παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις τότε και η συνεχή τάση εξόδου με την σειρά της παρουσιάζει αυξομειώσεις. Για τον λόγο αυτό οι ανορθώσεις αυτές ονομάζονται **μη ελεγχόμενες** και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ανάγκη σταθεροποίησης της συνεχούς τάσης εξόδου.

- **Μετατροπέας AC/DC ελεγχόμενης φάσης**

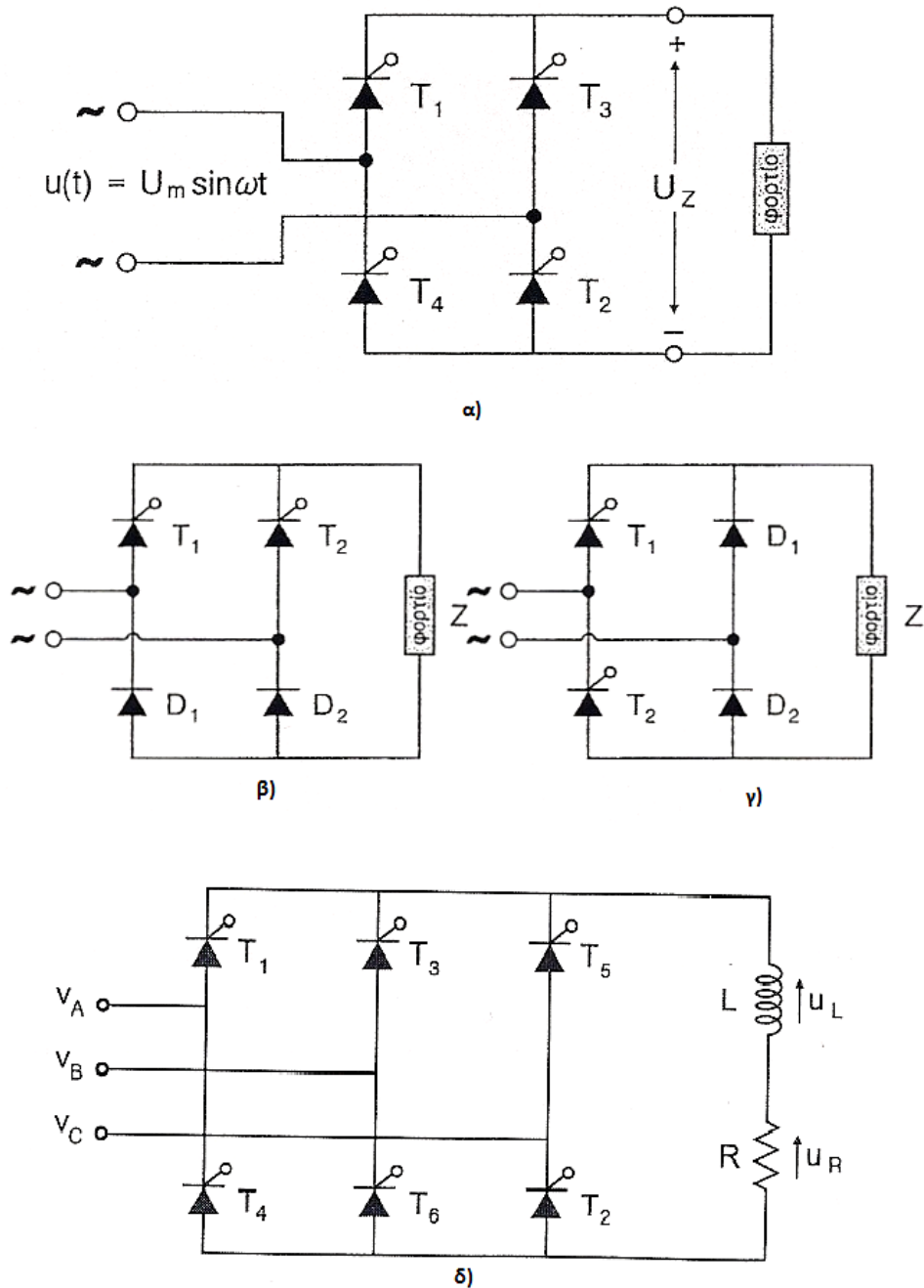
Σκοπός των διατάξεων αυτών, είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου, σε ελεγχόμενου μεγέθους συνεχή τάση, μεταβάλλοντας τη γωνία αγωγής των διακοπτικών στοιχείων. Σε όλους αυτούς τους μετατροπείς, η μεταγωγή (commutation), δηλαδή η μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστορ (ή δίοδο στις μη ελεγχόμενες διατάξεις) στο άλλο, επιτυγχάνεται πολύ εύκολα με τη λεγόμενη φυσική μεταγωγή (line commutation), οφειλόμενη στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Πράγματι στην κατάλληλη χρονική στιγμή, η έναυση του ενός θυρίστορ προκαλεί την ανάστροφη πόλωση και τη σβέση του προηγούμενου, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση πρόσθετων κυκλωμάτων εξαναγκασμένης μεταγωγής. Η ιδιότητα αυτή της φυσικής μεταγωγής κάνει τους συγκεκριμένους (phase-controlled converters) ιδιαίτερα απλούς και λιγότερο δαπανηρούς. Λόγω δε των σχετικά μικρών απωλειών των διακοπτικών στοιχείων, η απόδοσή τους είναι αρκετά μεγάλη της τάξης του 90% και άνω. Οι μετατροπείς αυτοί διακρίνονται σε:

- Μονοφασικούς μετατροπείς
- Τριφασικούς μετατροπείς

Οι βασικές διατάξεις παρουσιάζονται στο σχήμα 6.2. Η χρήση του καθενός από αυτούς, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής (π.χ για μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται οι τριφασικές διατάξεις), από το αν υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής (δηλαδή σε λειτουργία περισσότερα του ενός τεταρτημόρια), από το μέγεθος της διακύμανσης της ανορθωμένης τάσης κ.λ.π.

Οι ημιελεγχόμενες διατάξεις λειτουργούν από τη φύση τους στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή η τάση και το ρεύμα έχουν καθορισμένη πολικότητα από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος.

Οι πλήρως ελεγχόμενες διατάξεις, μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο τεταρτημόρια. Δηλαδή, στους μετατροπείς αυτούς μπορεί να αντιστραφεί η πολικότητα της τάσης, όχι όμως και η φορά του ρεύματος καθόσον οι δίοδοι και τα θυρίστορ είναι μονόπορα στοιχεία.

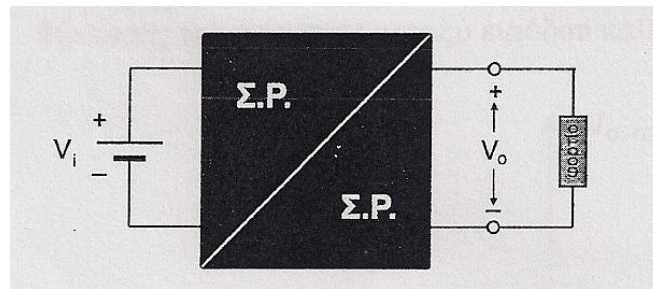


Σχήμα 6.2- α) Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, β) Συμμετρική ημieleγχόμενη γέφυρα, γ) Ασύμμετρη ημieleγχόμενη γέφυρα, δ) Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

### 6.3 Μετατροπές DC/DC

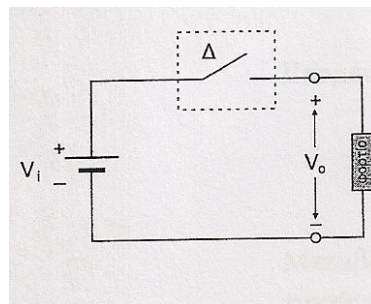
Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσεως,  $V_1$ , σε συνεχή,  $V_0$  ( $V_0 \neq V_1$ ), βασίζεται στη χρήση υψίσυχνων διακοπτικών στοιχείων κυκλωμάτων (switchmode), με τα οποία μπορούμε να διαχειριζόμαστε μεγάλη ισχύ, με ελάχιστες απώλειες. Ο μετατροπέας DC-DC ή Ψαλιδιστής μετατρέπει συνεχή τάση σε συνεχή, μεγαλύτερης ή μικρότερης τιμής, ανάλογα με τις απαιτήσεις, συμβάλλοντας στη

μείωση των καταναλώσεων στη γραμμή μεταφοράς από το χώρο παραγωγής στο χώρο αποθήκευσης.



Σχήμα 6.3- Συμβολική παράσταση μετατροπέα DC-DC

Στο χώρο του Φ/Β πεδίου, τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά και αν απαιτείται παράλληλα, ώστε η παραγόμενη σε αυτά, ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται με όσο γίνεται υψηλότερη τάση, πάντα μέσα στα επιτρεπτά όρια, ώστε το ρεύμα (DC) στη γραμμή μεταφοράς να είναι χαμηλό και αντίστοιχα χαμηλές οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Σε συστήματα μεγαλύτερα μερικών kW<sub>p</sub>, η τάση εξόδου συστοιχίας βρίσκεται συνήθως περίπου στα 300 V, με όριο τα 600 V. Στο χώρο των συσσορευτών, ο μετατροπέας DC-DC, προσαρμόζει την τάση της συστοιχίας στην τάση του συσσορευτή, ώστε να υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της ενέργειας και επιπλέον να μη δημιουργηθούν συνθήκες υπέρτασης του συσσορευτή. Παρακάτω παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετατροπέα DC-DC.



Σχήμα 6.4- Ισοδύναμο κύκλωμα ψαλιδιστή

Ανοιγοκλείνοντας τον διακόπτη Δ του παραπάνω σχήματος η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται στην έξοδο σε "τραίνο" παλμών, δηλαδή σε μια περιοδικά μεταβαλλόμενη τάση με θετική μέση τιμή. Κατά την διάρκεια αγωγής  $t_{on}$ , ο διακόπτης είναι κλειστός και η τάση εισόδου συνδέεται απ' ευθείας στο φορτίο. Κατά το διάστημα  $t_{off}$ , ο διακόπτης είναι ανοιχτός και η τάση στο φορτίο είναι μηδενική. Στην περίπτωση που το φορτίο έχει και επαγωγική συνιστώσα συνδέεται και μια δίοδος ελευθέρως ροής. Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου, είναι:

$$U_{o,rms} = U_o \sqrt{\frac{T}{t_{on}}} = U_o \sqrt{\frac{1}{a}} \quad (6.1)$$

Όπου:  $a = t_{on}/T$  ο βαθμός χρησιμοποίησης (duty-cycle) του μετατροπέα,  $U_o$  η μέση τάση εξόδου του μετατροπέα

Μεταβάλλοντας λοιπόν τον βαθμό χρησιμοποίησης, επιτυγχάνουμε γραμμική μεταβολή της τάσης εξόδου, από το μηδέν έως την τιμή  $V_i$ . Η μεταβολή αυτή αυτή του βαθμού χρησιμοποίησης μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- Με σταθερή συχνότητα: Δηλαδή  $f=1/T=t_{on}/t_{off}$ =σταθερό, και μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής (Pulse Width Modulation, PWM)
- Έχοντας το  $t_{on}$  ή το  $t_{off}$  σταθερό και μεταβάλλοντας την περίοδο  $T$  του παλμού (Frequency Modulation, FM).

Η ταξινόμηση των ψαλιδιστών, μπορεί να γίνει με αρκετά κριτήρια:

1. Ανάλογα με τη σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της τάσης εισόδου
  - Ψαλιδιστές υποβιβασμού (*Step-down dc/dc converter*) ή εν σειρά ψαλιδιστές (*buck dc/dc converter*), στους οποίους η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την τάση εισόδου.
  - Ψαλιδιστές ανύψωσης (*Step-up dc/dc converter*) ή εν παραλλήλω ψαλιδιστές (*Boost dc/dc converter*), στους οποίους η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή το λιγότερο ίση με την τάση εισόδου.
  - Ψαλιδιστές υποβιβασμού-ανύψωσης (*Step up/down dc/dc converter*) ή εν σειρά-εν παραλλήλω ψαλιδιστές (*Buck-Boost dc/dc converter*), στους οποίους η τάση εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.
2. Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς της ενέργειας
  - Ψαλιδιστής με απ'ευθείας σύνδεση, όταν δεν υπάρχει στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου.
  - Ψαλιδιστής με έμμεση σύνδεση, όταν υπάρχει στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή απόδοση της τάξεως του 94%. Οι ψαλιδιστές κατασκευάζονται για ισχύς μεταξύ δέκα και εκατομμυρίων Watt. Συνήθως η συχνότητα μεταγωγής είναι μεταξύ 100 Hz και 1 kHz, αλλά υπάρχουν και ψαλιδιστές κατασκευασμένοι για 10 kHz ή και παραπάνω.

## 6.4 Ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Σε κάθε μετατροπέα DC-DC μπορεί να ενσωματωθεί μικροελεγκτής, ο οποίος συνεχώς να ελέγχει και να επιβάλλει την προσαρμογή του σημείου μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο κατηγορίες:

- **Έμμεσοι ανιχνευτές MPP**

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Σύμφωνα με μία μέθοδο η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μια άλλη μέθοδος ρυθμίζει την τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. Τέλος μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή:

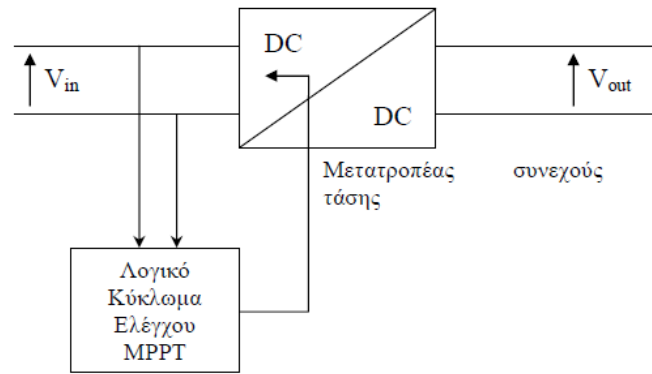
$$\frac{V_m}{V_{oc}} = \text{σταθερό} \quad (6.2)$$

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο, που εξασφαλίζει η μέγιστη ισχύ.

- **Άμεσοι ανιχνευτές MPP**

Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας. Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ό,τι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC μετατροπέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλοϊκό σχεδιάγραμμα DC/DC μετατροπέα που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της Φ/Β γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.5- Απλοποιημένη διάταξη ανιχνευτή MPP

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P = V \cdot I \quad (6.3)$$

Εάν λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στη καμπύλη V-I, τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά dV και dI αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι τώρα:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + I \cdot dV \quad (6.4)$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του Φ/B στοιχείου μηδενίζεται. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Leftrightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (6.5)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής ( $Z_d$ ) ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση ( $Z_s$ ).

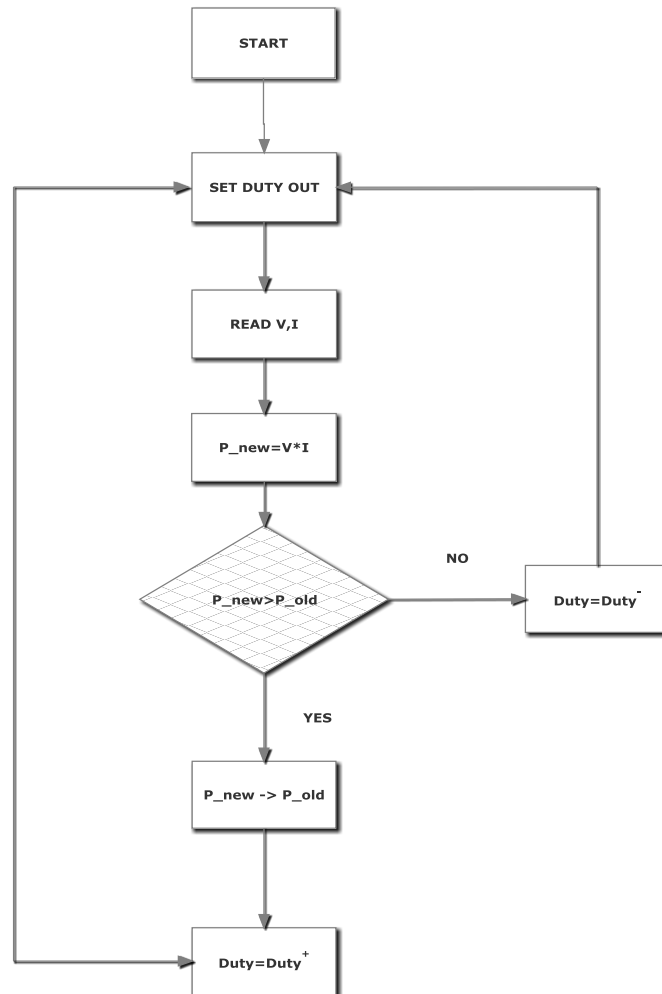
Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

- Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d$  και η στατική αντίσταση  $Z_s$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή:  $Z_s = -Z_d$  (6.6)

- Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη:  $\frac{dP}{dV} \geq 0$  (6.7)

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 6.6- Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος

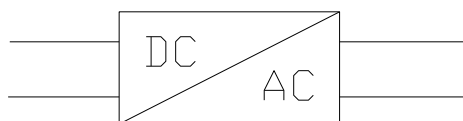
Σύμφωνα με αυτό εισάγεται μια περιοδική διαταραχή της τάσης και ελέγχεται αν αυτή προκαλεί αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος. Αν το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ισχύος τότε εισάγεται εκ νέου η ίδια διαταραχή ενώ αν το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύος τότε εισάγεται η αντίθετη διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται μείωση και το αντίστροφο αν είχε εισαχθεί μείωση της τάσης). Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο σημεία της καμπύλης ισχύος και ταλαντεύεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι εμφανίζει απώλειες ισχύος ιδίως στη περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει απότομα.

## 6.4 Μετατροπéας DC-AC

Η χρησιμοποίηση του εναλλασσομένου ρεύματος σε Φ/Β εφαρμογές επιβάλλεται στις περισσότερες περιπτώσεις, εξαιτίας της επικράτησής του, κατά γενικό τρόπο, σε κάθε είδους οικιακές χρήσεις και εφαρμογές καθώς και στη βιομηχανία. Γενικά, τρεις είναι οι κύριοι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να μετατρέψουμε συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC).

1. Με συνδυασμό κινητήρα συνεχούς ρεύματος με γεννήτρια εναλλασσομένου
2. Με χρήση κλασικού μηχανικού ή ηλεκτρονικού διακοπτικού συστήματος σε συνεργασία με μετασχηματιστή
3. Με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα DC-AC (αντιστροφéας ή inverter)

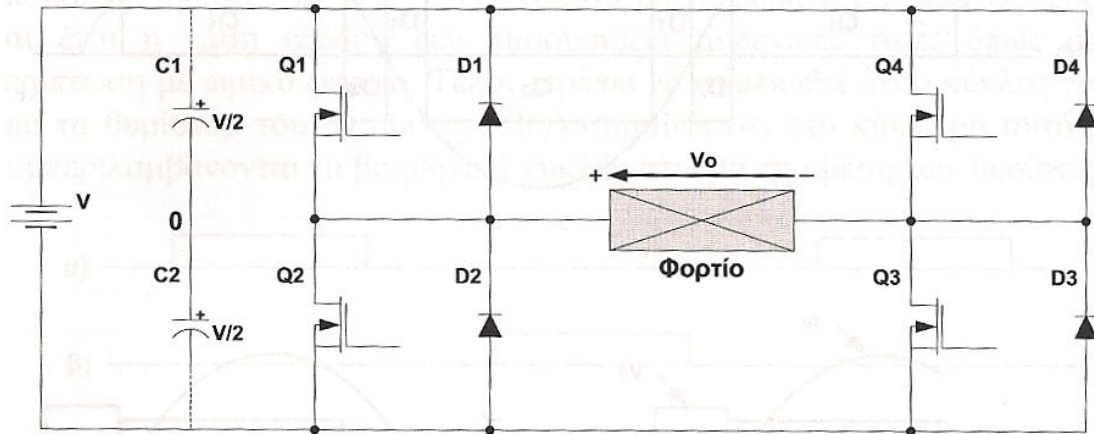
Ο **αντιστροφéας** είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλώσεις εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει π.χ. στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσης. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (MOSFET, thyristor, bipolar transistors ισχύος κ.α), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (inversion).



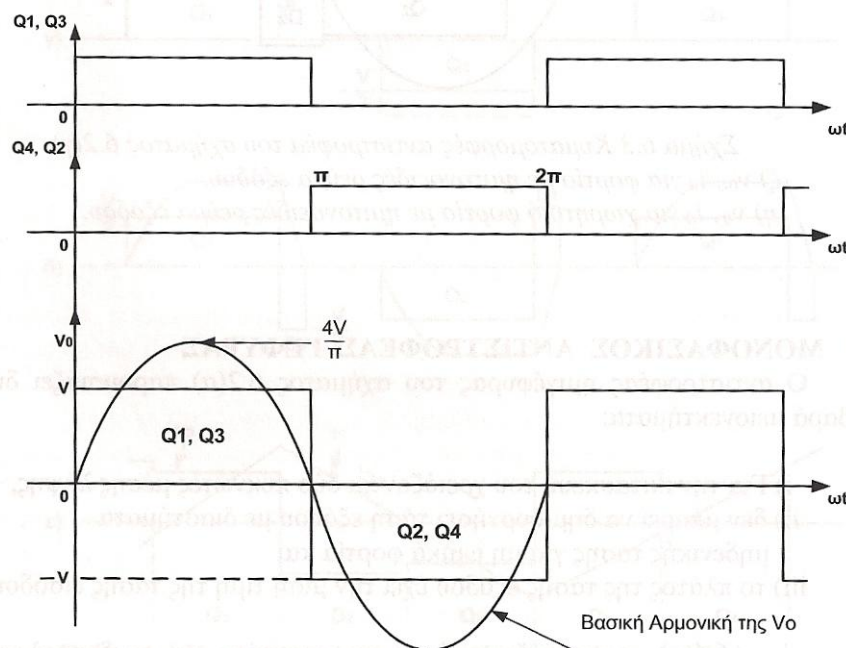
Σχήμα 6.7- Συμβολική παράσταση μετατροπέα DC-AC

### 6.4.1 Μονοφασικός μετατροπέας DC-AC

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την τοπολογία τους σε αντιστροφείς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας. Οι πρώτοι υστερούν σαφώς για αυτό και σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς πλήρους γέφυρας. Όταν η είσοδος των αντιστροφέων είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (Voltage Source Inverters VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (Current Source Inverters CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν έχει να κάνει απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η μορφή της πηγής χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν έναν πυκνωτή παράλληλα συνδεδεμένο με την πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφéας σε συνδεσμολογία γέφυρας:



Σχήμα 6.8- Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας



Σχήμα 6.9- Τάση εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα για τετραγωνικό παλμό εισόδου

Αποτελείται από δύο ζεύγη διακοπών και διόδων τα οποία λειτουργούν ως εξής (δύο σκέλη): Όταν  $Q_1, Q_3$  βρίσκονται σε αγωγή οι  $Q_2$  και  $Q_4$  βρίσκονται σε αποκοπή. Στην περίπτωση αυτή η τάση εξόδου είναι ίση με  $V$ . Αντίστροφα, όταν  $Q_2, Q_4$  βρίσκονται σε αγωγή οι  $Q_1, Q_3$  βρίσκονται σε αποκοπή. Η τάση εξόδου τότε αλλάζει πολικότητα, δηλαδή γίνεται ίση με  $-V$ . Όσον αφορά τις διόδους στην περίπτωση ωμικού φορτίου δεν έχουν ενεργό ρόλο στο κύκλωμα (το ρεύμα εξόδου έχει παρόμοια μορφή με την τάση).

Στην περίπτωση επαγωγικού φορτίου όμως έχουμε το εξής φαινόμενο: Δεν είναι δυνατή η αντιστροφή του ρεύματος αμέσως μετά το κλείσιμο των διακοπών  $Q_2, Q_4$  και το άνοιγμα των  $Q_1, Q_3$  λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο (όπως και κατά το άνοιγμα των  $Q_2, Q_4$ ). Έτσι υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που το ρεύμα ρέει μέσω των διόδων  $D_2$  και  $D_4$  όταν  $Q_2, Q_4$  κλειστοί και μέσω των

διόδων  $D_1$  και  $D_3$  όταν  $Q_1$ ,  $Q_3$  κλειστοί, επιστρέφοντας ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας. Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα κλειστοί οι διακόπτες του ίδιου σκέλους, γιατί τότε προκύπτει βραχυκύκλωμα στη DC πλευρά. Δηλαδή πρέπει να αποφευχθεί η κατάσταση στην οποία οι  $Q_1$  και  $Q_2$  είναι κλειστοί ταυτόχρονα και αντίστοιχα η κατάσταση στην οποία οι  $Q_3$  και  $Q_4$  είναι κλειστοί.

Στη συνδεσμολογία του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα παρατηρούμε στα άκρα της DC εισόδου δύο ίδιους πυκνωτές σε σειρά. Οι πυκνωτές αυτοί πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλη χωρητικότητα ώστε να εξασφαλίσουμε σταθερή τάση εισόδου. Αν στην έξοδο του αντιστροφέα υπάρχει μετασχηματιστής δεν δημιουργείται πρόβλημα στους διακόπτες από το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή καθώς αυτό βρίσκει διέξοδο μέσω των διόδων του.

#### 6.4.2 Έλεγχος τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα με την τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)

Το εύρος των παλμών της τάσεως εξόδου του αντιστροφέα του σχήματος 6.9 πρέπει να μεταβάλλεται σε σχέση με τις διακυμάνσεις της τάσης εισόδου. Η τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος της τάσεως εξόδου μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου ονομάζεται **Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation, PWM)**.

Ο ορισμός της τεχνικής παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11 και έχει ως εξής:

i) Με την τεχνική αυτή παράγονται σε επίπεδο κυκλώματος ελέγχου (ασθενή σήματα) μια ημιτονοειδής κυματομορφή, η οποία ονομάζεται *κυματομορφή αναφοράς*, και μια τριγωνική κυματομορφή η οποία ονομάζεται *κυματομορφή φορέα*. Οι δύο κυματομορφές είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους και παράγονται από γεννήτριες κυματομορφών. Αυτές οι κυματομορφές παρουσιάζονται στο σχήμα 6.11 όπου:

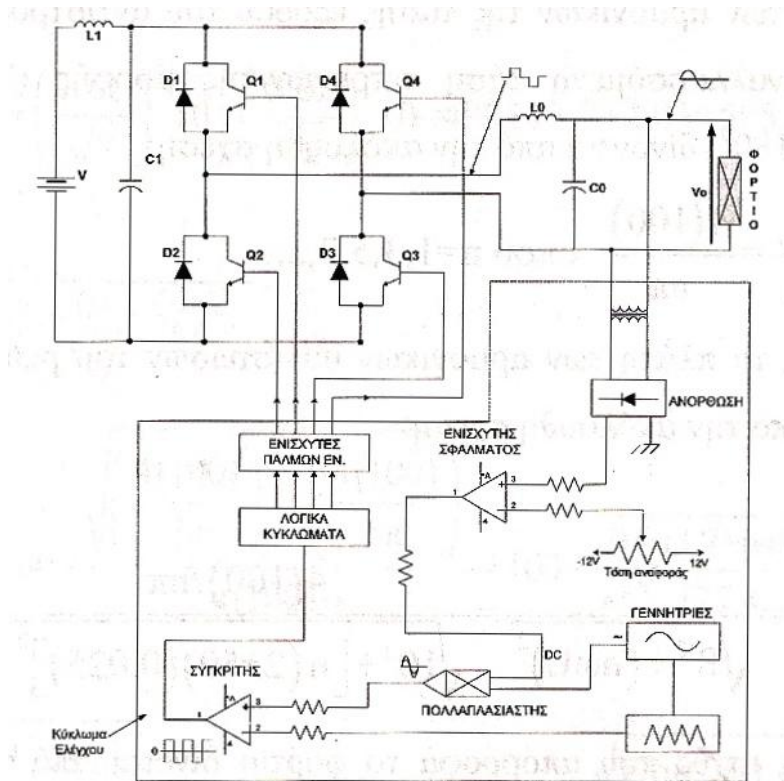
$A_r$  = πλάτος κυματομορφής αναφοράς

$A_c$  = πλάτος κυματομορφής φορέα

$T_c = 1/F_c$  = περίοδος κυματομορφής φορέα

$T_r = 1/F_r$  = περίοδος κυματομορφής αναφοράς

$M_f = A_r/A_c$  = συντελεστής διαμόρφωσης

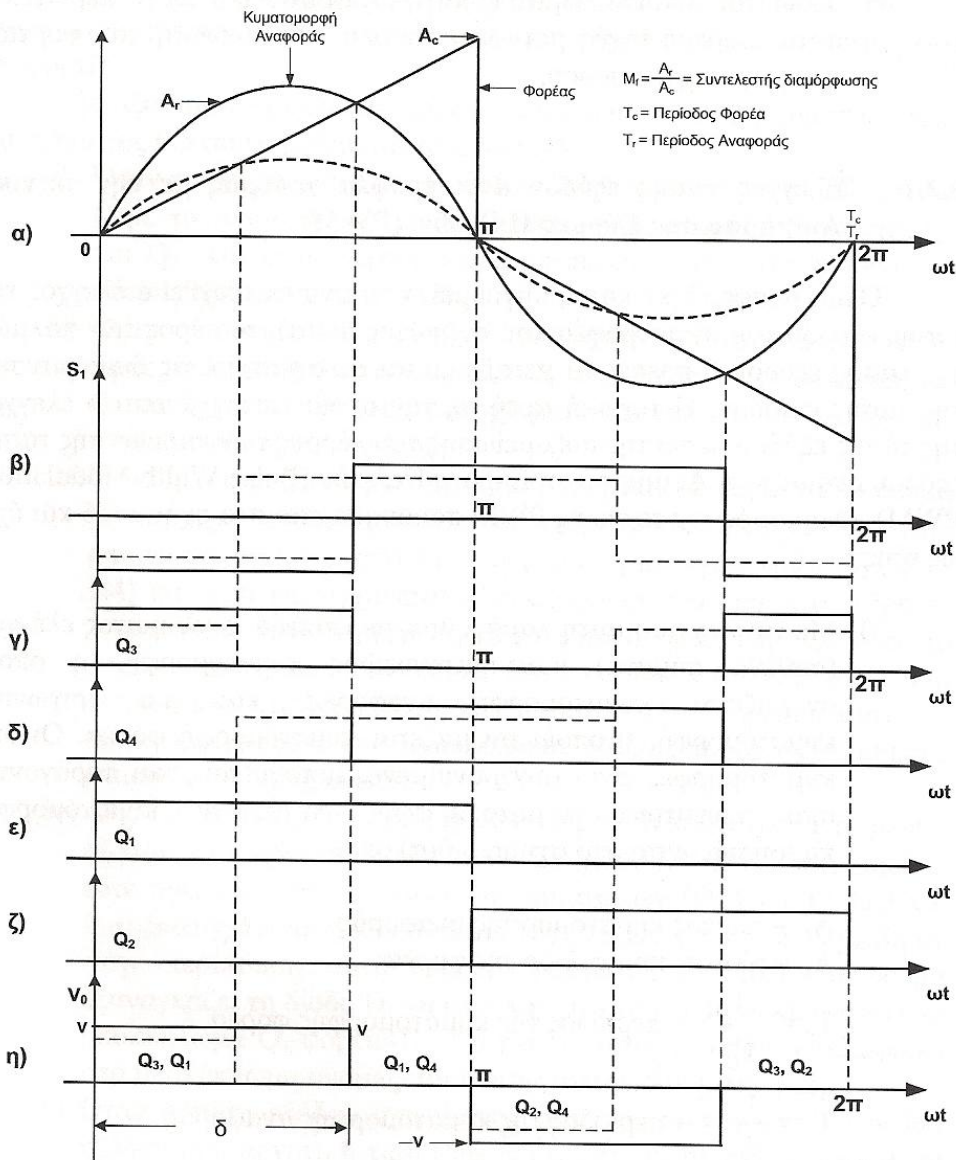


Σχήμα 6.10- Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου

ii) Στη συνέχεια, οι δύο παραπάνω κυματομορφές εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή, η έξοδος του οποίου θα είναι η κυματομορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11β). Όπως διαπιστώνεται από τα σχήματα 6.11α) και β), η κυματομορφή εξόδου του συγκριτή εξαρτάται από τα σημεία τομής των δύο κυματομορφών εισόδου. Στο σχήμα 6.11β) παρουσιάζονται δύο διαφορετικές τιμές του πλάτους  $A_r$  της κυματομορφής αναφοράς, κρατώντας σταθερό το πλάτος  $A_c$  της κυματομορφής φορέα.

iii) Το αρνητικό μέρος της τάσης εξόδου του συγκριτή, ορίζει του παλμούς έναυσης του διακόπτη  $Q_3$ . Αναστρέφοντας τους παλμούς έναυσης του διακόπτη  $Q_3$  ορίζονται οι παλμοί έναυσης του διακόπτη  $Q_4$ . Οι παλμοί έναυσης των διακοπών  $Q_1$  και  $Q_2$  παράγονται από την κυματομορφή αναφοράς και παρουσιάζονται αντίστοιχα στα σχήματα 6.11 ε) και ζ).

iv) Η τάση εξόδου του αντιστροφέα για τους παραπάνω παλμούς έναυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11η). Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα αυτό, αυξομειώνοντας το συντελεστή διαμόρφωσης  $M_f$ , το εύρος των παλμών της τάσης εξόδου επίσης αυξομειώνεται και έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της τάσης εξόδου.



Σχήμα 6.11- Ορισμός της τεχνικής PWM, α) Κυματομορφές της αναφοράς και του φορέα, β) Κυματομορφή της τάσεως εξόδου του συγκριτή, γ) Παλμός έναυσης του  $Q_3$ , δ) Παλμός έναυσης του  $Q_4$ , ε) Παλμός έναυσης του  $Q_1$ , ζ) Παλμός έναυσης του  $Q_2$ , η) Τάση εξόδου του αντιστροφέα

Η κυματομορφή της τάσης εξόδου  $v_0$  δίνεται με χρήση των σειρών Fourier από την σχέση:

$$v_0 = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \sin\left(\frac{n\delta}{2}\right) \sin(n\omega t) \quad (6.8)$$

Η τάση εξόδου είναι μια κυματομορφή, η οποία αποτελείται από την θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν έτσι ώστε να παρουσιάζει *Συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, THD)* μικρότερο του 5%. Η τιμή αυτή δίνεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή του αντιστροφέα.

Η τιμή του THD, ο οποίος χαρακτηρίζει την ποιότητα ενός εναλλασσόμενου μη ημιτονοειδούς μορφής σήματος, δίνεται από την σχέση:

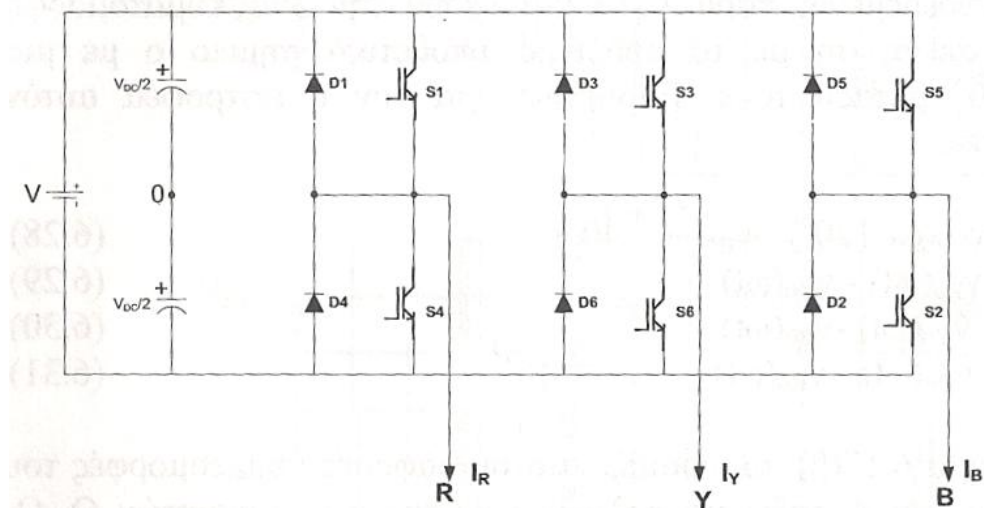
$$THD\% = \frac{1}{V_{0,1}} \left[ \sum_{n=3,5}^{\infty} (V_{0,n})^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \quad (6.9)$$

Όπου  $V_{0,1}$ : πλάτος την βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου,  $V_{0,n}$ : πλάτος την n-οστής αρμονικής της τάσης εξόδου

Για καθαρά ημιτονοειδή σήματα τάσης ή ρεύματος ο  $THD\% = 0\%$ .

### 6.4.3 Τριφασικός μετατροπέας DC/AC

Το κύκλωμα του βασικού τριφασικού αντιστροφέα με τροφοδοσία συνεχούς τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.12. Όπως βλέπουμε το κύκλωμα ισχύος του αντιστροφέα που έχει υλοποιηθεί με MOSFET ισχύος θα μπορούσε να υλοποιηθεί με τρανζίστορ ισχύος ή GTOs ή IGBTs ή θυρίστορ ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου του αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από τρεις αντιστροφείς ημιγέφυρας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και έχουν την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου σε σχέση με το ουδέτερο υποθετικό σημείο 0 με μία μετατόπιση  $120^\circ$  μεταξύ τους.



Σχήμα 6.12- Συνδεσμολογία τριφασικού αντιστροφέα με πηγή τάσης

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν οκτώ επιτρεπόμενες διακοπτικές καταστάσεις. Όπως και στον μονοφασικό αντιστροφέα, έτσι και εδώ, δεν γίνεται οι διακόπτες του ίδιου κλάδου να είναι ταυτόχρονα κλειστοί, καθώς τότε δημιουργείται βραχυκύκλωμα στη πλευρά DC. Ακόμα σε περίπτωση που οι διακόπτες αυτοί είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί τότε καταλήγουμε σε απροσδιόριστες καταστάσεις, για αυτό και οι καταστάσεις αυτές είναι μη επιτρεπόμενες. Τέλος υπάρχουν δύο καταστάσεις, που η τάση στη πλευρά AC μηδενίζεται.

α/α	Κατάσταση	$V_R$	$V_Y$	$V_{RY}$
1	$S_1, S_2, S_6$ ON $S_4, S_5, S_3$ OFF	-V	0	V
2	$S_2, S_3, S_1$ ON $S_5, S_6, S_4$ OFF	-V	V	0
3	$S_3, S_4, S_2$ ON $S_6, S_1, S_5$ OFF	0	V	-V
4	$S_4, S_5, S_3$ ON $S_1, S_2, S_6$ OFF	V	0	-V
5	$S_5, S_6, S_4$ ON $S_2, S_3, S_1$ OFF	V	-V	0
6	$S_6, S_1, S_5$ ON $S_3, S_4, S_2$ OFF	0	-V	V
7	$S_1, S_3, S_5$ ON $S_4, S_6, S_2$ OFF	0	0	0
8	$S_4, S_6, S_2$ ON $S_1, S_3, S_5$ OFF	0	0	0

Πίνακας 6.1- Καταστάσεις λειτουργίας διακοπών τριφασικού αντιστροφέα

### Ρύθμιση τριφασικού αντιστροφέα με την τεχνική SPWM

Στον τριφασικό αντιστροφέα έχουμε την εμφάνιση ανωτέρων αρμονικών οι οποίες έχουν την ίδια περίπου συχνότητα με την βασική αρμονική. Η αποτελεσματική εξάλειψη ή μείωση αυτών των ανώτερων αρμονικών επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός φίλτρου εξόδου μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου. Το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του φίλτρου ελαττώνεται κατά πολύ με την τεχνική SPWM. Η τεχνική SPWM για τον τριφασικό αντιστροφέα, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.13 και έχει ως εξής:

i) Για τον τριφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μια για κάθε ημιγέφυρα) και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς  $A_r$  είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα  $A_c$ , το οποίο παραμένει σταθερό. Η τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης καθώς και η κανονικοποιημένη συχνότητα του φορέα δίνονται από τις σχέσεις:

$$M_f = A_r/A_c \quad (6.9)$$

$$F_{nc} = F_c/F_r \quad (6.10)$$

ii) Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής φορέα, ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των ημιαγωγών διακοπών  $Q_1-Q_6$  του αντιστροφέα καθώς και τις τάσεις εξόδου των τριών ημιγεφυρών σε σχέση με το υποθετικό ουδέτερο σημείο 0. Οι κυματομορφές των φασικών τάσεων  $V_{R0}$  και  $V_{Y0}$  του αντιστροφέα παρουσιάζονται στα σχήματα 6.13α) και β) και έχουν διαφορά φάσης  $120^\circ$ .

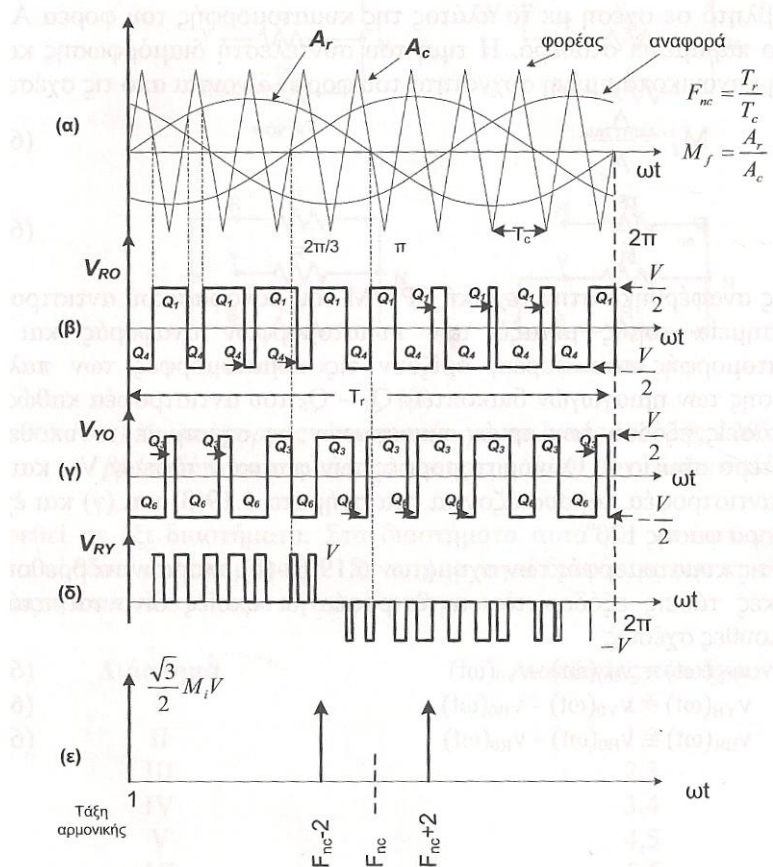
iii) Από τις κυματομορφές των σχημάτων 6.13β) έως δ) μπορούν να βρεθούν εύκολα οι πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{RY}(\omega t) = V_{R0}(\omega t) - V_{Y0}(\omega t) \quad (6.11)$$

$$V_{YB}(\omega t) = V_{Y0}(\omega t) - V_{B0}(\omega t) \quad (6.12)$$

$$V_{BR}(\omega t) = V_{B0}(\omega t) - V_{R0}(\omega t) \quad (6.13)$$

Η κυματομορφή της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα  $V_{RY}(\omega t)$  παρουσιάζεται το σχήμα 6.13δ). Οι υπόλοιπες πολικές τάσεις είναι οι ίδιες με αυτές του σχήματος 6.13δ) αλλά μετατοπισμένες κατά  $120^\circ$  και  $240^\circ$  αντίστοιχα.



Σχήμα 6.13- Ορισμός της τεχνικής SPWM για τριφασικούς αντιστροφείς. α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα, β) Φασική τάση εξόδου  $V_{R0}$ , γ) Φασική τάση εξόδου  $V_{Y0}$ , δ) Πολική τάση εξόδου του αντιστροφέα  $V_{RY}$ , ε) Φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου  $V_{RY}$

iv) Με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού, τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα μπορούν να υπολογιστούν για διάφορες τιμές των μεταβλητών της τεχνικής SPWM, που είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης  $M_f$ , και η κανονικοποιημένη συχνότητα του φορέα  $F_{nc}$ . Με το ίδιο πρόγραμμα, και με τις τιμές των σημείων τομής για κάποιες συγκεκριμένες τιμές των  $M_f$  και  $F_{nc}$ , μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της κυματομορφής  $V_{RY}(\omega t)$ , το οποίο είναι το ίδιο και για τις κυματομορφές  $V_{YB}(\omega t)$  και  $V_{BR}(\omega t)$  και συγκεντρωτικά παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

$M_f$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
<b>Τάξη Αρμονικής</b>	<b>Κανονικοποιημένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου V</b>				
<b>Βασική</b>	0,173	0,346	0,520	0,693	0,866
<b><math>F_{nc} \pm 2</math></b>	0,013	0,053	0,114	0,190	0,275
<b><math>2F_{nc} \pm 1</math></b>	0,165	0,282	0,321	0,272	0,086

Πίνακας 6.2- Φάσματα συχνοτήτων των κυματομορφών  $V_{RY}(\omega t)$ ,  $V_{BR}(\omega t)$   $V_{YB}(\omega t)$ 

Με βάση τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$\hat{V}_{RY,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} VM_f \quad (6.14)$$

- Η τάξη της επικρατούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας καθώς και το πλάτος αυτής για την χειρότερη περίπτωση λειτουργίας του αντιστροφέα ( $M_f=1$ ) είναι:

$$d = F_{nc} - 2 \quad (6.15)$$

$$V_{(RY,d)_{\max}}^{\wedge} = 0,27V \quad (6.16)$$

Οι σχέσεις αυτές χρειάζονται για την σχεδίαση του φίλτρου εξόδου του αντιστροφέα.

- Η κανονικοποιημένη τιμή του φορέα,  $F_{nc}$ , επιλέγεται έτσι ώστε να είναι άρτιος ή περιττός αριθμός πολλαπλάσιος του 3 για να μην περιέχει η τάση εξόδου ζυγές αρμονικές συνιστώσες.

Όπως διαπιστώνεται από τον πίνακα 6.2, το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας μεταβάλλεται σε σχέση με το συντελεστή διαμόρφωσης. Επομένως, με την τεχνική SPWM επιτυγχάνεται ο πλήρης έλεγχος της τάσης εξόδου της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μέσω του συντελεστή διαμόρφωσης.

## 6.5 Ελεγκτής φόρτισης συσσορευτών

Η φόρτιση των ηλεκτρικών συσσορευτών, μέσω μιας πηγής ηλεκτρικής ενέργειας π.χ Φ/Β συστοιχίας, ανεμογεννήτριας (Α/Γ), ή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (Η/Ζ), απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε, όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης, να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι, αποφεύγεται η υπέρταση του συσσορευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσορευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση ώστε να προληφθεί η καταστροφική για τον συσσορευτή, κατάσταση υπερεκφόρτισης.

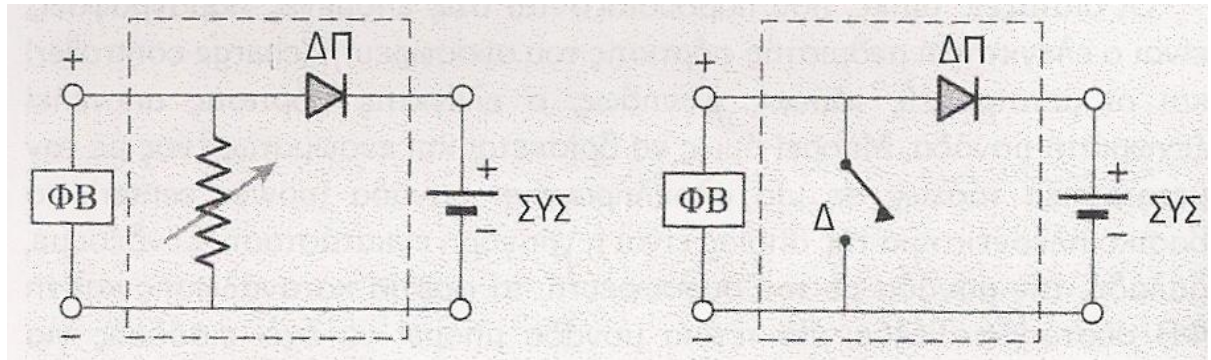
Ο **ελεγκτής φόρτισης**, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσορευτή ξεπεράσει προς τα άνω (αντίστοιχα προς τα κάτω) ορισμένα όρια τάσης (setpoints), όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης-εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές (microcontrollers), που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (relays), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος (MOSFET, triacs, thyristors κ.α). Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια διάοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω των κυκλωμάτων της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Αυτή που αφορά καθαρά σε Φ/Β συστήματα
- Και εκείνη που μπορεί να διαχειρίζεται ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρική ενέργειας (Φ/Β, Α/Γ, Η/Ζ)

### **A) Παράλληλος ελεγκτής φόρτισης**

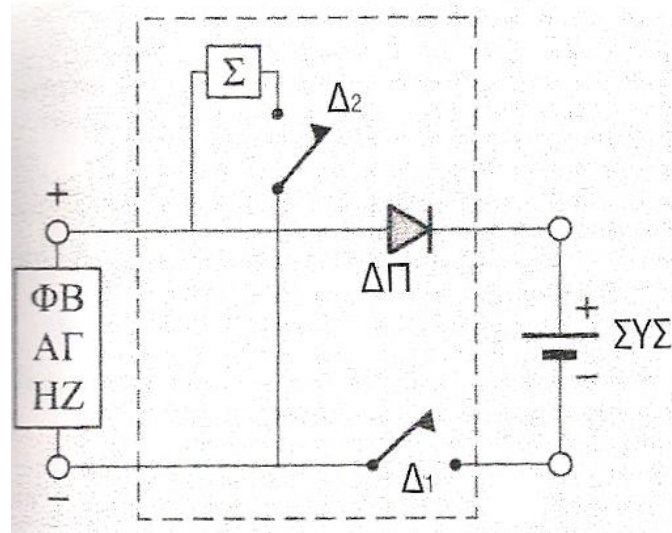
Στην ειδική περίπτωση ενός Φ/Β συστήματος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως πηγή σταθερού ρεύματος, χρησιμοποιούνται διατάξεις, των οποίων τα τυπικά διαγράμματα δείχνονται στο σχήμα 6.1. Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι **συνδεδεμένο παράλληλα** με το Φ/Β σύστημα (shunt controller), με δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με τη μέγιστη φόρτιση (σχήμα 6.1), είτε ως διακόπτης ON/OFF. Στην περίπτωση του παράλληλου ρυθμιστή, όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης), το ελεγχόμενο στοιχείο βραχυκυκλώνει το Φ/Β σύστημα, δίχως να προκαλείται καμία απολύτως βλάβη σε αυτό. Έτσι, απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσής της.



Σχήμα 6.14-Παράλληλος ελεγκτής φόρτισης γραμμικός (αριστερά) και διακοπτικός (δεξιά)

### B) Ελεγκτής φόρτισης σειράς

Η βασική αρχή λειτουργίας της διάταξης του σχήματος 6.2, βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών,  $\Delta_1$  και  $\Delta_2$ , εκ των οποίων ο πρώτος διακόπτει το ρεύμα από το σύστημα ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, όταν η τάση φόρτισης φτάσει στο όριο τάσης. Την ίδια στιγμή ενεργοποιείται ο διακόπτης  $\Delta_2$ , ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης ( $\Sigma$ ) της επι πλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει το σύστημα αποθήκευσης. Το στοιχείο απόδοσης, πρέπει να μπορεί να αποβάλλει εύκολα την αποδιδόμενη σ' αυτό ενέργεια, προς το περιβάλλον (ροή ενέργειας με θερμοαγωγή από την ηλεκτρονική διάταξη προς το μεταλλικό ψυκτήρα και από κει προς το περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία). Ονομάζεται **ρυθμιστής σε σειρά** (series controller). Μπορεί να ελέγξει τη φόρτιση συσσωρευτών από Φ/Β σύστημα, από Α/Γ και από Η/Ζ.



Σχήμα 6.15- Ελεγκτής φόρτισης σειράς

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις αυτού του ρυθμιστή, με διαφορές που εντοπίζονται στο τρόπο που προσεγγίζεται η τελική κατάσταση φόρτισης, από κάθε μία απ' αυτές. Συνοπτικά, οι περισσότερο δημοφιλείς περιπτώσεις είναι:

- Ο απλός ρυθμιστής φόρτισης σειράς, με ένα όριο τάσης.
- Ο ρυθμιστής φόρτιση σειράς δύο βαθμίδων σταθερού ρεύματος (φτάνοντας στο όριο τάσης, η φόρτιση διατηρείται σε επίπεδα συντήρησης).
- Ο ρυθμιστής φόρτισης σειράς δύο βαθμίδων τάσεως. Επιτρέπει για μικρό χρονικό διάστημα, τη φόρτιση σε τάση λίγο μεγαλύτερη της οριακής (14,5 V , με οριακή τάση φόρτισης τα 14V, σε συσσορευτή ονομαστικής τάσης 12V) και στην συνέχεια επιβάλλεται ως άνω όριο η οριακή τάση. Προκαλείται, έτσι, για λίγο ανάδευση του ηλεκτρολύτη και αποφυγή διαστρωμάτωσης (Stratification).
- Ο ρυθμιστής φόρτισης σειράς, με έλεγχο του διακοπτικού στοιχείου ( $\Delta 1$ ), με παλμούς, είτε μεταβολής συχνότητας είτε μεταβλητού πλάτους (pulse frequency or width modulation).
- Ο γραμμικός ρυθμιστής φόρτισης σειράς, σταθερής τάσης (κατά τη φόρτιση προσαρμόζεται συνεχώς η ισοδύναμη αντίσταση του στοιχείου σε σειρά, ώστε η τάση φόρτισης να παραμένει σταθερή).

Η διάταξη φόρτισης συμπληρώνεται από παρόμοια διάταξη ελέγχου εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας, με σκοπό την προστασία του συσσορευτή από υπερεκφόρτιση (overdischarging), και η οποία, συνήθως, ενσωματώνεται στην πρώτη. Διακόπτει το κύκλωμα παροχής ενέργειας από το συσσορευτή στην κατανάλωση, όταν η τάση στα άκρα του συσσορευτή μειούμενη, φτάσει ορισμένη τιμή (disconnect setpoint). Π.χ σε ένα σύστημα συσσορευτών με ονομαστική τάση 24V, τίθεται ως σημείο αποσύνδεσης, η τάση 22-23V. Το σύστημα ρυθμίζεται έτσι ώστε να παρουσιάζει χρονική αντοχή (5-10 sec) σε βυθίσεις τάσης που προκαλούνται κατά την είσοδο, στο κύκλωμα κατανάλωση, ενός φορτίου μεγάλης ισχύος.

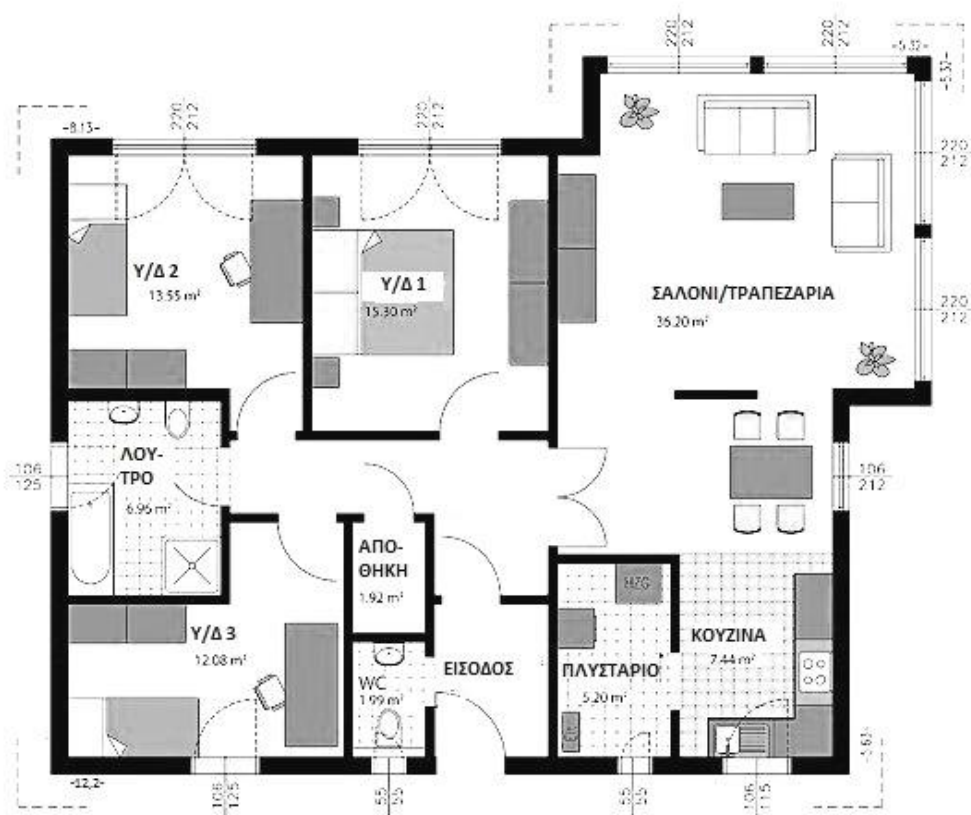
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

# ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΟΙΚΙΑ 130m<sup>2</sup>

### 7.1 Εισαγωγή

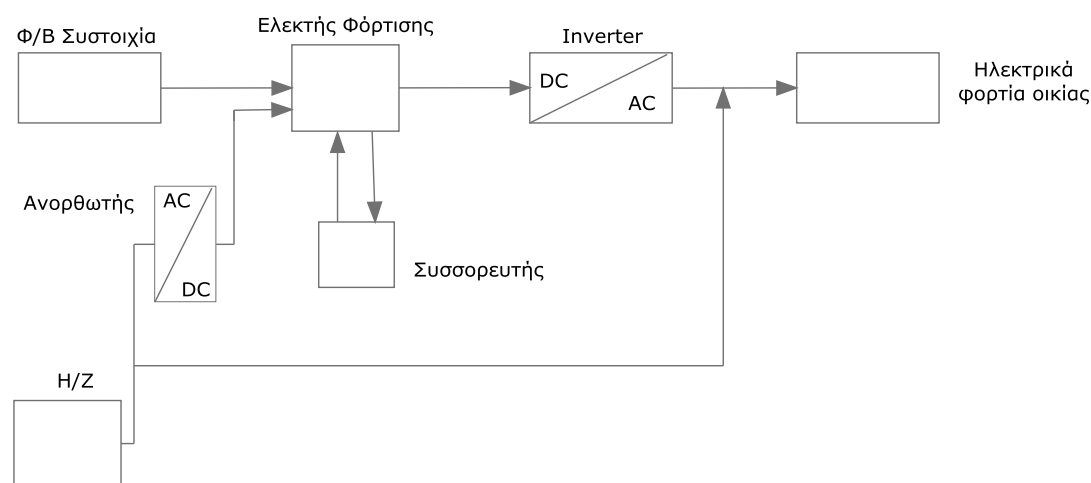
Στο ακόλουθο κεφάλαιο μελετάται η ηλεκτρική τροφοδότηση μονοκατοικίας στη πόλη της Κορίνθου του νομού Κορινθίας, η οποία βρίσκεται απομακρυσμένη από το δίκτυο της ΔΕΗ. Οι καταναλώσεις υπολογίστικαν σύμφωνα με τις ανάγκες μιας μέσης τετραμελούς οικογένειας.

Η υπο μελέτη οικία έχει εμβαδό 130 m<sup>2</sup> και αποτελείται από 3 κρεβατοκάμαρες, 2 μπάνια, την σαλονοτραπεζαρία, την κουζίνα, το πλυσταριό και την αποθήκη (σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1 - Κάτοψη Οικίας

Η οικογένεια αποφάσισε να εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά για την τροφοδότηση της κατοικίας με ηλεκτρικό ρεύμα. Δεδομένης της κατάστασης, όλα τα μέλη της οικογένειας συμφώνησαν να περιορίσουν στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις ανάγκες τους σε ηλεκτρικό ρεύμα, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου η ηλιοφάνεια στην περιοχή είναι περιορισμένη. Μαζί με τα φωτοβολταϊκά και τους συσσωρευτές που θα τροφοδοτήσουν την οικία θα χρησιμοποιηθεί και ως εφεδρική πηγή ενέργειας ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (ντιζελογεννήτρια). Η ντιζελογεννήτρια θα χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθούν φορτία αιχμής όταν τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές δεν επαρκούν και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η ντιζελογεννήτρια θα αναλάβει επίσης τη φόρτιση των συσσωρευτών όταν αυτό δε θα γίνεται από τα φωτοβολταϊκά.



Σχήμα 7.2 - Υβριδικό Φ/Β σύστημα με ηλεκτρικό συσσωρευτή και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών μπορεί να γίνει με δυο τρόπους: Είτε στην στέγη, είτε σε μια έκταση στην αυλή με trackers. Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών στην στέγη είναι τα εξής:

- Μικρότερο κόστος εγκατάστασης
- Εξοικονόμηση χώρου, καθώς η στέγη είναι αχρησιμοποίητη έκταση

Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών με trackers είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στην αρχιτεκτονική του σπιτιού, σε αντίθεση με την εγκατάσταση στην στέγη, όπου πρέπει μια μεγάλη έκταση της σκεπής να προσανατολίζεται στο νότο.
- Μεγαλύτερη απόδοση έως και 40% με αποτέλεσμα την χρήση λιγότερων πάνελ για την ίδια παραγόμενη ενέργεια. Είναι πιο εύκολη η επέκταση των φωτοβολταϊκών, σε περίπτωση ανάγκης περισσότερης ενέργειας.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θα τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά μας στην στέγη. Θα φροντίσουμε μια μεγάλη έκταση της στέγης να είναι στραμμένη προς τον νότο, για να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια κατά το μέγιστο δυνατό.

## 7.2 Καταγραφή καταναλώσεων οικίας

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό του συστήματός μας είναι η καταγραφή των ηλεκτρικών καταναλώσεων της οικίας και ο υπολογισμός της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Όπως προείπαμε το σύστημα που θα εγκατασταθεί πρόκειται να καλύπτει τις ανάγκες μιας τετραμελούς οικογένειας σε οίκημα 130 m<sup>2</sup>, συνεπώς είναι λογικό να υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις φορτίου. Για τον λόγο αυτό θεωρούμε πως είναι ήδη εγκατεστημένος ηλιακός θερμοσίφωνας για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, ενώ για την μαγειρική χρησιμοποιείται κουζίνα υγραερίου. Επίσης για την θέρμανση του σπιτιού κατά τους χειμερινούς μήνες χρησιμοποιούνται θερμάστρες υγραερίου. Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές είναι ενεργειακής κλάσης A++, δηλαδή χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Οι ανάγκες της οικογένειας διαφέρουν κατά τους χειμερινούς μήνες, αλλά και κατά τους θερινούς μήνες. Για παράδειγμα το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται κλιματιστικά για την ψύξη του σπιτιού που το χειμώνα δε χρειάζονται, ενώ το χειμώνα είναι περισσότερες οι ώρες χρήσης του φωτισμού μέσα στο σπίτι. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να κάνουμε δύο διαφορετικούς υπολογισμούς των ηλεκτρικών καταναλώσεων. Καθώς τα κλιματιστικά και οι ανεμιστήρες χρειάζονται μόνο κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο θα θεωρήσουμε αυτούς τους τρεις ως θερινούς μήνες, ενώ όλους τους υπόλοιπους ως χειμερινούς. Και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισμοί θα γίνουν για μία τυπική ημέρα.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι ηλεκτρικές καταναλώσεις της οικίας για τους χειμερινούς και για τους θερινούς μήνες.

Συσκευή	Αριθμός συσκευών	Ισχύς (W)	Ωρες λειτουργίας (h)	Ημερίσια Ηλεκτρική Κατανάλωση (Wh)
Ηλεκτρικό ψυγείο	1	100	8	800
Καφετιέρα	1	800	0,33	264
Τοστιέρα	1	750	0,16	120
Απορροφητήρας κουζίνας	1	300	1	300
Φούρνος μικροκυμάτων	1	700	0,05	35
Μίξερ	1	850	0,25	212,5
Πλυντήριο πιάτων	1	1000	1	1000
Πλυντήριο ρούχων	1	1600	1	1600
Ηλεκτρική σκούπα	1	1500	0,6	900
Ατμόσιδερο σιδερώματος	1	1800	0,5	900
Βραστήρας	1	1000	0,16	160
Σεσουαρ	1	1600	0,16	256
Τηλεόραση 40"	1	80	5	400
DVD player	1	50	2	100
Ηχοσύστημα	1	60	1	60
Φορητός υπολογιστής (laptop)	1	80	5	400
Εκτυπωτής	1	50	0,083	4,15

Φορτιστής κινητού τηλεφώνου	1	15	1	15
Λαμπτήρες εσωτερικού χώρου	20	18	6	2160
Λαμπτήρες εξωτερικού χώρου	6	15	1	90
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		12785		<b>9776,65</b>

Πίνακας 7.1 - Ηλεκτρικές καταναλώσεις οικίας κατά τους χειμερινούς μήνες

Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια από τις συσκευές τους χειμερινούς μήνες είναι 9776,65 Wh ή 9,8 kWh. Οφείλεται κατα κύριο λόγο στις ανάγκες φωτισμού τις οικίας, οι οποίες είναι μεγαλύτερες τους χειμερινούς μήνες ενώ όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν χρησιμοποιούνται τα κλιματιστικά και οι ανεμιστήρες δαπέδου.

Συσκευή	Αριθμός συσκευών	Ισχύς (W)	Ωρες λειτουργίας (h)	Ημερίσια Ηλεκτρική Κατανάλωση (Wh)
Ηλεκτρικό ψυγείο	1	100	8	800
Καφετιέρα	1	800	0,33	264
Τοστιέρα	1	750	0,16	120
Απορροφητήρας κουζίνας	1	300	1	300
Φούρνος μικροκυμάτων	1	700	0,05	35
Μίξερ	1	850	0,25	212,5
Πλυντήριο πιάτων	1	1000	1	1000
Πλυντήριο ρούχων	1	1600	1	1600
Ηλεκτρική Σκουπα	1	1500	0,6	900
Ατμοσίδηρο σιδερώματος	1	1800	0,5	900
Βραστήρας	1	1000	0,16	160
Σεσουαρ	1	1600	0,16	256
Τηλεόραση 40"	1	80	5	400
DVD player	1	50	2	100
Ηχοσύστημα	1	60	1	60
Φορητός υπολογιστής (laptop)	1	80	5	400
Εκτυπωτής	1	50	0,083	4,15
Φορτιστής κινητού τηλεφώνου	1	15	1	15
Ανεμιστήρας	2	50	3	300
Κλιματιστικά 9000btu/14000btu	1/1	800/1200	3,5	7000
Λαμπτήρες εσωτερικού χώρου	20	18	3,5	1260
Λαμπτήρες εξωτερικού χώρου	6	15	2	180
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		14885		<b>16266,65</b>

Πίνακας 7.2 - Ηλεκτρικές καταναλώσεις οικίας κατά τους θερινούς μήνες


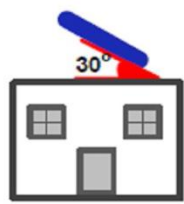
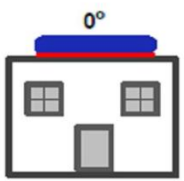
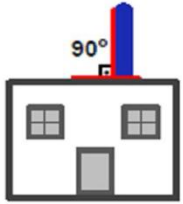
Η καταναλισκόμενη ενέργεια από τις συσκευές τους καλοκαιρινούς μήνες είναι 16266,65 Wh ή 16,3 kWh. Η διαφορά αυτή δεν είναι αμελητέα και οφείλεται στις ανάγκες ψύξης του κτιρίου από τα κλιματιστικά και τους ανεμιστήρες για αρκετές ώρες.

## 7.3 Διαστασιολόγηση συστήματος

### 7.3.1 Κλίση Φ/Β συλλεκτών

Η ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί μια επιφάνεια εξαρτάται από την κλίση και τον προσανατολισμό της. Για μια επιφάνεια σε έναν συγκεκριμένο τόπο, η αύξηση της κλίσης έχει σαν αποτέλεσμα να δέχεται περισσότερη ακτινοβολία τον χειμώνα, σε σχέση με το καλοκαίρι. Όμως αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης ενός τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σύμφωνα με το σχήμα 7.3 έχουμε τα εξής:

*Επιλέγουμε κλίση των Φ/Β πλαισίων 30° και νότιο προσανατολισμό για να επιτύχουμε την μέγιστη απόδοση, ενώ επιλέγουμε αζιμούθια γωνία 0° γιατί η χώρα μας βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο.*

 Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	 30°	 0°	 90°
Ανατολικός - Δυτικός	85%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	50%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιος	<b>kWh<sub>(max)</sub></b>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	30%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειος	60%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	20%kWh <sub>(max)</sub>

Σχήμα 7.3 - Ενδεικτική απόδοση Φ/Β πλαισίου ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση

Για να επιλέξουμε τους χαρακτηριστικούς μήνες του χρόνου που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε ώστε το σύστημά μας να είναι επαρκές, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>), για κλίση 30° και αζιμούθια γωνία 0°. Στον Πίνακα 7.3 φαίνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτές τις συνθήκες (Wh/m<sup>2</sup>/day) και η μέση θερμοκρασία της περιοχής καθ' όλο το εικοσιτετράωρο (°C).

Μήνας	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Μέση θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	2,82	9,1
Φεβρουάριος	3,21	9,7
Μάρτιος	4,32	11,3
Απρίλιος	5,41	14,5
Μάιος	5,93	19,6
Ιούνιος	6,51	24,1
Ιούλιος	6,44	26,3
Αύγουστος	6,23	26,3
Σεπτέμβριος	5,70	22,6
Οκτώβριος	4,15	18,5
Νοέμβριος	2,85	14,1
Δεκέμβριος	2,41	10,6

Πίνακας 7.3 - Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και μέση θερμοκρασία στην περιοχή της Κορίνθου κατά την διάρκεια του έτους, για κλίση συλλεκτών 30° (Πηγή PVGIS)

Με την βοήθεια του πίνακα 7.3 βλέπουμε πως ο μήνας με την μικρότερη ακτινοβολία είναι ο Δεκέμβριος (2,41 kWh/m<sup>2</sup>/day), ενώ ο μήνας με την υψηλότερη είναι ο Ιούνιος (6,51 kWh/m<sup>2</sup>/day). Για να είναι το σύστημά μας ασφαλές αρκεί να μελετήσουμε για την εγκατάσταση τους δύο αυτούς μήνες και ιδιαίτερα τον Δεκέμβριο, μιας και η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρή.

### 7.3.2 Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Όπως είπαμε και παραπάνω επιλέξαμε κλίση 30° και νότιο προσανατολισμό για τα πλαίσια της Φ/Β συστοιχίας. Επίσης με την χρήση του προγράμματος PVGIS βρήκαμε πως η μέση ημερήσια ενέργεια ακτινοβολία και μέση θερμοκρασία τον Δεκεμβριο είναι:

$$E_{HA} = 2,41 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \quad \text{και} \quad t_a = 10,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Η ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας μέρας αυτονομίας, δίνεται από την σχέση 7.1:

$$P_{p\Sigma} = \frac{E_K \cdot P_{STC}}{E_{HA} \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_{AS} \cdot \sigma_\mu} \cdot \frac{N}{N-n} \quad (7.1)$$

Όπου

- $E_K = 9,8$  kWh, ημερίσια ηλεκτρική κατανάλωση της οικίας κατά τους χειμερινούς μήνες
- $P_{STC} = 1$  kW/m<sup>2</sup>, ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC)
- $E_{HA} = 2,41$  kWh/m<sup>2</sup>/day, η μέση ημερίσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία για τον μήνα Δεκέμβριο
- $\sigma_\mu = 0,9$ , συντελεστής απωλειών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσορευτή, ελεγκτή φόρτισης και μετατροπέα τάσεως DC-AC (Inverter).
- $\sigma_{AS} = 0,77 \cdot \sigma_\theta$ , συντελεστής απωλειών Φ/Β συστοιχίας για ελαφρώς σκονισμένα πλαίσια (όπου  $\sigma_\theta =$  συντελεστής θερμοκρασίας)  
 $\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004 \leftrightarrow \sigma_\theta = 1 - [(10,6 + 30) - 25] \cdot 0,004 \approx 0,94$   
 Άρα,  $\sigma_{AS} = 0,73$
- $N=31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς)
- $n=1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας)

Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση 7.1 γράφεται ως εξής:

$$P_{p\Sigma} = \frac{9,8 \cdot 1}{2,41 \cdot 0,9 \cdot 0,73} \cdot \frac{31}{31 - 1} \Leftrightarrow P_{p\Sigma} = \mathbf{6,4 \text{ kW}_p}$$

Οπότε η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να είναι κοντά στην παραπάνω τιμή για να έχουμε σωστή κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικίας τους χειμερινούς μήνες. Για τους θερινούς μήνες (Ιούνιος) ισχύουν τα εξής:

- $E_K = 16,3$  kWh
- $E_{HA} = 6,51$  kWh/m<sup>2</sup>/day (Πίνακας 7.3)
- $\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004 \leftrightarrow \sigma_\theta = 1 - [(24,1 + 30) - 25] \cdot 0,004 \approx 0,88$   
 Άρα  $\sigma_{AS} = 0,68$

Η ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας μέρας αυτονομίας τους θερινούς μήνες είναι:

$$P_{p\Sigma} = \frac{16,3 \cdot 1}{6,51 \cdot 0,9 \cdot 0,68} \cdot \frac{30}{29} \Leftrightarrow P_{p\Sigma} = \mathbf{4,2 \text{ kW}_p}$$

Άρα, αρκεί η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τον μήνα Δεκέμβριο για να καλύψουμε όλο το έτος.

### 7.3.3 Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η επιλογή του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι γενικά ένα πολυσύνθετο πρόβλημα. Η πληθώρα κατασκευαστικών εταιριών και πλαισίων επιτείνουν ακόμα περισσότερο τη δυσκολία της επιλογής. Οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες έγινε η επιλογή των πλαισίων ήταν η αξιοπιστία και η τεχνογνωσία της κατασκευάστριας εταιρίας, η μέγιστη ισχύς που παράγουν, η απόδοσή τους και το κόστος. Η αρχική απόφαση που έπρεπε να ληφθεί είχε να κάνει με τη επιλογή του είδους του φωτοβολταϊκού πλαισίου όσον αφορά την τεχνολογία κατασκευής του. Πολύ γρήγορα η επιλογή κατέληξε ανάμεσα σε πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, καθώς όλες οι άλλες κατηγορίες που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 έχουν χρησιμοποιηθεί σε περιορισμένες εφαρμογές, δεν εμφανίζουν υψηλή απόδοση, ή όταν εμφανίζουν υψηλή απόδοση, κρίνονται οικονομικά ασύμφορες.

Μετά από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς διαπιστώνεται ότι το κόστος των μονοκρυσταλλικών γεννητριών είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των πολυκρυσταλλικών και είναι της τάξεως του 10-15% ακριβότερες. Από την άλλη παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση κατά 1,5-3% από τα πολυκρυσταλλικά. Όμως εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι η καλύτερη απόδοση που εμφανίζουν δεν αντισταθμίζει το κόστος αγοράς τους. Επομένως αποφασίζεται η επιλογή ενός πολυκρυσταλλικού πλαισίου.

Στη συνέχεια, για να υπολογίσουμε τον ακριβή τύπο, αριθμό και συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να ορίσουμε τη μέγιστη τάση  $V_{m\Sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ισχύει ότι:

$$V_{m\Sigma} \geq 1,2 \cdot V_B \quad (7.2)$$

Όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσορευτή, ίση με  $V_B = 48 \text{ V}$

Συνεπώς η μέγιστη τάση της Φ/Β συστοιχίας πρέπει να είναι:

$$V_{m\Sigma} \geq 57,6 \text{ V}$$

Επιλέγουμε πολυκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια του τύπου KC180GH-2PU της εταιρίας Kyocera, με ισχύ αιχμής πλαισίου  $P_{p\Pi} = 180W_p$ , τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στο πίνακα 7.4.



Σχήμα 7.4 - Φ/Β πλαίσιο της εταιρίας Kyocera, ονομαστικής ισχύος 180W<sub>p</sub>

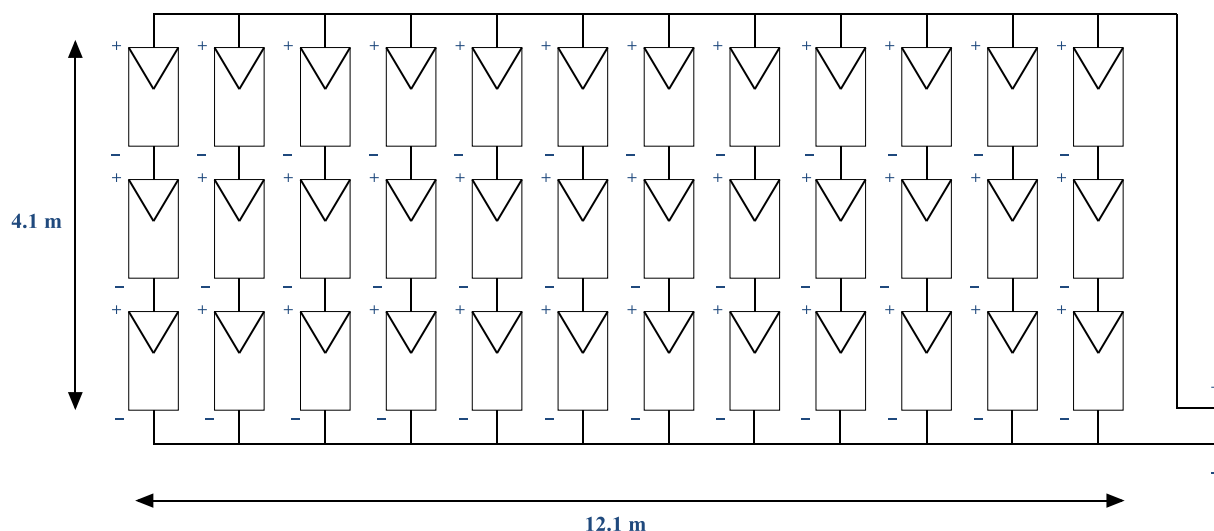
<b>KYOCERA KD180GH-2PU</b>	
Ονομαστική μέγιστη ισχύς P <sub>max</sub>	180 W
Ονομαστική τάση φόρτισης V <sub>mpp</sub>	23,6 V
Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης I <sub>mpp</sub>	7,63 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος V <sub>oc</sub>	29,5 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I <sub>sc</sub>	8,35 A
Τάση μέγιστης ισχύος συστήματος	1000 V
Πλήθος Φ/Β στοιχείων/πλαίσιο	48
Τεχνολογία Φ/Β στοιχείων	Si-Poly
Διαστάσεις (μήκος/πλάτος/ύψος) σε m	1,34/0,99/0,046

Πίνακας 7.4 - Τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων Φ/Β πλαισίων της εταιρίας Kyocera

Ο αριθμός των πλαισίων που απαιτούνται για την τροφοδότηση του συστήματος είναι:

$$N = \frac{P_{p\Sigma}}{P_{p\Pi}} \Leftrightarrow N = \frac{6400}{180} = 35,5 \approx 36 \text{ πλαίσια} \quad (7.3)$$

Για να καλύπτουμε τον περιορισμό της τάσης που υπολογίσαμε με την εξίσωση 7.2, επιλέξαμε τη σύνδεση 12 παράλληλων κλάδων και 3 πλαίσια ανα κλάδο.(σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5 - Συνδεσμολογία Φ/Β συστοιχίας αποτελούμενη από N = 36 πλαίσια

Να επισημάνουμε, ότι η έκταση της συνολικής συστοιχίας είναι 11,88 m x 4,02 m. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει οριζόντιο περιθώριο απόστασης 2 cm ανάμεσα στα πλαίσια, και κάθετο 4 cm, που θα χρησιμέψει για καλύτερο αερισμό των πλαισίων. Επίσης, η συστοιχία θα βρίσκεται σε απόσταση 0,5 m από την σκεπή, αφενός μεν για καλύτερη επαγωγή θερμότητας, και αφετέρου δε, για να υπάρχει πρόσβαση σε κάθε πλαίσιο σε περίπτωση επισκευής.

Με τη χρήση του προγράμματος PVGIS, προκύπτει ο πίνακας 7.5, στον οποίον φαίνεται η μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Μήνας	Μέση ημερήσια παραγόμενη ενέργεια (kWh)	Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια (kWh)
Ιανουάριος	14,4	448
Φεβρουάριος	16,1	451
Μάρτιος	21,2	658
Απρίλιος	26,0	779
Μάιος	27,8	861
Ιούνιος	29,8	893
Ιούλιος	29,1	903
Αύγουστος	28,3	876
Σεπτέμβριος	26,5	795
Οκτώβριος	19,9	618
Νοέμβριος	14,2	426
Δεκέμβριος	12,3	380
<b>ΕΤΗΣΙΟ</b>	<b>22,2</b>	<b>674</b>

Πίνακας 7.5 - Μέση ημερήσια και μηνιαία ηλεκτροπαραγωγή από το σύστημα 6,4 kWp, στην περιοχή της Κορίνθου (Πηγή PVGIS)

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε πως η Φ/Β συστοιχία αρκεί για την πλήρη κάλυψη των αναγκών της οικίας, κατά την διάρκεια του έτους, άρα το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος θα καλύπτει τις αιχμές ισχύος ζήτησης μέσα στην ημέρα, αλλά και τις μέρες αυτονομίας.

### 7.3.4 Επιλογή συσσωρευτών

Μία μπαταρία για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να πληρεί όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- συνδυασμό χαμηλής τιμής και απόδοσης
- μεγάλη διάρκεια ζωής
- ικανότητα φόρτισης με χαμηλά ρεύματα
- υψηλή ενέργεια και πυκνότητα ισχύος
- ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
- ανθεκτικότητα (για μεταφορά εν κινήσει)
- ανακυκλώσιμες (για αποφυγή ρύπανσης του περιβάλλοντος)

Ο συσσωρευτής που θα επιλέξουμε είναι ο PVX-2580L της εταιρείας Concorde με ονομαστική τάση 12V και χωρητικότητα 236 Ah. Οι προδιαγραφές του οποίου φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 7.6 -Συσσωρευτής Concorde PVX-2580L

<b>CONCORDE PVX-2580L</b>	
Μήκος	527 mm
Πλάτος	277 mm
Ύψος	247 mm
Βάρος	75 kg
Ονομαστική τάση	12 V
Χωρητικότητα (C <sub>10</sub> )	236 Ah

Πίνακας 7.6 - Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή PVX-2580L

Έχοντας ως δεδομένο ότι επιλέξαμε τάση της Φ/Β συστοιχίας και των συσσορευτών 48V θα πρέπει να συνδεθούν 4 συσσορευτές εν σειρά, για κάθε κλάδο συσσορευτών, αφού η ονομαστική τάση των συσσορευτών Concorde είναι 12V. Συνεπώς θεωρούμε πως ο βαθμός απόδοσης είναι ίσος με  $\alpha = 0,9$ , και το βάθος εκφόρτισης των συσσορευτών είναι  $\beta=40\%$  ώστε να επιτύχουμε αύξηση του χρόνου ζωής των συσσορευτών. Το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να δύναται να παράγει ενέργεια ίση με  $E_K=16,3$  kWh, σε περίπτωση παρατεταμένης συννεφιάς, γεγονός που καλύπτει τόσο τους θερινούς, τόσο και τους χειμερινούς μήνες. Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσορευτών πρέπει να είναι:

$$C_N = \frac{n \cdot E_K}{\alpha \cdot \beta_{εκ} \cdot V_B} \quad (7.4)$$

Όπου

- $E_K = 16,3$  kWh, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση της οικίας κατά τους θερινούς μήνες
- $\beta_{εκ}=0,4$ , βάθος εκφόρτισης συσσορευτή
- $\alpha=0,9$ , βαθμός απόδοσης συσσορευτή
- $n=1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας, σε περίπτωση μη ηλιοφάνειας)

Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση 7.4 γράφεται ως εξής:

$$C_N = \frac{1 \cdot 16,3}{0,9 \cdot 0,4 \cdot 48} = \mathbf{943Ah}$$

Το πλήθος των συσσορευτών θα είναι:

$$N_K = \frac{943}{236} \approx \mathbf{4 \text{ κλάδοι}}$$

Η οργάνωση των συσσορευτών θα είναι 4 κλάδοι με 4 συσσορευτές εν σειρά σε κάθε κλάδο.

### 7.3.5 Επιλογή ελεγκτή φόρτισης

Τη φόρτιση των ηλεκτρικών συσσορευτών αναλαμβάνει ο ελεγκτής φόρτισης. Μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία φροντίζει για την σωστή φόρτιση των συσσορευτών του συστήματος. Ελέγχει την διαδικασία φόρτισης και την διακόπτει όταν διαπιστωθεί πληρότητα. Εάν η φόρτιση συνεχιστεί υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής των συσσορευτών. Επειδή οι συσσορευτές έχουν την τάση να

εκφορτίζονται σταδιακά, ακόμα και όταν δεν τροφοδοτούν μια συσκευή, ο ρυθμιστής φόρτισης να φροντίζει την αυτόματη επανεκκίνηση της διαδικασίας φόρτισης, όταν διαπιστωθεί πως η τάση της έπεσε κάτω από τα επίπεδα πλήρους φόρτισης.

Στην συγκεκριμένη μελέτη η συστοιχία έχει χωριστεί σε 12 παράλληλους κλάδους με 3 πάνελ ο καθένας. Από τις προδιαγραφές του πάνελ έχουμε:

Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης:  $I_{mp} = 7,63 \text{ A}$

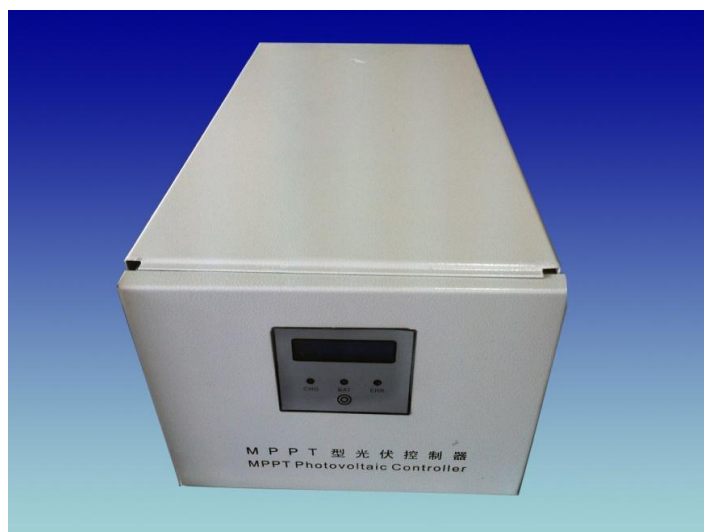
Ρεύμα βραχυκυκλώματος:  $I_{sc} = 8,35 \text{ A}$

Τάση ανοιχτού κυκλώματος:  $V_{oc} = 29,5 \text{ V}$

Για να καθοριστεί το είδος του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να ληφθούν υπό όψη τα παρακάτω:

- **Ονομαστική τάση συσσορευτών:** Η ονομαστική τάση του ελεγκτή πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση των συσσορευτών, δηλαδή 48 V.
- **Μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος:** Η τάση ανοιχτού κυκλώματος της συστοιχίας είναι  $V_{oc\Sigma} = 3 \cdot 29,5 = 88,5 \text{ V}$
- **Ρεύμα φόρτισης:** Το ρεύμα φόρτισης των συσσορευτών από τα Φ/Β είναι  $I_{\max\Sigma} = 12 \cdot 7,63 = 91,6 \text{ A}$
- **Ρεύμα βραχυκυκλώματος:** Το ρεύμα βραχυκυκλώματος της Φ/Β συστοιχίας είναι  $I_{sc\Sigma} = 12 \cdot 8,35 = 100,2 \text{ A}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέγουμε ελεγκτή φόρτισης SYMC-48-100 της εταιρίας Suncourse, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στο πίνακα 7.7.



Σχήμα 7.7 -Ελεγκτής φόρτισης Suncourse SYMC-48-100

<b>SUNSOURCE SYMC-48-100</b>	
Τάση συσσορευτών	48 V
Μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος	190 V
Ρεύμα φόρτισης	100 A
Μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος	130 A
Βαθμός απόδοσης	97%
Βάρος	4,5 kg

Πίνακας 7.7 - Τεχνικά χαρακτηριστικά ελεγκτή φόρτισης SYMC-48-100

### 7.3.6 Επιλογή μετατροπέα DC-AC (Inverter)

Ο μετατροπέας DC-AC όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 6 μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Έτσι, από τους συσσορευτές του συστήματος μπορούμε να τροφοδοτήσουμε όλες τις οικιακές συσκευές που απαιτούν εναλλασσόμενη AC τροφοδοσία. Δεν έχει σημασία πόσες συσκευές θα συνδεθούν ταυτόχρονα αρκεί η να μην ξεπερνάται η ισχύς του μετατροπέα. Για να καθοριστεί το είδος του μετατροπέα ακολουθούμε τα παρακάτω:

- **Ονομαστική τάση:** Η ονομαστική τάση του μετατροπέα πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση των συσσορευτών, δηλαδή 48 V.
- **Ισχύς αιχμής:** Η ισχύς αιχμής πρέπει να ισούται με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ κατανάλωσης (14885 W), έστω και για μικρό χρονικό διάστημα
- **Ισχύς εξόδου:** Η ισχύς εξόδου πρέπει να είναι ίση με την ισχύ των φορτίων κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρώντας ότι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού των φορτίων της οικίας είναι 0,47, η ισχύς εξόδου του inverter είναι  $14885 \text{ W} \times 0,47 = 6996 \text{ W}$ .
- **Τάση εξόδου:** Η τάση εξόδου του μετατροπέα πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230 V.

Επιλέγουμε 2 μετατροπείς Sunny Island 5048 της εταιρίας SMA και τους οποίους θα συνδέσουμε παράλληλα. Σε παράλληλη λειτουργία οι inverters συγχρονίζονται και λειτουργούν σε μια μόνο φάση, ώστε να αυξάνεται η διαθέσιμη ονομαστική ισχύς σε 10 kW.



Σχήμα 7.8 - Μετατροπέας DC-AC SMA Sunny Island 5048

<b>SMA SUNNY ISLAND 5048</b>	
Ονομαστική τάση δικτύου / Εύρος τάσης AC	230V/202 - 253V
Ονομαστική συχνότητα δικτύου / Εύρος	50Hz, 60Hz/45-65Hz
Ισχύς εξόδου AC	5000W
Ισχύς εξόδου AC για 5 min/3 sec	8400W/12000W
Τάση συσσορευτών/Εύρος	48 V/41-63V
Ονομαστική τάση γεννήτριας / Εύρος τάσης AC	230V/175,2 - 264,5V
Μέγιστη ισχύς εισόδου (γεννήτρια)	12,8kW
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσορευτών	120 A
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	95%
Διαστάσεις (Π/Υ/Β)	467 / 612 / 242 mm
Βάρος	63 kg

Πίνακας 7.8 - Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέα DC-AC SMA Sunny Island 5048

### 7.3.7 Επιλογή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους

Στην περίπτωση αυτόνομου υβριδικού Φ/Β συστήματος, το σύστημα σχεδιάζεται με δυνατότητα ολίγων μερών αυτονομίας, προκειμένου ο συσσορευτής να μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της οικίας κατά την περίοδο μη ηλιοφανών ημερών. Πέραν όμως του χρόνου αυτονομίας η κάλυψη των απαιτήσεων γίνεται από το Η/Ζ που πρέπει:

- Να εξασφαλίζει τη λειτουργία της εγκατάστασης όταν το Φ/Β σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε επιπλέον ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας
- Να επαναφέρει τον εκφορτισμένο ηλεκτρικό συσσορευτή στην κατάσταση πλήρους φόρτισης

Ο χρόνος φόρτισης ( $t_{\varphi}$ ) του συσσορευτή από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος δίνεται από την σχέση 7.5:

$$t_{\varphi} = \frac{C_N \cdot \beta_{εκ}}{I_{\varphi} \cdot \eta_q} \quad (7.5)$$

Όπου

- $C_N = 943\text{Ah}$ , η ονομαστική χωρητικότητα του συσσορευτή
- $\beta_{εκ} = 0,4$ , βάθος εκφόρτισης συσσορευτή
- $I_{\varphi} \leq C_N/10 = 94,3\text{A}$ , ρεύμα φόρτισης
- $\eta_q = 0,9$ , βαθμός απόδοσης φορτίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση 7.5 γράφεται:

$$t_{\varphi} = \frac{943 \cdot 0,4}{94,3 \cdot 0,9} \approx 4,44 \text{ h}$$

Αφού ο χρόνος φόρτισης των συσσορευτών είναι 4,44 h, τότε το Η/Ζ θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί για τουλάχιστον 5 h. Η ηλεκτρική ισχύς του Η/Ζ ( $P_{\varphi}$ ) για την φόρτιση του συσσορευτή είναι:

$$P_{\varphi} = I_{\varphi} \cdot V_{\text{H/Z}} \quad (7.6)$$

Όπου  $V_{\text{H/Z}} = 1,25 \cdot V_B$ , η τάση εξόδου του Η/Ζ προς τον συσσορευτή, με  $V_B = 48 \text{ V}$  η τάση του συσσορευτή

Επιλύοντας την σχέση 7.6 βρίσκουμε:

$$P_{\varphi} = 94,3 \cdot 1,25 \cdot 48 = 5658 \text{ W}$$

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς του Η/Ζ ( $P_{H/Z}$ ) δίνεται από την σχέση 7.7:

$$P_{H/Z} \geq P_{\phi} + P_K \quad (7.7)$$

όπου  $P_K = 6996 \text{ W}$ , ηλεκτρική ισχύς κατανάλωσης όταν τα φορτία λειτουργούν ταυτόχρονα

$$\text{Οπότε } P_{H/Z} \geq \mathbf{12654 \text{ W}}$$

Συνεπώς χρειαζόμαστε μια γεννήτρια τουλάχιστον 13kW.

Επιλέγουμε το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος SDSG-Y15S της εταιρίας SDS (σχήμα 7.9), τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.9)



Σχήμα 7.8 - Γεννήτρια πετρελαίου SDS SDSG-Y15S

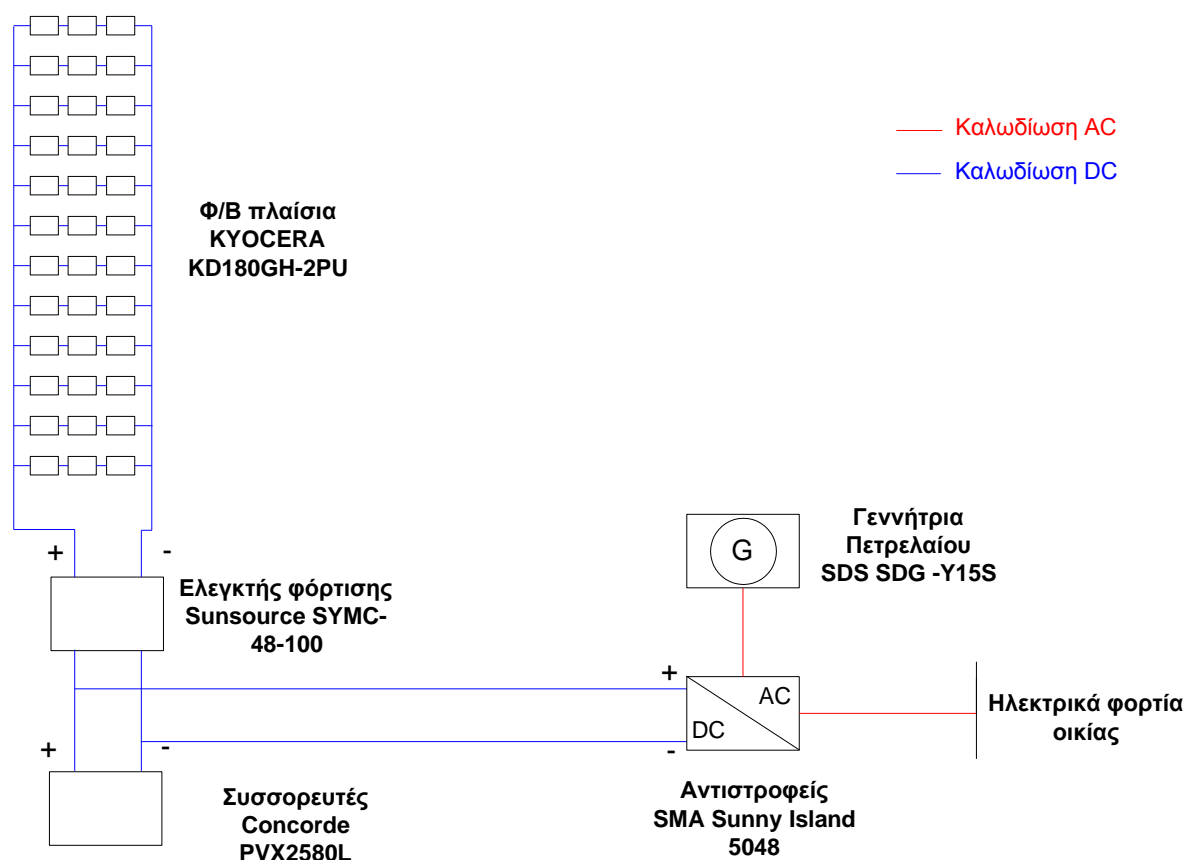
<b>SDS SDSG-Y15S</b>	
Μέγιστη απόδοση	18,7 kVA
Ισχύς	15 kW
Συντελεστής ισχύος	0,8
Συχνότητα	50 Hz
Καύσιμο	Πετρέλαιο
Στροφές ανά λεπτό	1500 rpm
Χρόνος αδιάλειπτης λειτουργίας	8 ώρες

Σχήμα 7.9 - Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας SDS SDSG-Y15S

### 7.3.8 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης

Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα 7.9 το οποίο περιλαμβάνει:

- Φ/Β συστοιχία, 12 παράλληλων κλάδων με 3 πλαίσια εν σειρά (36 πλαίσια συνολικά)
- 1 ελεγκτής φόρτισης, για έλεγχο φόρτισης και προστασία των συσσωρευτών
- 4 παράλληλοι κλάδοι συσσωρευτών με 4 στοιχεία εν σειρά, για αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας
- 2 μετατροπείς ισχύος σε παράλληλη σύνδεση μεταξύ τους, για την μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται σε εναλλασσόμενη για την ασφαλή τροφοδότηση των φορτίων της οικίας, καθώς και για την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάση σε συνεχή για την φόρτιση των αποφορτισμένων συσσωρευτών όταν λειτουργεί το Η/Ζ
- 1 ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Η/Ζ), για την τροφοδότηση των φορτίων της οικίας και την φόρτιση των συσσωρευτών, σε περιόδους παρατεταμένης συννεφιάς



Σχήμα 7.10 - Σχηματικό διάγραμμα φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

## 7.4 Καλωδιώσεις

Στην πλευρά της Φ/Β συστοιχίας ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της εγκατάστασης καλωδίωσης θα πρέπει να εξασφαλίζει προστασία ισοδύναμη με μόνωση Class II.

Τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις των πλαισίων θα πρέπει να έχουν μόνωση ανθεκτική τουλάχιστον έως 70°C ή και περισσότερο αν δεν υπάρχει ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα.

Για τις συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων χρησιμοποιούνται συνήθως εύκαμπτα μονοπολικά καλώδια με ενισχυμένη μόνωση, με τις ανωτέρω τουλάχιστον απαιτήσεις. Ο συνδυασμός αυτός των απαιτήσεων είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί από κοινά τυποποιημένα καλώδια και απαιτεί τη χρήση ειδικών μειγμάτων πλαστικών για μόνωση.

Τα καλώδια μπορούν να είναι εναέρια, αλλά πρέπει να παρέχεται στήριξη, ώστε να μην καταπονούνται οι συνδέσεις. Η στήριξη γίνεται με υλικά ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, την υγρασία, την υψηλή θερμοκρασία και τη διάβρωση. Τα Φ/Β πλαίσια θα πρέπει να διαθέτουν διόδους παράκαμψης (bypass diodes), για ελάττωση των συνεπειών σκίασης. Για τις συνδέσεις των καλωδίων μεταξύ τους συνιστάται να χρησιμοποιούνται οι κατάλληλοι ειδικοί σύνδεσμοι ταχείας σύνδεσης. Τα προεγκατεστημένα καλώδια των Φ/Β πλαισίων δε θα πρέπει να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται από καλώδια άλλης διατομής ή τύπου.

### • Πλευρά συνεχούς ρεύματος (DC)

Η καλωδίωση στην πλευρά συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνει τις συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων από τα άκρα κάθε εν σειρά κλάδου μέχρι τα άκρα της συστοιχίας και τις συνδέσεις από τα άκρα της Φ/Β συστοιχίας μέχρι την είσοδο των αντιστροφών. Τα καλώδια για την εν σειρά και παράλληλη σύνδεση των πλαισίων τα προμηθευόμαστε μαζί με την αγορά τους.

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών αποτελείται από 36 πλαίσια, τα οποία έχουν συνδεθεί σε 12 παράλληλους κλάδους με 3 πλαίσια σε σειρά σε κάθε κλάδο. Το μέγιστο ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας είναι:

$$I = 1,25 \cdot I_{sc} \cdot N_{\pi} \quad (7.8)$$

Όπου

- $I_{sc} = 8,35$  A, ρεύμα βραχυκυκλώματος Φ/Β πλαισίου
- $N_{\pi} = 12$ , αριθμός παραλλήλων κλάδων

Απο την σχέση 7.8 έχουμε:  **$I = 125,2$  A**

Ο τύπος του καλωδίου που συνδέουμε τη φωτοβολταϊκή συστοιχία με τον ελεγκτή φόρτισης και με τους συσσορευτές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 623,4 HD 22,4 , είναι ο H07RN-F. Επιλέξαμε το συγκεκριμένο καλώδιο για την ανθεκτικότητά του σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (ΠΕΡΙΠΟΥ)	ΒΑΡΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ (ΠΕΡΙΠΟΥ)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ DC ΣΕ 20 °C	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ	
					1 ΦΑΣΗ AC ή DC	3 ΦΑΣΕΙΣ AC
mm <sup>2</sup>	mm	kg/km	Ω/km	A	mV/A/m	mV/A/m
1x1,5	6,1	50	13,7	22	31,0	
1x2,5	6,7	65	8,21	31	19,0	
1x4,0	7,7	90	5,09	41	12,0	
1x6,0	8,9	120	3,39	53	7,8	
1x10	10,4	185	1,95	73	4,6	
1x16	12,3	260	1,24	98	2,9	
1x25	14,4	375	0,795	129	1,85	
1x35	16,0	495	0,565	158	1,37	
1x50	18,6	685	0,393	198	1,02	
1x70	20,9	910	0,277	245	0,71	
1x95	23,0	1170	0,210	292	0,53	
1x120	26,5	1485	0,164	344	0,44	
1x150	28,8	1820	0,132	391	0,37	
1x185	30,2	2180	0,108	448	0,33	
1x240	32,9	2735	0,0817	528	0,26	
1x300	35,7	3400	0,0654	608	0,24	
1x400	44,8	4575	0,0495	715	0,19	
1x500	48,8	5715	0,0391	820	0,15	
2x1,0	8,4	90	20,0	15	48,0	
2x1,5	9,4	115	13,7	18	31,0	
2x2,5	11,1	160	8,21	26	19,0	
2x4,0	12,8	220	5,09	34	12,0	
2x6,0	15,2	305	3,39	44	7,8	
2x10	19,6	550	1,95	61	4,6	
2x16	23,4	790	1,24	82	2,9	
2x25	27,8	1080	0,795	108	1,85	
3x1,0	9,1	110	20,0	15	48,0	
3x1,5	10,1	140	13,7	18	31,0	
3x2,5	12,0	205	8,21	26	19,0	
3x4,0	13,7	280	5,09	34	12,0	
3x6,0	16,3	395	3,39	44	7,8	
3x10	21,1	680	1,95	61	4,6	
3x16	25,1	980	1,24	82	2,9	
3x25	29,9	1415	0,795	108	1,85	
3x35	33,2	1840	0,565	135	1,37	
3x50	38,7	2545	0,393	168	1,02	
3x70	43,5	3350	0,277	207	0,71	
3x95	49,0	4335	0,210	250	0,53	
3x120	55,4	5485	0,164	292	0,44	

Σχήμα 7.11 - Χαρακτηριστικά καλωδίου H07RN-F

Επιλέγουμε καλώδια διατομής **1 x 70mm<sup>2</sup>** , μέγιστης φόρτισης  $I_{max}=245$  A. Πολλαπλασιάζοντας την μέγιστη φόρτιση με τον συντελεστή θερμοκρασίας στους 70°C, έχουμε:  $245 \cdot 0,57 = 139,6$  A. Οπότε το καλώδιο που επιλέξαμε ενδείκνυται για την χρήση μας.

- **Πλευρά εναλλασσομένου ρεύματος (AC)**

Για την επιλογή των κατάλληλων καλωδίων στην πλευρά εναλλασσομένου ρεύματος εφαρμόζεται το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384. Το ρεύμα του Η/Ζ που τροφοδοτεί τον κάθε αντιστροφέα είναι περίπου 32,6Α, με προσαύξηση 25% είναι  $32,6 \cdot 1,25 = 40,7\text{A}$ . Το μέγιστο ρεύμα εξόδου των αντιστροφέων χωρίς προσαύξηση γιατί λαμβάνουμε την μέγιστη ισχύ των αντιστροφέων, είναι  $\frac{10000}{230} = 43,5\text{A}$ .

Επομένως επιλέγουμε καλώδια τύπου H07V-K διατομής 3x16mm<sup>2</sup> για την τροφοδότηση των φορτίων της οικίας από τους αντιστροφέες, καθώς και για την σύνδεση των αντιστροφέων με το Η/Ζ. Για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης τα καλώδια ασφαλιζονται με μικροαυτόματους μέγιστης έντασης 50 Α.

## 7.5 Γείωση

Το δυναμικό της γής είναι συμβατά μηδενικό. Έτσι, κάθε αγωγός που συνδέει κάποιο σημείο ενός κυκλώματος ή ένα μεταλλικό αντικείμενο με το έδαφος ονομάζεται **γειωμένος** και το σημείο ή το αντικείμενο αποκτούν το ίδιο δυναμικό με τη γή. Η αγωγή σύνδεση του σημείου ή του αντικειμένου με το έδαφος ονομάζεται γείωση και ο αγωγός που τοποθετείται μέσα στο έδαφος και το επάνω μέρος του συνδέεται με τον γειωμένο αγωγό, λέγεται **γειωτής**. Τα Φ/Β συστήματα πρέπει να γειώνονται για τους παρακάτω λόγους:

- Αποφυγή ζημιών που μπορεί να υποστεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λόγω κρουστικών υπερτάσεων, δηλαδή, λόγω απότομων αυξήσεων της απόλυτης τιμής του δυναμικού από μερικά Volts μέχρι χιλιάδες Volts, των οποίων η διάρκεια δεν ξεπερνάει τα  $10^{-3}$  sec. Οι κρουστικές υπερτάσεις δημιουργούνται από κεραυνούς, αστραπές, βραχυκυκλώματα κ.τ.λ
- Ασφάλεια του προσωπικού συντήρισης από ηλεκτροπληξία λόγω διαρροής ρευμάτων

Στις συνήθεις κτιριακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις διακρίνει κανείς τρεις κατηγορίες γειώσεων:

1) **Γείωση λειτουργίας**. Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους (π.χ. γείωση του κόμβου του μετασχηματιστή). Αυτή διακρίνεται σε:

- Άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.

- Έμμεση, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

2) **Γείωση προστασίας.** Ονομάζεται η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης, που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας, και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.

3) **Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας.** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων στο περιβάλλον που έχει κατασκευαστεί. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι παρακάτω:

- Η *ουδετέρωση*, δηλαδή η αγώγιμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου.
- Η *άμεση γείωση*, με απευθείας αγώγιμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης το οποίο μπορεί να είναι μια πλάκα γείωσης, ένα ηλεκτρόδιο, ένα τρίγωνο κλπ.
- Η *γείωση μέσω διακόπτη διαφυγής*, για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης. Υπάρχουν δυο ειδών διακόπτες διαφυγής, τάσης (ΔΔΤ) και έντασης (ΔΔΕ). Ο διακόπτης διαφυγής τάσης παρακολουθεί την τάση ως προς γη των μεταλλικών περιβλημάτων όπου είναι συνδεδεμένος και αν αυτή υπερβεί τα 50 V τότε αποσυνδέει το κύκλωμα. Το γειωμένο άκρο του ΔΔΤ συνδέεται με ιδιαίτερο ηλεκτρόδιο γείωσης. Ο διακόπτης διαφυγής έντασης παρακολουθεί το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη. Αν αυτό υπερβεί μία τιμή, συνήθως 30 mA, τότε αποζεύει το κύκλωμα. Σε αντιδιαστολή με τους ΔΔΤ, έχουμε εδώ και μία προστασία κατά της πυρκαγιάς, γιατί περιορίζεται άμεσα το ρεύμα διαρροής προς γη.

Για την γείωση της εγκατάστασης προβλέπεται γείωση προστασίας των μεταλλικών μερών και γείωση των μετατροπέων ισχύος. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια γειώνονται στο σασί τους ενώ οι αντιστροφείς έχουν ειδική υποδοχή για καλώδιο γείωσης. Δημιουργείται ένας κοινός κόμβος γείωσης για όλη την εγκατάσταση. Με δύο αγωγούς χάλκινους μονωμένους πολύκλονους διατομής 100 mm<sup>2</sup> συνδέονται οι αντιστροφείς στον κόμβο γείωσης. Με αγωγό χάλκινο μονωμένο πολύκλωνο διατομής 100mm<sup>2</sup> γειώνουμε τα μεταλλικά μέρη (Φ/Β, βάσεις) στον ίδιο κόμβο γείωσης και ο κόμβος γείωσης καταλήγει σε ένα τρίγωνο ηλεκτροδίων στο έδαφος. Ο αγωγός αυτός θα συνδέεται με το τρίγωνο γείωσης, συνολικής αντίστασης περίπου 6,5 Ω, το οποίο αποτελείται από 3 ράβδους γαλβανισμένους (χαλκού) μήκους 3,5 m ο καθένας.

## 7.6 Οικονομική αξιολόγηση συστήματος

Το συνολικό κόστος της συγκεκριμένης Φ/Β εγκατάστασης περιλαμβάνει τα κόστη εξοπλισμού, τα κόστη εγκατάστασης, τα κόστη έκδοσης αδειών, το κόστος παρακολούθησης, το κόστος λειτουργίας και το κόστος συντήρησης. Αναλυτικότερα, το κόστος εξοπλισμού αφορά τη δαπάνη για αγορά του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των φόρων και των τελών μεταφοράς. Το συνολικό κόστος εξοπλισμού μπορεί να διαχωριστεί στα εξής κόστη για:

- Φωτοβολταϊκά πλαίσια
- Αντιστροφείς (inverters)
- Συσσορευτές
- Ελεγκτή φόρτισης
- Ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (καλωδιώσεις, ηλεκτρικούς πίνακες, ασφάλειες, βάσεις στήριξης)
- Κόστος εγκατάστασης

Για τα συγκεκριμένα πλαίσια των 180 Watt της KYOCERA η τιμή αγοράς είναι 2,5 €/W, η οποία περιλαμβάνει, πέρα από την αγορά των πλαισίων, την μεταφορά στο επιθυμητό μέρος και την ασφάλισή τους κατά την μεταφορά αυτή. Έτσι, για τα 36 πλαίσια, συνολικής ισχύος  $36 \cdot 180 = 6480$  W απαιτούνται:

$$2,5 \text{ €/W} \cdot 6480 \text{ W} = 16200 \text{ €}$$

Αντίστοιχα, για τους 2 μονοφασικούς αντιστροφείς Sunny Island 5048 της SMA, η τιμή αγοράς, συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ, είναι 0,58 €/watt, οπότε το κόστος των 2 αντιστροφέων είναι:

$$0,58 \text{ €/W} \cdot 5000 \text{ W/inverter} \cdot 2 = 5800 \text{ €}$$

Η τιμή του κάθε συσσορευτή PVX-2580L της εταιρίας Concorde είναι 593€, συνεπώς για τους 16 συσσορευτές του συστήματος έχουμε:

$$593 \text{ €/συσσορευτή} \cdot 16 \text{ συσσορευτές} = 9488 \text{ €}$$

Το κόστος του ελεγκτή φόρτισης Sunsource SYMC 48-100 ανέρχεται στην τιμή των 800 €.

Το αντίστοιχο κόστος για το H/Z SDG-Y15S της SDS το οποίο είναι απαραίτητο για την λειτουργία της εγκατάστασης σε περιόδους συννεφίας είναι 430€/kW. Άρα για την ονομαστική ισχύ του H/Z 15kW, έχουμε:

$$430 \text{ €/kW} \cdot 15 \text{ kW} = 6450 \text{ €}$$

Όσον αφορά τον πίνακα, τις καλωδιώσεις και τις βάσεις στήριξης των πλαισίων που θα χρειαστούν για την εγκατάσταση, το κόστος ανέρχεται στα 2.500 € συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ. Στην τιμή αυτή περιλαμβάνονται και στηρίγματα καλωδίων και βύσματα. Απαιτείται ο πίνακας να παρέχει αντικεραυνική προστασία τόσο στο AC όσο και στο DC.

Επίσης, στο αρχικό κόστος της επένδυσης περιλαμβάνεται και το κόστος εγκατάστασης του σταθμού. Εκτιμάται ότι ένα εξειδικευμένο συνεργείο τοποθέτησης θα χρειαστεί περίπου 5 εργάσιμες μέρες αν δουλεύουν 4 άτομα. Ο ημερήσιος μισθός κάθε υπαλλήλου, μαζί με την ασφάλειά του υπολογίζεται στα 60€. Αν συνυπολογιστούν κόστη μεταφοράς του συνεργείου και πιθανές καθυστερήσεις λόγω απρόβλεπτων καιρικών φαινομένων, το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται περίπου στα 1500€ μαζί με το ΦΠΑ. Στόν πίνακα 7.9 φαίνεται συγκεντρωτικά το συνολικό κοστολόγιο της εγκατάστασης:

Ποσότητα	Είδος	Εταιρία-Μοντέλο	Τιμή (€)
36	Φωτοβολταϊκά πλαίσια	KYOCERA KD180GH-2PU	16200
1	Ελεγκτής φόρτισης	SUNSOURCE SYMC-48-100	800
16	Συσσορευτές	CONCORDE PVX-2580L	9488
2	Αντιστροφείς	SMA SUNNY ISLAND 5048	5800
1	Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος	SDS SDG-Y15S	6450
-	Κόστος εγκατάστασης	_____	1500
-	Λοιπός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός (Καλωδιώσεις, ηλεκτρικοί πίνακες, ασφάλειες, βάσεις στήριξης)	_____	2500
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>			<b>42738</b>

Πίνακας 7.10 - Συνολικό κοστολόγιο εγκατάστασης

## 7.7 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε αυτόνομη οικία, δηλαδή σε οικία απομακρυσμένη από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε ως εξής:

1) Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των καταναλώσεων της οικίας για δύο διαφορετικές εποχές του χρόνου (χειμώνας, καλοκαίρι), και υπολογίστηκε η μέση ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση της οικίας και για τις δύο περιπτώσεις.

2) Εν συνεχεία επιλέξαμε την κλίση και το προσανατολισμό της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με κριτήριο την απόδοση της (30 μοίρες, νότιος προσανατολισμός), και με την βοήθεια του προγράμματος PVGIS πραγματοποιήσαμε μελέτη των μετεωρολογικών δεδομένων για την περιοχή της Κορίνθου, όπου παρατηρήσαμε πως οι κρίσιμοι μήνες για την διεξαγωγή της μελέτης είναι ο Δεκέμβριος και ο Ιούνιος. Με βάση τα εξαγόμενα από το πρόγραμμα δεδομένα και έχοντας ήδη υπολογίσει τις μέσες ημερήσιες καταναλώσεις της οικίας και τις δύο εποχές αναφοράς, υπολογίστηκε η ισχύς αιχμής της Φ/Β συστοιχίας και αποφασίστηκε πως η διαστασιολόγηση της Φ/Β συστοιχία πρέπει να πραγματοποιηθεί για τον μήνα Δεκέμβριο, όπου η ισχύς αιχμής είναι μεγαλύτερη (6,4 kW<sub>p</sub>).

3) Στην συνέχεια επιλέξαμε Φ/Β πλαίσια της εταιρίας KYOCERA ισχύος 180 W<sub>p</sub> έκαστο, όπου οδηγηθήκαμε στην διαστασιολόγηση 36 πλαισίων σε 12 παράλληλους κλάδους με 3 πλαίσια εν σειρά. Χρησιμοποιώντας πάλι το πρόγραμμα PVGIS υπολογίσαμε την μέση ημερήσια και μέση μηνιαία ηλεκτροπαραγωγή από το Φ/Β σύστημα (Πίνακας 7.5).

4) Προχωρήσαμε στην επιλογή του απαιτούμενου αριθμού συσσορευτών για την κάλυψη των αναγκών της οικίας για μία μέρα αυτονομίας, τους καλοκαιρινούς μήνες μιας και η παραγωγή από την Φ/Β συστοιχία είναι σαφώς μεγαλύτερη. Επιλέξαμε 16 συσσορευτές της εταιρίας Concorde, ονομαστικής χωρητικότητας 236Ah και ονομαστικής τάσης 12V. Οι συσσορευτές συνδεσμολογήθηκαν σε 4 παράλληλους κλάδους με 4 στοιχεία εν σειρά έτσι ώστε να έχουμε τάση φόρτισης συσσορευτών 48V.

5) Με δεδομένο ότι οι συσσορευτές φορτίζουν με τάση 48V, και ελέγχοντας κατάλληλα τη μέγιστη τάση που παράγει η Φ/Β συστοιχία, την τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος της συστοιχίας επιλέξαμε ελεγκτή φόρτισης της εταιρίας SYMC ονομαστικής τάσης 48 V και μέγιστου ρεύμα φόρτισεως 100A

6) Επειδή τα φορτία μας είναι πολυάριθμα, δεν υπάρχει περίπτωση να λειτουργούν ταυτόχρονα, και υπολογίσαμε την συνολική ισχύ ταυτόχρονης λειτουργίας των συσκευών περίπου 7kW. Έτσι επιλέξαμε 2 μετατροπείς DC-AC (Inverter) της εταιρίας SMA με ονομαστική ισχύ 5kW έκαστος, οι οποίοι συνδεσμολογήθηκαν

παράλληλα ώστε να αποδίδουν τελικώς 10kW. Αυτό συμβαίνει διότι οι inverter όταν συνδεσμολογηθούν παράλληλα συγχρονίζονται και λειτουργούν σαν ένας.

7) Για την φόρτιση των συσσωρευτών, αλλά και την κάλυψη του ταυτοχρονισμένου φορτίου σε περιόδους παρατεταμένης συννεφίας χρησιμοποιούμε ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) της εταιρίας SDS ονομαστικής ισχύος 15kW ώστε να λειτουργεί τις 5 ώρες που χρειάζονται οι συσσωρευτές για να γεμίσουν. Η γεννήτρια συνδέεται στους δύο αντιστροφείς (όπου έχουν υποδοχή γεννήτριας), έτσι ώστε όταν αδειάσουν οι συσσωρευτές να τεθεί σε λειτουργία με μία ελάχιστη χρονοκαθυστερίση.

8) Επιλέξαμε καλώδια τύπου H07RN-F τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή διατομής 70mm<sup>2</sup> για τις συνδεσμολογίες της πλευράς συνεχούς ρεύματος (Φ/Β γεννήτρια, ελεγκτής φόρτισης, συσσωρευτές, είσοδος inverter), και καλώδια τύπου H07V-K, διατομής 3x10mm<sup>2</sup> για την σύνδεση του H/Z με τον κάθε αντιστροφέα και 3x16mm<sup>2</sup> για την σύνδεση των αντιστροφέων με τις καταναλώσεις της οικίας. Επιλέχθηκε επίσης τρίγωνο γείωσης για την προστασία της εγκατάστασης.

9) Τέλος πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση του συστήματος, όπου υπολογίστηκε το κόστος των επιμέρους μονάδων που απαρτίζουν το σύστημα και επιπλέον υπολογίστηκε το συνολικό κοστολόγιο του συστήματος που ανέρχεται στα 42738 €, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους εγκατάστασης.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως η μελέτη ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών δεν είναι απλή υπόθεση, και πρέπει να ληφθούν πολλοί παράγοντες υπο' όψη. Επίσης συμπεραίνουμε πως η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται ένα Φ/Β σύστημα και ο τρόπος εγκατάστασης καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, αλλά και το κόστος του συστήματος. Βασικό κριτήριο επιλογής του συστήματος είναι η αξιοπιστία, που αντιτίθεται με το υψηλό κόστος εγκατάστασης, το οποίο στην χώρα μας δεν υποστηρίζεται με επιδοτούμενα προγράμματα λόγω έλλειψης σχετικής νομοθεσίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά συστήματα", Εκδόσεις Ζήτη (2009)
- [2] Σ.Περδίδος, "Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις", Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ-4Μ (2010)
- [3] Ι.Καδέλλης, Κ.Καβαδίας, "Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας", Εκδόσεις Σταμούλη (2001)
- [4] Σ.Ν.Καπλάνης, "Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙΙ, Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Τεχνολογία, Μελέτες, Εφαρμογές", Εκδόσεις ΙΩΝ (2004)
- [5] Σ.Μανιάς, "Ηλεκτρονικά ισχύος", Εκδόσεις Συμεών (2007)
- [6] Η. Βυλλιώτης, Π.Μαλατέστας, "Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρονικών ισχύος", Εκδόσεις Τζιόλα (2004)
- [7] Π.Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης", Εκδόσεις Ζήτη (1992)
- [8] Β.Δημητρόπουλος, Μ.Βαρβατσουλάκης, Θ.Γεωργάκης, Χ.Κουτουλάκος "Ειδικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις Β' Τεύχος" (2002)
- [9] Vaughn Nelson, "Introduction to renewable energy", CRC Press (2002)
- [10] Deutsche Gesellschaft Für Sonnenenergie, "Planning and Installing Photovoltaic systems", Earthscan (2005)
- [11] Gilford Masters, "Renewable and efficient power systems", Wiley-Interscience (2004)
- [12] Γ.Καλκάνης, "Η ενέργεια και οι πηγές της: Τι, πως, γιατί", Εκδόσεις ΚΑΠΕ (1997)
- [13] "Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις", Εκδόσεις ΚΑΠΕ (2009)
- [14] Μ.Τριανταφυλλίδου, "Περιβαντολογική διερεύνηση των παράκτιων εγκαταστάσεων ΑΠΕ με έμφαση στις βιολογικές επιπτώσεις", Διπλωματική εργασία (2012)
- [15] Λ.Γκαρτζώνη, "Ανάλυση, σχεδιασμός και διερεύνηση της λειτουργίας μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο", Διπλωματική εργασία (2010)

- [16] Α.Τσουπουρίδης "Αναδρομή, σημερινή τεχνολογία και προοπτική της μπαταρίας", Διπλωματική εργασία (2012)
- [17] Μ.Διαμαντίδου, Δ.Ανδρέου "Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά", Διπλωματική εργασία (2007)
- [18] [www.sma-hellas.com](http://www.sma-hellas.com)
- [19] [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm)
- [20] [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [21] [www.ppcr.gr](http://www.ppcr.gr)
- [22] [www.sunsourcecetek.com](http://www.sunsourcecetek.com)
- [23] [e-fotovoltaika.blogspot.gr](http://e-fotovoltaika.blogspot.gr)
- [24] [www.global.kyocera.com](http://www.global.kyocera.com)
- [25] [www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)
- [26] [www.elemko.gr](http://www.elemko.gr)