



# **ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

## **ΟΝΟΜΑΤΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:**

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΗΛΙΑΣ

ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ

## **ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ:**

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΡΗΓΟΡΗΣ

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

### **ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π. Ραλλη & Θηβόν 250, 12244 Αιγάλεω, Αθήνα – Ελλάδα

Τηλ. 210-5381488

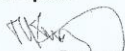
**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΚΑΤΕΡΙΛΙΑΜΜΕ ΠΑΝΤΕΛΕΧΗΜΩΝ του ΑΝΔΡΕΑ, φοιτητής του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της.

**Ο Δηλών****Ημερομηνία**

2/10/18

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική έχει ως σκοπό να περιγράψει την γενική λειτουργία των φωτοβολταϊκών ως ανανεώσιμη ενέργεια και να αναλύσει μια πιθανή λύση για την βέλτιστη απόδοση τους μέσω δύο διαφορετικών μεθοδολογιών. Το μέγιστο σημείο ισχύος μπορεί να βρεθεί μέσω διάφορων τρόπων όπως ο αλγόριθμος “διατάραξης και παρατήρησης”, ο αλγόριθμος “αυξητικής αγωγιμότητας” είτε μέσω της μεθόδου σάρωσης ρεύματος. Επισημαίνονται διάφορα στοιχεία γύρω από τα υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά αλλά και τα αιολικά για τις δυνατότητες που έχουν ως προς την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη αναλύονται κυκλώματα που δίνουν αποτελέσματα για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας.

Στην εισαγωγή γίνεται αναφορά στη γενική λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, και στο γενικό τρόπο λειτουργίας τους.

## **ABSTRACT**

The present diploma thesis aims to describe the general function of photovoltaics as renewable energy and to analyze some possible solutions for their optimal output via two different approaches/methodologies. The maximum power point can be found in a number of ways, such as the "perturb and observe" algorithm, the "incremental conductance" algorithm or the current scanning method. Various elements are highlighted around hybrid solar photovoltaics and wind systems for exploiting solar radiation. It also analyzes circuits that give results for different values of radiation and temperature.

The introduction refers to the general operation of the photovoltaic cell, and to its general mode of operation.

## Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	8
---------------	---

### **Κεφάλαιο 1** - Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	8
1.2 Γενικές πληροφορίες.....	9
1.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	10
1.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κελιών/πάνελ – Σύγκριση.....	17
1.5 Καμπύλη V-I.....	20
1.6 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών.....	22
1.7 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος.....	24
1.8 Ηλιοθερμική ενέργεια στην Ελλάδα.....	24

### **Κεφάλαιο 2** - Υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα.....	28
2.3 Αιολική ενέργεια-Ανεμογεννήτριες.....	30
2.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος.....	50
2.5 Συνδυασμός νερού και αέρα σε υβριδικό σύστημα.....	56
2.6 Σύγκριση αποδοτικότητας συμβατικών με τα υβριδικά συστήματα.....	56

### **Κεφάλαιο 3** - Εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος (maximum power point)

3.1. Σκοπός.....	58
3.2. Εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος.....	58
3.3. Γενικές παρατηρήσεις για τα κυκλώματα μετατροπών.....	60
3.4 Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Απόδοσης με μετατροπείς DC σε DC.....	61
3.5 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.....	62

3.6 Μετατροπείας ανύψωσης τάσης.....	64
3.7 Μετατροπείας Σ.Ρ.-Σ.Ρ. Υποβιβασμού-Ανύψωσης.....	65

#### **Κεφάλαιο 4** - Αλγόριθμοι αναζήτησης

4.1 Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης.....	68
4.2 Αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας.....	72
4.3 Μέθοδοι σάρωσης ρεύματος.....	77

#### **Κεφάλαιο 5** - Παραδείγματα συστημάτων καλής απόδοσης φωτοβολταϊκών

5.1 Κυκλώματα για την εύρεση του Μέγιστου Σημείου Ισχύος.....	81
5.2 Μελλοντική παρουσία και εξέλιξη των φωτοβολταϊκών και άλλων ανανεώσιμων πηγών.....	87
5.3 Φωτοβολταϊκά σε βιομηχανίες.....	88

#### **Κεφάλαιο 6** - Παράδειγμα ηλιακού ακολουθητή (solar tracker)

6.1. Γενικές πληροφορίες για τους ηλιοστάτες.....	89
6.2.Τμήματα του συστήματος.....	90
6.3 Μικροεπεξεργαστής και τμήμα του.....	91
6.4 Φωτοαντίσταση.....	92
6.5 Συμπεράσματα.....	97

Βιβλιογραφία.....	99
-------------------	----

*(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή.)*

# Κεφάλαιο 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Σύμφωνα με τον Αριστοτέλη «Η ουσία ενός φαινομένου γίνεται καλύτερα αντιληπτή όταν το ερευνούμε από τη γένεσή του», παρόμοια λοιπόν σ' αυτό το σημείο θα αναφερθεί η ιστορική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Καταρχάς η σύνθετη λέξη αναλύεται σε «φώτο» που προέρχεται από το φώς και σε «βόλτα» που αναφέρεται στον Alessandro Volta, έναν από τους πρωτοπόρους στη μελέτη του ηλεκτρισμού.[17]

Η πρώτη επαφή του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel κατά τη διάρκεια πειραμάτων με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό, παρατήρησε ότι η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα αλλά χωρίς πρακτική εφαρμογή.[15]

Το επόμενο βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams με το φοιτητή του Day ανακάλυψαν ότι το σελήνιο(Se) παράγει ηλεκτρισμό όταν εκτίθεται στο φως. Στη συνέχεια ο ερευνητής Charles Fritz(1883) περιέγραψε την πρώτη κυψέλη η οποία αποτελούνταν από φωτοβολταϊκό στοιχείο σεληνίου χωρίς τη χρήση χημικών διαλυμάτων. Η απόδοσή του στοιχείου μάλιστα ήταν 1-2%. Σημαντική επίσης η συμβολή του Albert Einstein το 1904 που δημοσίευσε την πληρέστερη θεωρία του σχετικά με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Γι' αυτήν την προσπάθεια του άλλωστε τιμήθηκε με βραβείο Νόμπελ(1921).[17]

Το 1918 ο Πολωνός επιστήμονας Jan Czochralski ανέπτυξε μια νέα μέθοδος παραγωγής του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα κι σήμερα. Το 1949, οι Mott και Schottky κατέληξαν στη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης και μάλιστα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί, όδευσαν προς τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές. Το πρώτο ηλιακό κελί έγινε πραγματικότητα στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson με απόδοση 6%. Τέσσερα χρόνια μετά(1958) η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εισάγεται στο χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν για πρώτη φορά εκτοξεύεται δορυφόρος (το Vanguard I) τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά, που θα δουλέψει συνεχόμενα για 8 χρόνια.



Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από τη Sharp, σε έναν φάρο(1962) Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242 W. Παρατηρείται όμως ότι τα φωτοβολταϊκά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής περιορίζονταν μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων.

Με την πάροδο του χρόνου το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων αρχίζει να μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης να αυξάνεται, μ' αυτό τον τρόπο λοιπόν τα φωτοβολταϊκά συστήματα καθίστανται περισσότερο οικονομικά και ανταγωνιστικά συγκριτικά με τη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, σε σχέση με την απόδοση άλλων συστημάτων (αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός.[9],[10]

Ακόμα μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές φωτοβολταϊκών είναι η συμπληρωματική παραγωγή ενέργειας. Στην Βόρεια Αμερική πολλές εταιρείες παραγωγής ενέργειας (αντίστοιχες ΔΕΗ) υποστηρίζουν τα φορτία του κλιματισμού τους θερινούς μήνες με φωτοβολταϊκά συστήματα. Εν κατακλείδι ο αυριανός στόχος αποτελεί η επιθυμία να προέρχεται από τις ανανεώσιμες πηγές το 20% της συνολικής παραγωγής ενέργειας.[15]

## 1.2 Γενικές πληροφορίες

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ή ηλιακά κύτταρα. Πρόκειται για διόδους ημιαγωγών, που από τη στιγμή που έρχονται σε επαφή με φωτόνια (που εμπεριέχονται στο ηλιακό φως), καταφέρνουν να αναπτύξουν διαφορά δυναμικού μεταξύ της εμπρόσθιας και της πίσω όψης. Οι τιμές που είναι δυνατό να επιφέρει ένα ηλιακό κύτταρο είναι μέχρι 0.5-1.0 Volt τάση και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA για κάθε cm<sup>2</sup> της επιφάνειας, το οποίο εξαρτάται από το υλικό της κατασκευής τους όσο και την ένταση της ακτινοβολίας. Η τιμή του ενεργειακού διάκενου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή υλικού για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το πυρίτιο αποτελεί το συνηθέστερο υλικό στην κατασκευή φωτοστοιχείων, αφού είναι το κυριότερο υλικό για την κατασκευή ημιαγωγών. Η κατασκευή με κύριο συστατικό το πυρίτιο χρησιμοποιεί μονοκρυσταλλικά είτε πολυκρυσταλλικά wafer, διαφορετικά λεπτά films πυριτίου.

Μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, η χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια έγινε πράξη χάρη στις φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών (25 έτη ή και περισσότερο).
- Η ατμοσφαιρική ρύπανση ή μόλυνση αποφεύγεται όπως και οποιαδήποτε ηχορύπανση.
- Η ηλιακή ενέργεια εντάσσεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ικανά να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές που έχουν μεγάλη απόσταση από το κύριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η κατασκευή τους στηρίζεται στο πυρίτιο, το οποίο αποτελεί ένα στοιχείο που βρίσκεται σε αφθονία στο οικοσύστημα.
- Παραμένουν αποδοτικά ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Η συντήρησή τους δεν είναι μια δύσκολη ή πολυέξοδη διαδικασία.

Λαμβάνοντας όμως από την άλλη πλευρά κάποιους άλλους παράγοντες, μία από τις όχι και τόσο θετικές παραμέτρους των φωτοβολταϊκών είναι το κόστος τους (ειδικότερα για οικιακές εγκαταστάσεις το κόστος φτάνει τα 600ευρώ/kWp). Επιπρόσθετα, η ηλιακή ισχύς δεν είναι σταθερή μέσα στο 24ωρο, οπότε η απόδοση των Φ/Β συστημάτων εξαρτάται μέχρι ένα αρκετά σημαντικό βαθμό από τις καιρικές συνθήκες.

Στα θετικά όμως εντάσσεται η ιδιαίτερη εξέλιξη στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών, με την απόδοσή τους να βελτιώνεται, και το κόστος κατασκευής τους να μειώνεται σύμφωνα με εκτιμήσεις για το μέλλον.

[23]

### 1.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ο ήλιος, το κέντρο του συστήματος στο οποίο λειτουργεί ο πλανήτης γη στέλνει προς την ατμόσφαιρα της 174000 Terawatt-hours κάθε έτος. Ο άνθρωπος για να εκμεταλλευτεί την προαναφερθείσα ενέργεια χρησιμοποιεί τα παρακάτω μέσα:

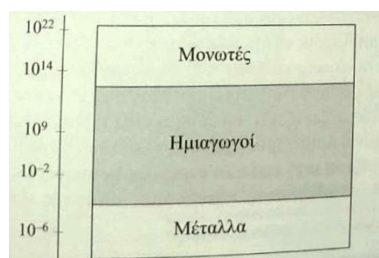
A) ηλιακούς θερμοσυσσωρευτές, οι οποίοι αποθηκεύουν την ενέργεια σε άλλα μέσα-υλικά όπως το νερό και

B) μέσω ημιαγωγικών υλικών στα οποία βασίζονται και τα φωτοβολταϊκά και έχουν σκοπό την μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Το κύριο ημιαγώγιμο το οποίο χρησιμοποιείται, είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο σαν χημικό στοιχείο συναντάται

σε αφθονία στον φλοιό της γης-το δεύτερο σε αφθονία μετά το οξυγόνο. Η κύρια μορφή στην οποία συναντάται είναι αυτή των πυριτιούχων ορυκτών και λιγότερο σε διοξείδιο του πυριτίου. [24]

Τα υλικά που ονομάζονται μονωτές, υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, αφού αποτελούν ιδιαίτερα μεγάλη ειδική αντίσταση, της τάξεως από  $10^{14}$  έως  $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ . Οι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή τα μέταλλα, έχουν ειδική αντίσταση σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα ( $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ). Τα υλικά που ονομάζονται ημιαγωγοί είναι στην ενδιάμεση κατάσταση σε σχέση με τις δύο προαναφερθείσες, με ειδική αντίσταση να κυμαίνεται από  $10^{-2}$  έως  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ , που επηρεάζεται από τη χημική σύνθεση. Η ονομασία ενός χημικά καθαρού, κρυσταλλικού ημιαγωγού είναι ενδογενής.

(Intrinsic). Η σύσταση του μπορεί να προέρχεται από ένα χημικό στοιχείο (Πυρίτιο, Si, Γερμάνιο, Ge) ή από περισσότερα από ένα στοιχεία (Αρσενικούχο Γάλλιο, GaAs).



Εικόνα 1: Κατάταξη με βάση την ειδική αντίσταση [43]

Οι ημιαγωγοί διακρίνονται σε ενδογενείς ημιαγωγούς, και σε αγωγούς προσμίξεων. Οι ενδογενείς ημιαγωγοί έχουν ίδια στοιχειακή σύνθεση κατά το συνολικό μήκος τους. Οι αγωγοί προσμίξεων πραγματοποιούνται όταν ένα ημιαγωγίμο στοιχείο εμπλουτιστεί με άτομα άλλου στοιχείου με κατάλληλο τρόπο, ιδιαίτερα σημαντική τεχνική για τη σύγχρονη τεχνολογία.

Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας των ενδογενών ημιαγωγών, η αντίστασή τους μειώνεται σημαντικά, και εξηγείται από το γεγονός πως λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας αυξάνεται το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των ημιαγωγών πρόσμειξης μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει σημαντικά την αγωγιμότητά τους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υψηλής αγωγιμότητάς τους, λόγω του ιονισμού των ατόμων πρόσμειξης σε χαμηλές θερμοκρασίες, στις οποίες έχει επιβληθεί ο ιονισμός των προσμίξεων. Η αύξηση που προκαλείται στους ηλεκτρικούς φορείς εξαιτίας του ιονισμού ατόμων του βασικού συστατικού του ημιαγωγού, είναι ελάχιστη σε σχέση με την αύξηση που συμβαίνει εξαιτίας του ιονισμού ατόμων πρόσμειξης. [43]

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εξελίσσεται με την ακόλουθη διαδικασία. Κατά την ηλιακή ακτινοβολία τα φωτόνια που έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου(ή κάποιου άλλου ημιαγωγού), μπορούν να αφομοιωθούν σε χημικό δεσμό, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου. Κατά τη διαδικασία αυτή, δημιουργείται περισσευούμενη ποσότητα ζευγών φορέων, εκτός από τις συγκεντρώσεις που υπάρχουν ούτως ή άλλως στις συνθήκες ισορροπίας. Κατά την κυκλοφορία των φορέων στο στερεό, και ενόσω δεν υπάρχει επανασύνδεση με φορείς που φέρουν αντίθετο πρόσημο, δίνεται η δυνατότητα να βρεθούν στην περιοχή της p-n ένωσης, άρα θα βρίσκονται υπό την επιρροή του ηλεκτροστατικού πεδίου της. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στο κομμάτι του τύπου n ενώ οι οπές στο κομμάτι του τύπου p, οπότε κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο μερών της διόδου. Η ορθή πόλωση της διόδου μέσω της προηγούμενης διαδικασίας ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Έτσι μια πηγή του ρεύματος λειτουργεί ταυτόχρονα με την πρόπτωση των ηλιακών ακτινών.

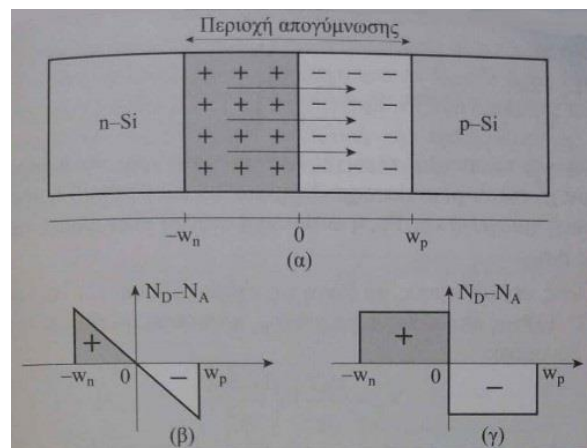
- Το φωτορεύμα  $I_{PH}$ , είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία
- Ως  $\lambda_g$  ονομάζεται το μέγιστο σημείο του μήκους κύματος ακτινοβολίας
- Ο αριθμός των φορέων που συγκεντρώνονται στα ηλεκτρόδια του φωτοστοιχείου σε σχέση με τη ροή  $\Phi(\lambda)$  των φωτονίων, δέχεται ο ημιαγωγός ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου
- Το μήκος κύματος της ενέργειας αντιστοιχεί από  $\lambda$  μέχρι  $\lambda + \delta\lambda$
- Ο δείκτης ανάκλασης του στοιχείου συμβολίζεται με  $R(\lambda)$

$$I_{PH} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

Με τη δημιουργία επαφής μεταξύ δύο ημιαγωγών ίδιου υλικού (για παράδειγμα του πυριτίου) τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τον ημιαγωγό n-Si στον ημιαγωγό p-Si μέσω της διαδικασίας της διάχυσης. Αυτό συνεπάγεται πως στο κομμάτι από όπου έφυγαν τα ηλεκτρόνια μένουν τα θετικά φορτισμένα ιόντα. Ταυτόχρονα, μέσω της διάχυσης μεταφέρονται οι οπές από το χώρο p στην άλλη μεριά. Μέσω της μεταφοράς αυτής συμβαίνει το να παραμένουν ιόντα κοντά στην περιοχή της μεταλλουργικής επαφής (Εικόνα 2). Στην περιοχή του ημιαγωγού με τύπο n, μένουν τα θετικά ιόντα και στην αντίθετη περιοχή τα αρνητικά. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργείται η περιοχή απογύμνωσης (Εικόνα 2). Πρόκειται για περιοχή που δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια ή οπές. Το μήκος  $w = w_n + w_p$  περιγράφει τη συνολική περιοχή  $w$  που είναι αποτέλεσμα αθροίσματος των μήκων απογύμνωσης των περιοχών n ( $w_n$ ) και p ( $w_p$ ).

Η κατανομή των φορτίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Η πρώτη προσέγγιση αφορά τη γραμμικά μεταβαλλόμενη συχνότητα (Linearly graded junction), ενώ η δεύτερη συμβαίνει με απότομη επαφή (abrupt junction, ή επαφή βαθμίδας).

Στη δεύτερη περίπτωση (επαφή βαθμίδας), δεξιά όπως και αριστερά της επαφής η πυκνότητα φορτίου χώρου μένει σταθερή. Στο χώρο των δοτών η πυκνότητα φορτίου χώρου είναι θετική, και στο χώρο των αποδεκτών αρνητική, αλλάζοντας απότομα στην επιφάνεια που υπάρχει η επαφή.



**Εικόνα 2:** α) Η περιοχή απογύμνωσης που δημιουργείται με την επαφή ημιαγωγών τύπου p και n. Το ισχυρό πεδίο επαφής δημιουργείται από τα απογυμνωμένα άτομα. β) Πυκνότητα φορτίου χώρου γραμμικά μεταβαλλόμενη γ) Απότομη επαφή ημιαγωγών

Κατά την επαφή βαθμίδας η συγκέντρωση των δοτών  $N_D$ , αποτελεί τη σταθερή πυκνότητα του ημιαγωγού τύπου n. Η συγκέντρωση των αποδεκτών  $N_A$ , αποτελεί τη σταθερή πυκνότητα του ημιαγωγού τύπου p. Το συνολικό εύρος, εν απουσία εξωτερική ηλεκτρικής τάσης, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \cdot \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}\right) \cdot V_{bi}} \quad (1.2)$$

εκ των οποίων,

- ❖  $\epsilon$  ονομάζεται η διηλεκτρική σταθερά του υλικού
- ❖  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού
- ❖  $q$  η απόλυτη τιμή του φορτίου ενός ηλεκτρονίου
- ❖  $V_{bi}$  ονομάζεται το εσωτερικό δυναμικό (built-in potential) ή δυναμικό διαχύσεως (diffusion potential) που είναι αποτέλεσμα της διαφοράς των ηλεκτροστατικών δυναμικών  $\psi_n$  και  $\psi_p$  εκτός της περιοχής απογύμνωσης:

$$V_{bi} \equiv \psi_n - \psi_p \quad (1.3)$$

$$\text{Όπου } \psi_n \equiv \frac{E_i - E_F}{q} \quad \{x = -w_n\} \quad \text{και} \quad \text{Όπου } \psi_p \equiv \frac{E_i - E_F}{q} \quad \{x = -w_p\} \quad (1.4)$$

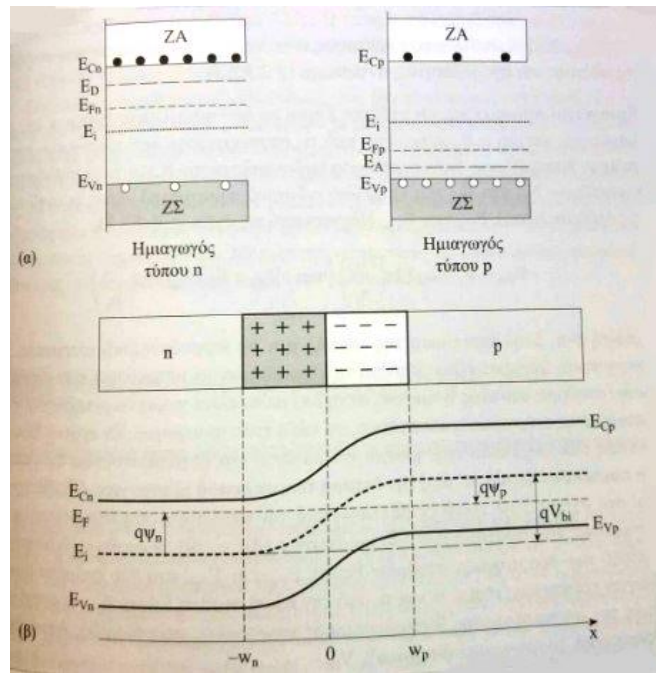
Όπου  $-w_n$  και  $w_p$  εκφράζουν τα όρια των περιοχών απογύμνωσης. Η στάθμη Fermi του ενδογενούς ημιαγωγού εκφράζεται με  $E_i$ , και η στάθμη της ημιαγωγικής επαφής p-n με  $E_f$ .

Ένας διαφορετικός τρόπος υπολογισμού της  $V_{bi}$  είναι ο παρακάτω:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (1.5)$$

Όπου το  $n_i$  εκφράζει την ενδογενή συγκέντρωση φορέων στον ημιαγωγό.

Η  $eV_{bi}$  υπολογίζεται με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ των επιπέδων  $E_C$  στα τμήματα της διάταξης (πέρα από την περιοχή απογύμνωσης) κατά την πρόσμειξη ημιαγωγών ίδιου υλικού.



Εικόνα 3: α) Διάγραμμα ενέργειας ημιαγωγών τύπου n και p, χωρίς να βρίσκονται σε επαφή β) Κατά την επαφή τους. Απεικονίζονται οι ενεργειακές ζώνες χωρίς να εφαρμοστεί τάση στα άκρα της επαφής p-n. Η στάθμη  $E_f$ , παραμένει στο ίδιο επίπεδο καθόλη την έκταση των ημιαγωγών σε θερμοδυναμική ισορροπία. [43]

### Η στάθμη Fermi

Η συγκεκριμένη στάθμη  $E_i$  χαρακτηρίζει κάθε ενδογενή ημιαγωγό, και έχει τιμή ιδιαίτερα κοντά στο ενεργειακό χάσμα. Πιο συγκεκριμένα, στη θερμοδυναμική ισορροπία ισχύει:

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right) \quad (1.6)$$

Εκ των οποίων  $N_V$  και  $N_C$  αντικατοπτρίζουν τις ισοδύναμες πυκνότητες στις ζώνες του σθένους και της αγωγιμότητας αντιστοίχως.

Όσον αφορά τους ημιαγωγούς πρόσμειξης, οι στάθμες Fermi των ημιαγωγών n και p είναι διαφορετικές, αφού η  $E_F$  επηρεάζεται από την συγκέντρωση των ιόντων των προσμειξεων. Για ημιαγωγούς n και p, με  $N_D$  και  $N_A$  πυκνότητες προσμειξεων οι στάθμες Fermi,  $E_{Fn}$  και  $E_{Fp}$  υπολογίζονται από τον τύπο:

$$E_{Fn} = E_i + k_B T \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad \text{και} \quad E_{Fp} = E_i - k_B T \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (1.7)$$

## Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί επί της ουσίας μια πηγή ρεύματος και για την καλύτερη μελέτη του δίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα με τα ηλεκτρονικά στοιχεία παρακάτω.

Όσον αφορά τον μαθηματικό τύπο που εκφράζει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο η ισορροπία θα αποκατασταθεί σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος στην περίπτωση που λόγω της τάσης θα δημιουργείται αντίθετο ρεύμα που θα έχει ίση τιμή με το φωτορεύμα. Άρα επαληθεύεται η σχέση:

$$I_{PH} = I_0 (e^{\frac{eV}{\gamma k T}} - 1) \quad (1.8)$$

- k η σταθερά Boltzmann
- $I_0$  είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου
- e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο
- Η απόλυτη θερμοκρασία T
- Ο συντελεστής  $\gamma$  που σχετίζεται με την δίοδο (ποιότητα, κατασκευή) και παίρνει τιμές από 1 μέχρι 2 συνήθως.

Οπότε αντικαθιστώντας την σχέση 1.2 η τάση του ανοιχτού κυκλώματος είναι:

$$V_{OC} = \frac{\gamma k T}{e} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1\right), I_0 < I_{PH} \Rightarrow \frac{\gamma k T}{e} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) \quad (1.9)$$

[23]



## 1.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κελιών/πάνελ – Σύγκριση

Στα φωτοβολταϊκά, υφίσταται ποικίλες τεχνολογίες ημιαγωγικών υλικών που εφαρμόζεται στην δόμηση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Οι επικρατέστερες τεχνολογίες είναι: το κρυσταλλικό πυρίτιο (crystalline silicon) και του λεπτού υμενίου (thin film). Πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου δημιουργήθηκαν από την προσθήκη προσμίξεων στρωμάτων πυριτίου σε ηλιακά κελιά, τα οποία στη συνέχεια κατασκευάζονται για να σχεδιάσουν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Οι δύο τύποι πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου είναι: Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου τα οποία δημιουργούνται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο πυριτίου. Παράγονται με την υψηλότερη καθαρότητα του πυριτίου και έχουν την πιο δύσκολη μέθοδο κατασκευής, γνωστή ως πράξη "Czochralski". Η απόδοσή τους είναι μεγάλη, της τάξης του 15 έως 18%, αλλά το κόστος είναι υψηλό. Τα ηλιακά κελιά έχουν σχήμα κύκλου και τετράγωνα ενώ το χρώμα τους είναι βαθύ μπλε έως μαύρο όταν υπάρχει αντί-ανακλαστική επίστρωση ή γκρι χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση.

Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου εφαρμόζονται από δίσκους πυριτίου που ελαττώνεται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 13% έως 16%, είναι χαμηλή ακρίβεια και κόστος σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Κατασκευάζονται σε τετράγωνο σχήμα, ενώ το χρώμα τους είναι μπλε με αντί-ανακλαστική επίστρωση ή γκρι-ασημί χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση.

Τα πάνελ του λεπτού υμενίου παράγεται σε λεπτές στρώσεις ημιαγωγικού υλικού πάνω σε διάφορες επιφάνειες (συνήθως γυαλί). Η κατασκευή αυτή δημιουργήθηκε με σκοπό τη χρήση χαμηλών ποσοτήτων ημιαγωγικού υλικού. Η απόδοση των πάνελ είναι αρκετά χαμηλή από 5 έως 7% αλλά με μικρό κόστος κατασκευής. Είναι τρεις τύποι πάνελ λεπτού υμενίου:

Τα πάνελ άμορφου πυριτίου έχουν απασχοληθεί σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (κινητά). Θετικό είναι ότι το άμορφο πυρίτιο μπορεί να καταλαμβάνει μικρότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Ωστόσο, η ικανότητά τους στην μεταποίηση ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι η λιγότερο αποτελεσματική.

Τα πάνελ Καδμίου - Τελλουρίου CdTe είναι η συγχώνευση που σχηματίζουν τα ημιαγωγικά υλικά καδμίου-τελλουρίου. Είναι ο πιο κοινός τύπος της κατηγορίας λεπτού υμενίου και είναι τα πιο οικονομικά στην κατασκευή. Αρνητικό είναι η χρήση του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επίσης έχουν την καλύτερη και αποδοτικότερη συμπεριφορά σε μεγάλες θερμοκρασίες και σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας (συννεφιά).

Τα κελιά Χαλκού - Ινδίου / Γαλλίου - Δισεληνιούχου είναι μία από τις υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από μία ένωση χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου(κελιά CIGS). Η αποτελεσματικότητά τους είναι μεγάλη για τα φωτοβολταϊκά κελιά με ποσοστό 19,9%. [27]

## Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

### **Μικρό κινητό Φωτοβολταϊκό Σύστημα**

Συνήθως είναι μικρό το μέγεθος του, για να μετατοπίζεται με ιδιαίτερη ευκολία και να μας παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όπου είναι αναγκαία όπως σε κήπους, κάμπινγκ και σπίτια αν υπάρξει διακοπή ρεύματος. Θα πρέπει να συνδυάζεται με σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το μικρό κινητό Φωτοβολταϊκό σύστημα περιέχει:

- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Μπαταρία.
- Αυτόματο Φορτιστή –Ρυθμιστή.
- Ηλεκτρονικό φορτιστή.
- Μεταλλική βάση,στη πάνω μεμβράνη του υπάρχουν εγκατεστημένα τα παραπάνω εξαρτήματα.

### **Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα**

Συνήθως είναι μεγαλύτερο το μέγεθος του και τοποθετημένο μόνιμα. Έτσι μπορεί να καλύψει με ηλεκτρισμό τροχόσπιτα, θερμοκήπια και σκάφη. Το αυτόνομο Φωτοβολταϊκό σύστημα περιέχει:

- Διάταξη λειτουργίας Mpp.
- Μετατροπέα DC/DC
- Ομάδες Φωτοβολταϊκών πλαισίων για την κατασκευή της απαιτούμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αυτόματο Ρυθμιστή-Φορτιστή των συσσωρευτών αποθήκευσης.
- Ηλεκτρονικό αντιστροφέα που μεταποιεί τη συνεχή τάση εισόδου σε εναλλασσόμενη.
- Επιλογή καταναλώσεως.
- Ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων της ηλεκτρικής εγκατάστασης.
- Πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των ορισμένων καταναλώσεων που λειτουργούν με συνεχή τάση.

### **Διασυνδεδεμένο το Φωτοβολταϊκό Σύστημα**

Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται για ισχύ από 10kWp και πάνω. Ο κτήτορας του μηχανήματος μπορεί να καταναλώνει όσο ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται και να πουλήσει την υπόλοιπη. Επιπλέον όταν δε παρέχει ηλεκτρική ενέργεια, τότε οι ανάγκες μπορεί να τις καλύψει από το βασικό δίκτυο.

Το διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα περιέχει:

- Διπλό μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων.
- Πίνακα ελέγχου και λειτουργίας, σύνδεσης με το βασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Ομάδες των Φωτοβολταϊκών πλαισίων για την κατασκευή υψηλής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας
- Μετατροπέα δικτύου ,μικρής τάσης, μονοφασικό ή τριφασικό

### **Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα με παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο.**

Παράγεται για ισχύ από 50 kWp και πάνω με κύριο στόχο να διοχετεύει όλη την ηλεκτρική ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο. Με την ισχύ των Φωτοβολταϊκών συλλεκτών για μετατροπέα δικτύου είναι:

- Χαμηλής ισχύος μικρής τάσης μονοφασικός ή τριφασικός
- Μέσης ισχύος μικρής τάσης τριφασικός
- Υψηλής ισχύος μέσης τάσης τριφασικός

Ο μετατροπέας δικτύου στηρίζεται με το πεδίο ζεύξης και έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρονική διάταξη. Τέτοιου είδους διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα περιέχει:

- Κεντρική παροχή σύνδεσης πεδίου ζεύξης και μετασχηματιστή κεντρικού βασικού δικτύου.
- Μετατροπέα δικτύου με το πεδίο ζεύξης και τον μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ομάδες των Φωτοβολταϊκών πάνελ για εγκατεστημένη ισχύ από 50kWp και πάνω.

### **Υβριδικό Σύστημα Αυτόνομο**

Το σύστημα αυτόνομο ενώνει δύο πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας , η ανεμογεννήτρια και το συνδεδεμένο Φωτοβολταϊκών πλαισίων.Το σύστημα αυτό είναι βιώσιμη και ταιριαστή λύση για περιοχές μη προσβάσιμες στο βασικό δίκτυο.Αυτόνομο υβριδικό σύστημα περιέχει:

- Πίνακα τροφοδοσίας των καταναλώσεων.
- Ανεμογεννήτρια.
- Συσσωρευτές αποθήκευσης.

- Ομάδες των Φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος.

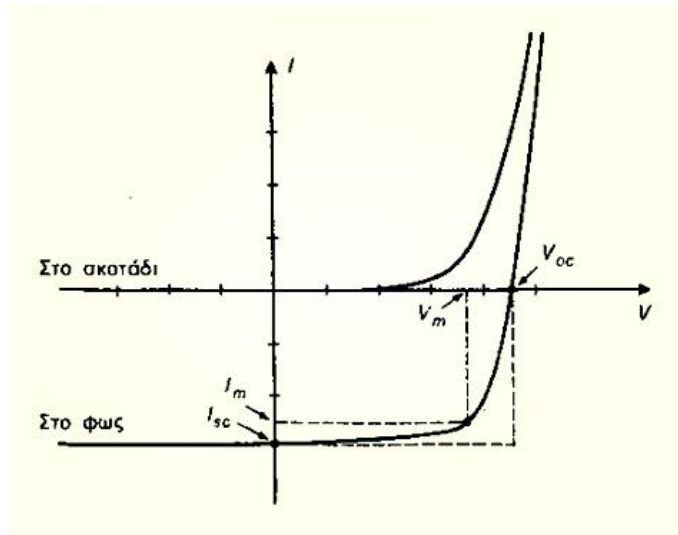
### Υβριδικό Σύστημα Διασυνδεδεμένο

Το σύστημα αυτό έχει δύο ή και παραπάνω πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρέχει την μέγιστη λύση στα νησιά. Τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα λειτουργούν για υψηλή ισχύ. Υβριδικό Σύστημα Διασυνδεδεμένο περιέχει :

- Ντηζελογεννήτρια.
- Πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος.
- Ομάδες των Φωτοβολταϊκών πλαισίων που αποτελεί το Φ/Β πάρκο.
- Ομάδα των ανεμογεννητριών που αποτελεί το αιολικό πάρκο.
- Συσσωρευτές αποθήκευσης που αποτελεί τις συστοιχίες.

[42]

### 1.5 Καμπύλη V-I



Εικόνα 4: Τυπική καμπύλη I-V

Πηγή: <http://slideplayer.gr/slide/2596087>

Ο λόγος των δύο ορθογωνίων που σχηματίζουν δίνουν τον συντελεστή πλήρωσης

Η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται μη γραμμικά και εν συναρτήσει με την ένταση του ρεύματος που δίνεται στο κύκλωμα.

Όταν οι συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές και μεταβάλλεται μόνο η τιμή της αντίστασης του κυκλώματος, η τάση και η αντίσταση κυμαίνονται σε τιμές που βρίσκονται ανάμεσα στην ελάχιστη και την άπειρη πιθανή αντίσταση. Μια πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας είναι ικανή να οδηγήσει στη συγκέντρωση περισσότερων φορέων με συνέπεια μεγαλύτερο αριθμό επανασυνδέσεων φορέων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της έντασης και μείωση της τάσης  $V_{oc}$  οπότε και μείωση της απόδοσης.

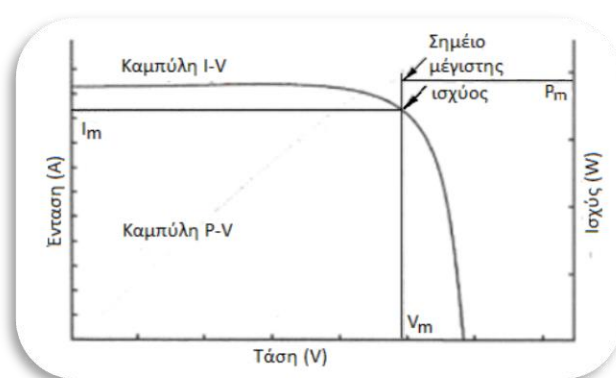
Ο συντελεστής πλήρωσης υπολογίζεται από τον τύπο (μεταβλητές από το προηγούμενο σχήμα):

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1.10)$$

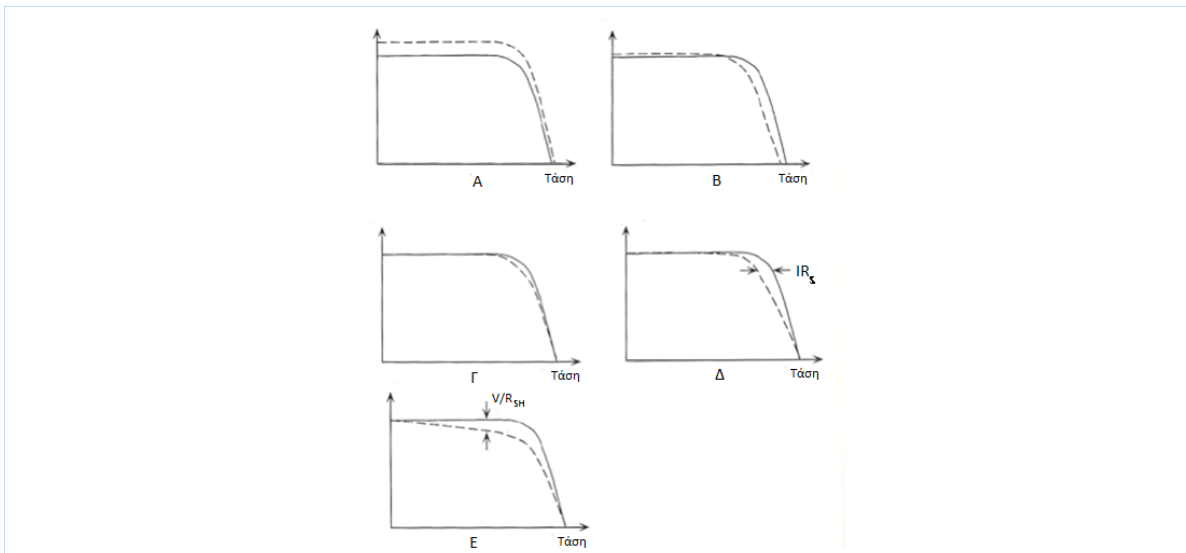
Ο τύπος που εκφράζει τον συντελεστή απόδοσης είναι:

$$\eta = \frac{P_m}{HA} = \frac{I_m \cdot C_m}{HA} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{HA} \quad (1.11)$$

Εκ των οποίων  $A$  είναι το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού,  $H$  η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ηλιακή ακτινοβολίας. Για μέγιστη δυνατή χρήση κρίνεται αναγκαίο οι μεταβλητές που απαρτίζουν τον αριθμητή να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερες. [5]



**Εικόνα 5: Καμπύλη P-V και I-V σε περίπτωση που οι συνθήκες ακτινοβολίας είναι σταθερές**



Εικόνα 6: Σχήμα απεικόνισης για αλλαγές σε μεταβαλλόμενες συνθήκες

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V στην περίπτωση που επικρατεί:

- A) η ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζει άνοδο.
- B) η θερμοκρασία του στοιχείου είναι αυξημένη.
- Γ) ο συντελεστής ποιότητας είναι αυξημένος.
- Δ) Η αντίσταση έχει μεγαλύτερη τιμή.
- Ε) Η παράλληλη αντίσταση  $R_{SH}$  έχει μικρότερη τιμή. [23]

## 1.6 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών

### Ηλιακή ακτινοβολία

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που επί της ουσίας εξαρτώνται από τον ήλιο και την ενέργεια που μεταφέρει, μια σημαντική παράμετρος στην αποδοτικότητα που τελικά θα έχουν είναι η τοποθέτηση τους και ότι έχει σχέση με την κλίση τους. [23]

Το αζιμούθιο ή αζιμουθιακή γωνία είναι μια γωνία που μετράται γενικώς με σημείο αναφοράς το βορρά, με τιμές από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ . Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια όμως υπάρχει σαν αρχή η νότια κατεύθυνση, οπότε στην ανατολική πλευρά βρίσκονται τα θετικά, ενώ

στη δυτική τα αρνητικά. Για την μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας η αζιμούθια γωνία είναι θεμιτό να είναι μηδενική. Σχετικά με τη γωνία που χωρίζει το επίπεδο του συλλέκτη με τον ορίζοντα, που ονομάζεται κλίση του συλλέκτη, το επιθυμητό της επίπεδο είναι η τιμή του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής. Ωφέλιμο κρίνεται, εφόσον γίνεται αναφορά για σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η κλίση να αλλάζει δύο φορές το χρόνο, για τα εξάμηνα του χειμώνα και του καλοκαιριού. [21]

## Παράγοντας θερμοκρασία

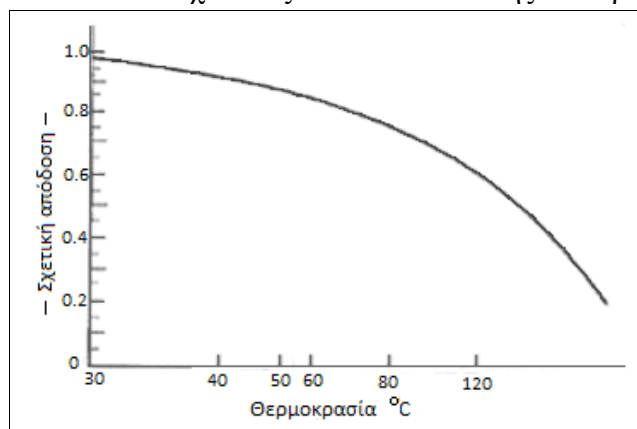
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών και συγκεκριμένα η αύξηση της συνεπάγεται με αύξηση της έντασης του ρεύματος αλλά και μείωση της τάσης του κυκλώματος.

Ακολουθεί τύπος που εκφράζει τη μεταβολή στη οποία υπόκειται το φωτοβολταϊκό και σχετικά διαγράμματα με τη μεταβολή της τάσης  $V_{oc}$

$$n_{\theta} = n_{\sigma_{\theta}} \quad (1.12)$$

- $n$  ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου για συγκεκριμένη θερμοκρασία
- $\sigma_{\theta}$  ο συντελεστής που ευθύνεται για την επιδιόρθωση της θερμοκρασίας
- $n_{\theta}$  ο συντελεστής απόδοσης για την νέα θερμοκρασία

Ο συντελεστής στην συμβατική θερμοκρασία παίρνει την τιμή 1 ενώ για κάθε αύξηση ενός βαθμού της θερμοκρασίας ο συντελεστής μειώνεται κατά 0.005, όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά που έχουν ως υλικό κατασκευής το πυρίτιο.



Εικόνα 7: Μεταβολή της απόδοσης του φωτοβολταϊκού σε σχέση με μεταβολές στη θερμοκρασία.

Η μέτρηση έχει γίνει με βάση την απόδοση του φωτοβολταϊκού στους 20 °C να θεωρείται το 100%, οπότε για διάφορες θερμοκρασίες εκφράζεται το ποσοστό ως προς αυτή. Στον οριζόντιο άξονα η θερμοκρασία είναι βαθμολογημένη λογαριθμικά.

## 1.7 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος

Η ισχύς είναι μια παράμετρος ενός κυκλώματος που επηρεάζεται από την τάση του κυκλώματος όσο και από την ένταση. Αν η γεννήτρια περιβάλλεται από μια σταθερή αντίσταση, η τιμή της ισχύος θα παίρνει τιμές που εξαρτώνται ουσιαστικά από την τιμή της αντίστασης και την ηλιακή ακτινοβολία. Όμως αν στο ενδιάμεσο μεταξύ γεννητριών και της κατανάλωσης παρεμβάλλονται κατάλληλα συγκεκριμένα ηλεκτρονικά στοιχεία, τότε ανά πάσα στιγμή μπορεί να βρεθεί το κάλλιστο, δηλαδή το μέγιστο σημείο ισχύος. Τα στοιχεία που παρεμβάλλονται ονομάζονται ανιχνευτές μεγίστου σημείου ή maximum power point trackers (MPPT).

Η λογική στην οποία στηρίζεται η διαδικασία θα αναλυθεί παρακάτω. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα πραγματοποιείται διαταραχή στην τιμή της τάσης. Η διαταραχή αυτή είναι συνήθως μια αύξηση στην τιμή της τάσης ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται αν υπάρχει αύξηση και στην τιμή της ισχύος. Από τη στιγμή που η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, η συγκεκριμένη διαδικασία κρίνεται αναγκαίο να εκτελείται συνεχώς.

Ο τύπος που εκφράζει την ισχύ που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο είναι  $P=VI$ . Για κάθε μεταβολή στην τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση σε τάση και ένταση ισχύει ο παρακάτω τύπος για την ισχύ:

$$P = VI = (V +dv)(I +dI) \quad (1.13)$$

[1]

## 1.8 Ηλιοθερμική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα κατατάσσεται ως η δεύτερη χώρα η οποία χρησιμοποιεί ηλιακούς θερμοσίφωνες, σύμφωνα με μια έρευνα της Greenpeace. Η αναλογία είναι σχεδόν 30% των νοικοκυριών, θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερο διότι η Ελλάδα χαρακτηρίζεται ως χώρα με υψηλό ποσοστό ηλιοφάνειας στην Ευρώπη. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό, παρόλο που θα προσφέρει μέγιστα ποσοστά οικονομίας όσον αναφορά την κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος.

[2]



# Κεφάλαιο 2

## Υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα

### 2.1 Εισαγωγή

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα παράγουν ενέργεια με τον ίδιο τρόπο όπως ένα κοινό ηλιακό σύστημα, αλλά χρησιμοποιούν μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας για μεταγενέστερη χρήση. Αυτή η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει στα περισσότερα υβριδικά συστήματα να λειτουργούν ως εφεδρική λύση τροφοδοσία ρεύματος κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ρεύματος, παρόμοια με το σύστημα UPS. Ένα ηλιακό υβριδικό σύστημα αποθηκεύει την ηλιακή ενέργεια και μπορεί να παρέχει εφεδρική ισχύ κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ρεύματος. Αυτό είναι ιδανικό για τους ιδιοκτήτες σπιτιού, αν και για την πλειοψηφία των επιχειρήσεων που λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ημέρας, ένα κοινό ηλιακό σύστημα που τροφοδοτείται με πλέγμα είναι ακόμα η πιο οικονομική λύση.

Τα πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων είναι :

- 1) Αποθηκεύει ηλιακή ή χαμηλού κόστους σε ηλεκτρική ενέργεια.
- 2) Επιτρέπει τη χρήση ηλιακής ενέργειας κατά τους χρόνους αιχμής
- 3) Ισχύς διαθέσιμη κατά τη διάρκεια διακοπής δικτύου ή διακοπής ρεύματος - λειτουργία UPS
- 4) Ενεργοποιεί την προηγμένη διαχείριση ενέργειας
- 5) Ενεργοποιεί την ενεργειακή ανεξαρτησία
- 6) Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο

Τα μειονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων είναι :

- 1)Υψηλότερο κόστος από το ηλιακό σύστημα τροφοδοσίας μέσω δικτύου. Κυρίως λόγω του υψηλού κόστους των μπαταριών.
- 2)Η πιο πολύπλοκη εγκατάσταση απαιτεί περισσότερο χώρο και υψηλότερο κόστος εγκατάστασης.
- 3)Διάρκεια ζωής μπαταρίας 7-15 ετών.
- 4)Μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των συσκευών που εκτελείται ταυτόχρονα

Ένας τεχνικός οδηγός για τα διάφορα υβριδικά ηλιακά συστήματα και μετατροπείς στην αγορά. Τα διαθέσιμα συστήματα ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τους τοπικούς διανομείς ηλιακής ενέργειας και τους φορείς ηλεκτρικής ενέργειας σε μία χώρα .Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο βασικούς τύπους:

#### 1. Υβριδικός μετατροπέας / σύστημα All-In-One

Το πιο οικονομικό υβριδικό ηλιακό σύστημα χρησιμοποιεί ένα υβριδικό μετατροπέα all-in-one που περιλαμβάνει έναν ηλιακό μετατροπέα και έναν μετατροπέα / φορτιστή μπαταρίας μαζί με χειριστήρια που καθορίζουν την αποδοτικότερη χρήση της διαθέσιμης ενέργειας.

##### 1Α. Μετατροπέας all-in-one

Πρόκειται για το πιο βασικό είδος υβριδικού ηλιακού μετατροπέα και λειτουργεί πολύ σαν ένα ηλιακό μετατροπέα τροφοδοσίας δικτύου, αλλά επιτρέπει επίσης την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας στο σύστημα μπαταριών για δικιά της χρήση. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του τύπου μετατροπέα είναι ότι δεν περιέχει μια συσκευή απομόνωσης δικτύου, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να τροφοδοτήσει με ρεύμα όταν υπάρχει διακοπή ρεύματος. Αν η σταθερότητα του δικτύου δεν αποτελεί πρόβλημα, τότε αυτός ο απλός υβριδικός μετατροπέας θα ήταν μια καλή οικονομική λύση.

##### 1Β. Ο μετατροπέας all-in-one με εφεδρική (UPS)

Αυτός ο πιο προηγμένος υβριδικός μετατροπέας μπορεί συχνά να χρησιμοποιηθεί ως μετατροπέας σε δίκτυο ή εκτός δικτύου, καθώς έχει ενσωματωμένη δυνατότητα δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας. Κάτω από κανονική λειτουργία, μπορεί να

τροφοδοτήσει την κατοικία , να φορτίσει τις μπαταρίες και η υπερβολική ισχύς μπορεί να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Εάν υπάρχει συσκότιση ή το δίκτυο γίνεται ασταθές, η μονάδα θα μεταβεί αυτόματα στην τροφοδοσία της μπαταρίας και θα συνεχίσει να λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο συνήθως σε λιγότερο από μισό δευτερόλεπτο.

### 1Γ. Σύστημα all-in-one με ενσωματωμένη μπαταρία

Μία πιο πρόσφατη συσκευασία του υβριδικού μετατροπέα μαζί με ένα σύστημα μπαταρίας. Αυτό προσφέρει μια πολύ καθαρή και οικονομικά αποδοτική επιλογή, η οποία συνήθως είναι περίπου το μέγεθος ενός μεσαίου ψυγείου. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ τακτοποιημένα και εύκολα να εγκαταστηθούν , αλλά έχει ορισμένους περιορισμούς καθώς ορισμένα μοντέλα δεν μπορούν να επεκταθούν αργότερα.

## 2. Συστήματα αλληλεπιδραστικών δικτύων υβριδικών και εκτός δικτύου

Πρόσφατα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα αποτελούνταν από δύο διαφορετικούς μετατροπείς οι οποίοι συνεργάζονταν για να σχηματίσουν αυτό που είναι γνωστό ως συζευγμένο σύστημα AC, έναν τυπικό ηλιακό μετατροπέα και έναν εξελιγμένο μετατροπέα μπαταριών διαδραστικού ή πολλαπλών λειτουργιών.Ο μετατροπέας αλληλεπίδρασης ή πολλαπλών λειτουργιών λειτουργεί ως μετατροπέας / φορτιστής μπαταρίας και ολοκληρώνει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, χρησιμοποιώντας με έξυπνο προγραμματιζόμενο λογισμικό για τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας. Οι διαδραστικοί μετατροπείς τροφοδοτούν την ενέργεια με τον ίδιο τρόπο όπως ένας εκτός δικτύου μετατροπέας, αλλά επίσης ελέγχουν τη σύνδεση δικτύου και μπορούν να εγκατασταθούν για να ξεκινήσουν αυτόματα και να εκτελέσουν μια γενική γεννήτρια. Βασικά χαρακτηριστικά ενός διαδραστικού συστήματος πλέγματος:

- 1)Ισχυρός μετατροπέας μπαταρίας για την παροχή συνεχών υψηλών φορτίων
- 2)Προηγμένος φορτιστής πολλαπλών σταδίων για μπαταρίες μολύβδου-οξέος ή λιθίου
- 3)Αυτόματος διακόπτης μεταφοράς AC (λειτουργία UPS) ενσωματωμένο
- 4)Υψηλή διέλευση μέσω της ισχύος
- 5)Υψηλή ικανότητα φόρτισης
- 6)Έλεγχος γεννήτριας - Αυτόματη εκκίνηση / διακοπή
- 7)Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συστήματα υψηλής ισχύος Off-grid
- 8)Απομακρυσμένη παρακολούθηση

9) Η τροφοδοσία του δικτύου και ο περιορισμός όταν δημιουργείται υπερβολική ισχύς

10) Σύστημα αποφυγής αιχμών για να μειωθεί η ζήτηση

11) Μετατόπιση φορτίου και διαχείριση προηγμένης ζήτησης ενέργειας

Προηγμένα διαδραστικά συστήματα χρησιμοποιούνται για εκτός δικτύου και υβριδικές εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλό επίπεδο διαχείρισης ενέργειας. Το ισχυρό λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία διαλογικών μετατροπέων επιτρέπει ενεργειακά στοιχεία ελέγχου όπως το σύστημα αποφυγής αιχμών καθώς και την καταγραφή δεδομένων και τις δυνατότητες PLC μέσω ψηφιακών εισόδων /εξόδων και ελέγχων ρελέ. Λόγω των πολλών λειτουργιών και προηγμένου λογισμικού, το κόστος των διαδραστικών μετατροπέων είναι συνήθως υψηλότερο από τους μετατροπείς all-in-one, αλλά αξίζει το κόστος για τις πρόσθετες επενδύσεις, καθώς είναι γενικά πιο αξιόπιστες, πιο αποδοτικές και επιτρέπουν μελλοντική επέκταση.

[39]

## 2.2 Χρησιμοποίηση ροής νερού/αέρα για αποβολή θερμότητας

Τα τελευταία χρόνια είναι αρκετά δημοφιλή τα συγκεντρωτικά υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εφαρμόζονται σε κτιριακό τομέα. Συνεπώς στα φωτοβολταϊκά μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας επέρχεται ένα μικρό ποσοστό σε ηλεκτρική ενέργεια και το υπόλοιπο κατευθύνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα, εξαιτίας της αυξανόμενης θερμοκρασίας έχει ως επίπτωση την χαμηλή ηλεκτρική τους απόδοση. Το πρόγραμμα μπορεί να ψυχθεί με την βοήθεια κάποιου ρευστού και έτσι θα έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρεται η θερμοκρασία από το φωτοβολταϊκό στο ρευστό, αυτό ονομάζεται αρχή λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων. Ο στόχος είναι η καλύτερη απόδοση της ηλιακής ενέργειας με όσο το δυνατόν ελάχιστες απώλειες. Στην Αγγλία πρωτοεμφανίστηκε το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα από την εταιρία Heliodynamics με σκοπό στην επίβλεψη του ήλιου. [6]



**Εικόνα 8:** Η αποδοτικότητα ενός θερμικού φωτοβολταϊκού σταθμού είναι 10 έως 30% μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα απλό φωτοβολταϊκό σταθμό

Πηγή: <http://www.ecotec.gr/article.php?ID=250>



**Εικόνα 9:** Στην εικόνα διακρίνονται ένα τυπικό φωτοβολταϊκό, ένας συλλέκτης και ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα.

Πηγή: [23]

Τα υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα βασίζονται στη ροή ρευστού σε ενσωματωμένη θερμική μονάδα με χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του φωτοβολταϊκού, αποσκοπώντας στην ψύξη του. Η απαγωγή αυτή της θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί με την κυκλοφορία του νερού ή του αέρα στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών.

Η μείωση της θερμοκρασίας έχει απλούστερη διάταξη και κατασκευή σε σχέση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν το νερό, όμως είναι μικρότερη η αποδοτικότητά τους. Συγκεκριμένα, σε περιβάλλοντα με θερμοκρασία περιβάλλοντος μεγαλύτερη των 20° C τα συστήματα αυτά αποδίδουν λιγότερο.

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά που κάνουν χρήση του νερού, μπορούν να φέρουν αποτελέσματα όλο το χρόνο, σε χώρες που τις διέπουν ήπιο ή θερμό κλίμα.

Ιδιαίτερα σημαντική φαίνεται να είναι η χρήση αυτών των τρόπων ψύξης σε συστήματα με ηλιοστάτη (solar tracker), των οποίων η θερμοκρασία θα διατηρούταν σε υψηλά επίπεδα. [25]

## 2.3 Αιολική ενέργεια – ανεμογεννήτριες

Η ανομοιόμορφη θέρμανση της γης από την ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί την κίνηση μεγάλων μαζών αέρα. Τα χαρακτηριστικά του ανέμου είναι δύο:

- ❖ Η δύναμη που συγκεντρώνεται λόγω της ταχύτητας (και η ένταση).
- ❖ Η διεύθυνση του.

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που μετατρέπεται από κινητική σε μηχανική ή και ηλεκτρική. Η προστασία του περιβάλλοντος είναι μια επιτακτική ανάγκη, και η συμβολή της αιολικής ενέργειας σε περίπτωση που γίνει συστηματική εκμετάλλευση της μπορεί να είναι πολύ σημαντική. Ειδικότερα μπορεί να συμβάλλει:

- ❖ Σε αυξημένη παραγωγή ενέργειας (που συνεπάγεται με εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων, άρα συναλλαγματικά οφέλη).
- ❖ Στον περιορισμό της μόλυνσης του περιβάλλοντος, αφού βάσει μετρήσεων ισχύει πως εξαιτίας της ισχύος μιας ανεμογεννήτριας της τάξης των 600 KW, μπορεί να αντικατασταθεί η ενέργεια που παράγεται από 3000 βαρέλια πετρελαίου και την αποφυγή της εκπομπής 1000 τόνων διοξειδίων του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κάθε έτος, και 2 (ή και περισσότερων τόνων άλλων ρυπογόνων ουσιών).
- ❖ Στο να δημιουργηθούν θέσεις εργασίας, αφού για κάθε MW(μεγαβατ) εγκατάστασης αιολικής ενέργειας, χρειάζονται 10 με 15 νέες θέσεις εργασίας.

## Ανεμογεννήτριες (Α/Γ)

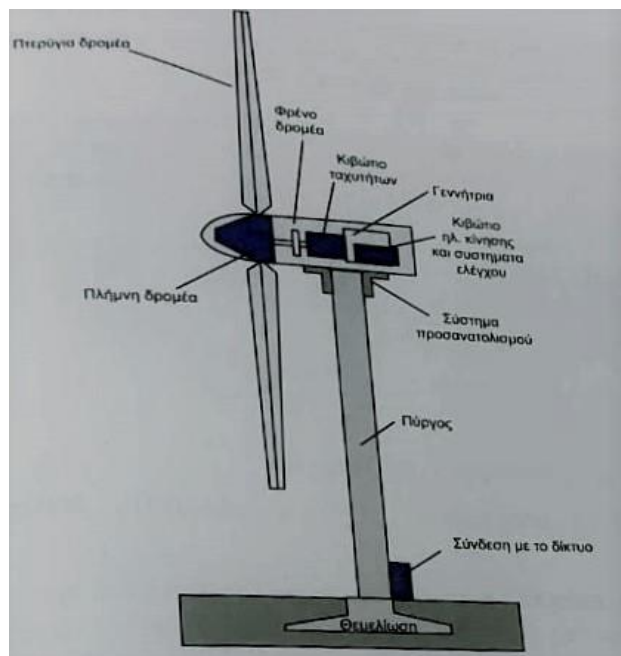
Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω ειδικών μηχανών, των ανεμογεννητριών.

Με βάση τη θέση του άξονα περιστροφής, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, που παραμένει κάθετος ως προς την επιφάνεια του εδάφους.
2. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, όπου ο δρομέας τους είναι τύπου έλικα, τοποθετημένες παράλληλα με το έδαφος και την κατεύθυνση του ανέμου.

Τα πιο γνωστά συστήματα είναι αυτά που βασίζονται στον οριζόντιο άξονα, και αποτελούν το 95% των διαθέσιμων συστημάτων με βάση την αιολική ενέργεια.

Η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών εξαρτάται από δύο παράγοντες- το μέγεθος τους και την ταχύτητα με την ένταση του ανέμου. Το μέγεθος των ανεμογεννητριών διαφέρει ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που χρειάζεται να καλυφθούν.



Εικόνα 10: Τα μέρη της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [42]

1. Δρομέας. Αποτελείται από πτερύγια (συνήθως από ενισχυμένο πολυεστέρα) τα οποία είναι δύο ή τρία. Ο τρόπος πρόσδεσης των πτερυγίων είναι είτε σταθερά, είτε έχοντας τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το βήμα.

Δίπτερες ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια, κατασκευασμένες με ρότορα 10 μέτρων ή και περισσότερο, και το κόστος κατασκευής-συντήρησης είναι μικρότερο από τις ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια αντίστοιχου μεγέθους.

Τρίπτερες ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια, στους οποίους συνδέονται ρότορες μικρών διαστάσεων και μπορούν να εκμεταλλευθούν ασθενές αιολικό δυναμικό.

2. Σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Τα μέρη που το αποτελούν είναι ο κύριος άξονας περιστροφής, το κιβώτιο που προσαρμόζει τις στροφές, και τα έδρανα στήριξης. Το κιβώτιο της προσαρμογής των στροφών, (ή αλλιώς πολλαπλασιασμού των στροφών), έχει σκοπό να προσαρμόσει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην ισχύουσα ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.

3. Ηλεκτρική γεννήτρια. Η ηλεκτρική γεννήτρια συνήθως είναι σύγχρονη με 2 μέχρι 10 ζεύγη πόλων και είναι συνδεδεμένη με τον άξονα του κιβωτίου προσαρμογής, ο οποίος μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Για παράδειγμα για την ταχύτητα που χρειάζεται να έχει η γεννήτρια για συχνότητα 50 Hz, που αντιστοιχούν σε κεντρικό δίκτυο διανομής, είναι:

- Όταν τα ζεύγη πόλων είναι ( $p=2$ ),  $n_s = f \cdot 60/p$

$$n_s = 1500 \text{ στρ/min ή } 25 \text{ στρ/sec}$$

- Όταν τα ζεύγη πόλων είναι ( $p=10$ )  $n_s = 50 \cdot 60/10 = 300 \text{ στρ/min ή } 5 \text{ στρ/sec}$

4. Φρένο δρομέα ή σύστημα πέδησης. Βρίσκεται τοποθετημένο στον άξονα της γεννήτριας ή στον κύριο άξονα και η λειτουργία του μοιάζει με το απλό δισκόφρενο.

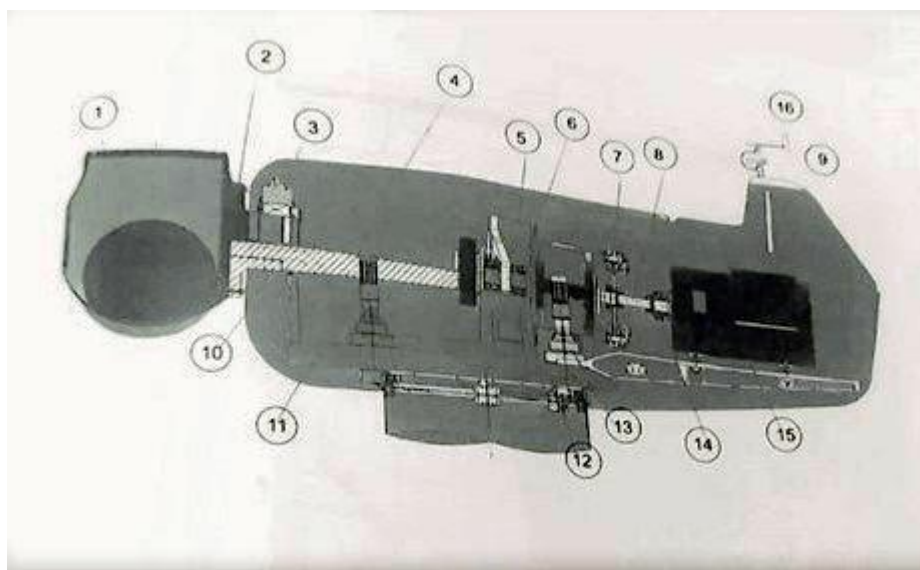
5. Σύστημα προσανατολισμού. Η βασική του λειτουργία είναι να στρέφει τον άξονα περιστροφής προς τη διεύθυνση του ανέμου.

6. Πύργος στήριξης. Η κατασκευή του είναι συνήθως από μέταλλο (σπανιότερα από οπλισμένο σκυρόδεμα) και λειτουργεί σαν στήριξη στην ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

7. Ηλεκτρικός ηλεκτρονικός πίνακας. Η θέση του είναι συνήθως στη βάση του πύργου και με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών διατάξεων ελέγχει και καθοδηγεί τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.



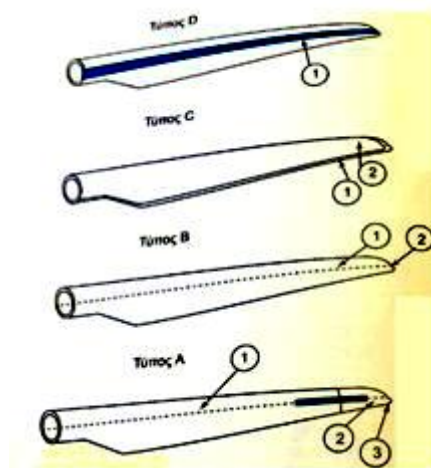
8. Βάση στήριξης (θεμελίωση). Το μέγεθος της ορίζεται μετά από προσεκτική μελέτη Μηχανικού. Κατασκευάζεται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου εγκλωβίζεται ο κορμός ου πύργου στήριξης.



**Εικόνα 11: Μέρη και εξαρτήματα ανεμογεννήτριας [42]**

1. Κορμός ρότορα
2. Φλάντζα κορμού βάσης στήριξης
3. Κάλυμμα εμπρόσθιου τμήματος στήριξης άξονα χαμηλής ταχύτητας
4. Άξονας χαμηλής ταχύτητας
5. Κιβώτιο ταχυτήτων
6. Βάση στήριξης κιβωτίου ταχυτήτων
7. Φρένο σύνδεσης άξονα- γεννήτριας
8. Άξονα υψηλής ταχύτητας
9. Ψύκτης
10. Εμπρόσθιο τμήμα στήριξης άξονα χαμηλής ταχύτητας
11. Βάση στήριξης
12. Φρένο περιστροφής
13. Οδηγός περιστροφής

- 14. Κολάρο ασφαλείας
- 15. Γεννήτρια
- 16. Αισθητήρας ανέμου



Εικόνα 12: τύποι πτερυγίων [42]

**Τύπος A:**

- 1=ενισχυμένο με ασάλινο σύρμα
- 2=κάτω αγωγός ενίσχυσης
- 3=υποδοχέας

**Τύπος B:**

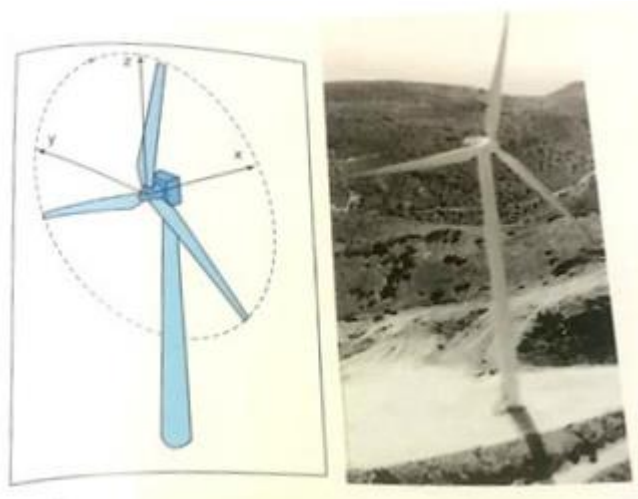
- 1=κάτω αγωγός ενίσχυσης
- 2=υποδοχέας

**Τύπος C:**

- 1=κάτω αγωγός ενίσχυσης
- 2=κάτω αγωγός ενίσχυσης

**Τύπος D:**

- 1=πλέγμα από μέταλλο



Εικόνα 13: Ο κορμός και τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας [42]

Οι έλικες των ανεμογεννητριών έχουν την δυνατότητα να εστιάζουν προς τη διεύθυνση του αέρα και όταν η ταχύτητα του γίνει πιο έντονη μεταβάλλεται η επιφάνεια της για μεγαλύτερη αποδοτικότητα και προστασία. [42]

### Ισχύς ανεμογεννήτριας

Η ισχύς που μεταφέρει ο άνεμος μια συγκεκριμένη στιγμή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{av} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot A \cdot V^3 \quad (2.1)$$

Εκ των οποίων:

$P_{av}$  = Η ισχύς του ανέμου (θεωρητική ισχύς) σε KW

$\rho_{\alpha}$  = Η πυκνότητα του αέρα σε Kg/m<sup>3</sup>

A = Το εμβαδόν που καλύπτουν τα πτερύγια σε m<sup>2</sup>

V = Η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

Πιο συγκεκριμένα για τα μεγέθη ισχύει:

$$\rho_a = \frac{P_a}{R_g \cdot T_a} \quad (2.2)$$

όπου,

$P_a$  = Η πίεση του περιβάλλοντος σε  $\text{Nt/m}^2$

( $1\text{atm}=10^5\text{Nt/m}^2$ ,  $1\text{atm}=750,058\text{mmHg}$ ,  $1\text{mmHg}=133,323\text{Nt/m}^2$ )

$R_g$  = Η σταθερά αερίων, με την τιμή της για τον αέρα να είναι  $287 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{K}$

$$T_a = \theta_a + 273 \quad (2.3)$$

$A = \pi D^2/4$ , όπου

$D$  = Η διάμετρος της πτερωτής ανεμογεννήτριας σε m ( $D=2r$ )

Στο επίπεδο της θάλασσας η πυκνότητα παίρνει την τιμή  $1,23 \text{ Kg/m}^3$ .

Στο πρακτικό κομμάτι, μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να απορροφήσει όλη την ισχύ του αέρα, επειδή ο άνεμος που θα περνούσε στο πίσω μέρος του έλικα δε θα απομακρυνόταν και η κινητική ενέργεια που θα ίσχυε στην έξοδο θα ήταν μηδενική.

Ο υπολογισμός της μηχανικής ενέργεια που προκύπτει από την αιολική, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{\text{μηχ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.4)$$

Εκ των οποίων:

$C_p$  = Ο συντελεστής της ισχύος που με βάση το Νόμο του Albert Betz, κυμαίνεται σε τιμή μέχρι 0,593

Με βάση το Νόμο του Albert το μεγαλύτερο ποσοστό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική είναι το 59,3% αυτής.

Στο πρακτικό κομμάτι η τιμή που λαμβάνει το  $C_p$  είναι ίση με το 65% της μέγιστης. ( $C_{p\text{max}} = C_p \cdot 0,593 \cdot 0,65 = 0,385$  ή  $C_p \approx 0,4$ )

Με τον υπολογισμό των μηχανικών απωλειών των ανεμογεννητριών στο 5% ( $\eta_m = 0,95$ ) και τις ηλεκτρικές από 2% έως 5% ( $\eta_H = 0,95$  μέχρι 0,98), η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από μια γεννήτρια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\eta l} = 1/2 \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{H/m} \quad (2.5)$$

Και  $\eta_{H/m} = \eta_H \cdot \eta_m$

[42]

### Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού

Το αιολικό δυναμικό μια περιοχής, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σωστή επιλογή της θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας.

Για να είναι επιτυχημένη η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μια περιοχή, χρειάζεται:

1. Να υπάρχουν υψηλές ταχύτητες ανέμου για μεγάλο μέρος του έτους.
2. Να υπάρχει προσβασιμότητα στην περιοχή εγκατάστασης.
3. Διαθέσιμος χώρος για μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών (αιολικό πάρκο).
4. Η απόσταση από το κεντρικό δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι σχετικά μικρό.
5. Το υψόμετρο να μην είναι ιδιαίτερα μεγάλο, για να μη δημιουργούνται προβλήματα εξαιτίας των καιρικών συνθηκών.

Για την κατάλληλη θέση εγκατάστασης των ανεμογεννητριών χρειάζεται να είναι γνωστά

1. Η ταχύτητα του αέρα.
2. Η διεύθυνση του.
3. Η επικρατούσα ανατάραξη στην περιοχή εξαιτίας του ανέμου.
4. Η κατανομή του ανέμου (πως μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος).

### Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

❖ **Η μέση ταχύτητα του ανέμου.**

❖ **Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.** Υπολογίζεται από το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης στη μέση τιμή.

❖ **Μέγιστη ταχύτητα του ανέμου.** Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου επηρεάζεται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής. Επηρεάζει την αντοχή που χρειάζεται να έχει η αιολική μηχανή. Για το λόγο αυτό γίνονται μετρήσεις καθημερινά, όλο το χρόνο σε βάθος τουλάχιστον μιας δεκαετίας.

❖ **Η ριπή του ανέμου.** Ροπή του ανέμου ονομάζεται η ξαφνική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (για περίπου 20 sec). Έπειτα, ο άνεμος επανέρχεται σε αναμενόμενα επίπεδα. Η ταχύτητα στην οποία φτάνει είναι τα 9m/sec. Σε περίπτωση που οι ριπές διατηρηθούν για πάνω από 30sec, η μηχανή της ανεμογεννήτριας θέτεται εκτός λειτουργίας.

❖ **Η διεύθυνση του ανέμου.** Την καθορίζει το σημείο από το οποίο φυσάει ο άνεμος προς τη θέση που μελετάμε. Η διεύθυνση του ανέμου είναι μια παράμετρος που φαίνεται να έχει μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα, και εξαρτάται από την τοποθεσία (προσανατολισμός), το έδαφος και τη βλάστηση της περιοχής. Η κύρια διεύθυνση μπορεί να οριστεί αυτή που προσφέρει τουλάχιστον 10% στο σύνολο της διαθέσιμης αιολικής

ενέργειας. Η επικρατούσα διεύθυνση είναι αυτή που εμφανίζεται πιο συχνά στην περιοχή και μπορεί να μεταβάλλεται με τις εποχές.

Μια περιοχή μπορεί να διακριθεί σε Προσήνεμη και Υπήνεμη.

Προσήνεμη ονομάζεται η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στο σημείο που προορίζεται να εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια και το σημείο του ορίζοντα από όπου προέρχεται ο άνεμος.

Υπήνεμη λέγεται η περιοχή που είναι ελάχιστα εκτιθέμενη στον άνεμο.

❖ **Τραχύτητα του εδάφους.** Η τραχύτητα δίνει εικόνα για τον τύπο του εδάφους. Εκφράζεται από το μήκος τραχύτητας  $Z_0$  και από την κλάση (κατηγορία τραχύτητας).

Το μήκος της τραχύτητας ορίζεται για επιφάνειες που έχουν όμοια στοιχεία τραχύτητας και ο κύριος παράγοντας που το επηρεάζει είναι η πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών.

Για μια περιοχή που είναι επίπεδη, με στοιχεία τραχύτητας να αγγίζουν το 10-20%, το  $Z_0$  συνδέεται με τα στοιχεία τραχύτητας (μέσος όρος ύψους αυτών), με τον τύπο:

$$Z_0 = 0,15h$$

▪ Αν  $Z_0 \leq 0,03$  , κλάση =  $1,698823 + \ln(z_0)/\ln(150)$  (2.6)

▪ Αν  $Z_0 > 0,03$  , κλάση =  $3,912489 + \ln(z_0)/\ln(3,333333)$  (2.7)

α/α	Τύπος εδάφους	Κατηγορία τραχύτητας	Z <sub>0</sub> (m)
1	Πολύ ομαλό πηλώδες έδαφος ή πάγος	0	$1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
2	Ήρεμη ανοιχτή θάλασσα	0	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
3	Φουσκωμένη θάλασσα	0	$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$
4	Αμμώδες έδαφος	0	$6 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$
5	Επίπεδο έδαφος καλυμμένο με χιόνι	0	$3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$
6	Χέρσο έδαφος	1	$6 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$
7	Έδαφος με χλόη-Λιβάδι	1	$11 \cdot 10^{-3} - 17 \cdot 10^{-3}$
8	Επίπεδο ακαλλιέργητο έδαφος	1	$18 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3}$
9	Χωράφι με χαμηλή βλάστηση	1	$22 \cdot 10^{-3} - 30 \cdot 10^{-3}$
10	Χωράφι με υψηλά χόρτα	2	$31 \cdot 10^{-3} - 39 \cdot 10^{-3}$
11	Χωράφι με σιτάρι	2	$40 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-3}$
12	Διάφορες καλλιέργειες	2	$51 \cdot 10^{-3} - 65 \cdot 10^{-3}$
13	Έδαφος με θάμνους	2	$66 \cdot 10^{-3} - 90 \cdot 10^{-3}$
14	Δάσος με χαμηλά δέντρα	2	$100 \cdot 10^{-3} - 200 \cdot 10^{-3}$
15	Δάσος και περιοχές με κανονικά δέντρα	3	$200 \cdot 10^{-3} - 900 \cdot 10^{-3}$
16	Προάστια πόλεων με χαμηλά ή μέτρια κτίρια	3	1-2
17	Πόλεις με υψηλά κτίρια	3	2-4

Πίνακας: Στοιχεία τραχύτητας εδάφους.[42]

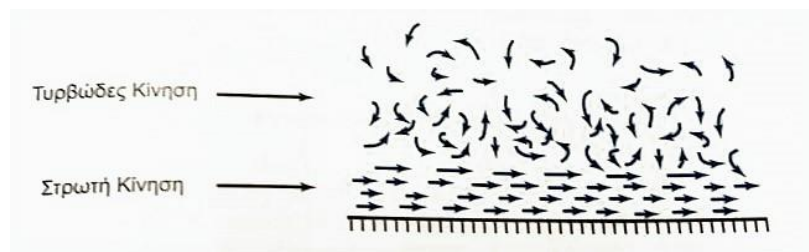
❖ **Ανατάραξη του αέρα (Τύρβη).** Αφορά την διακύμανση της ταχύτητας του αέρα σε σχέση με τη μέση τιμή. Η διακύμανση της έντασης της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση το μήκος της τραχύτητας  $Z_0$

➤ Για  $Z_0 \leq 0,20\text{m}$

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.8)$$

➤ Για  $Z_0 > 0,20\text{m}$

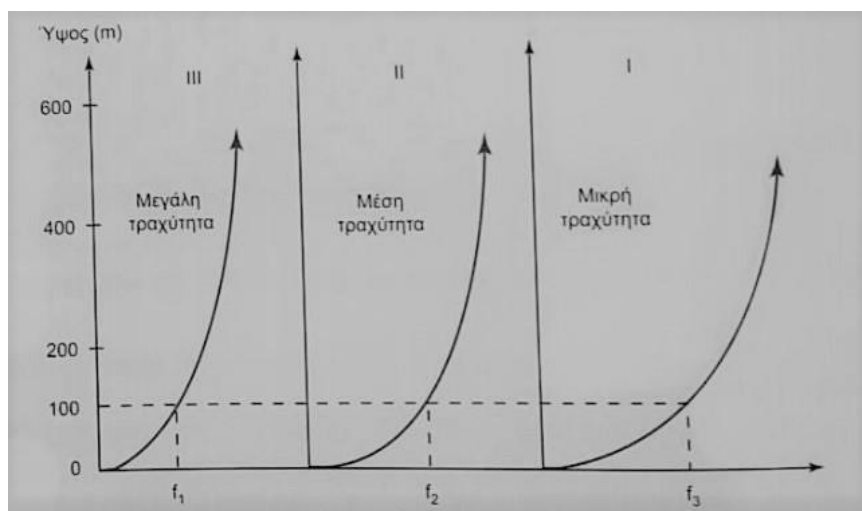
$$I = \frac{-0,14 \ln z_0 + 0,78}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.9)$$



Εικόνα 14: Οι δύο τύποι κίνησης του ανέμου κοντά στο έδαφος [42]

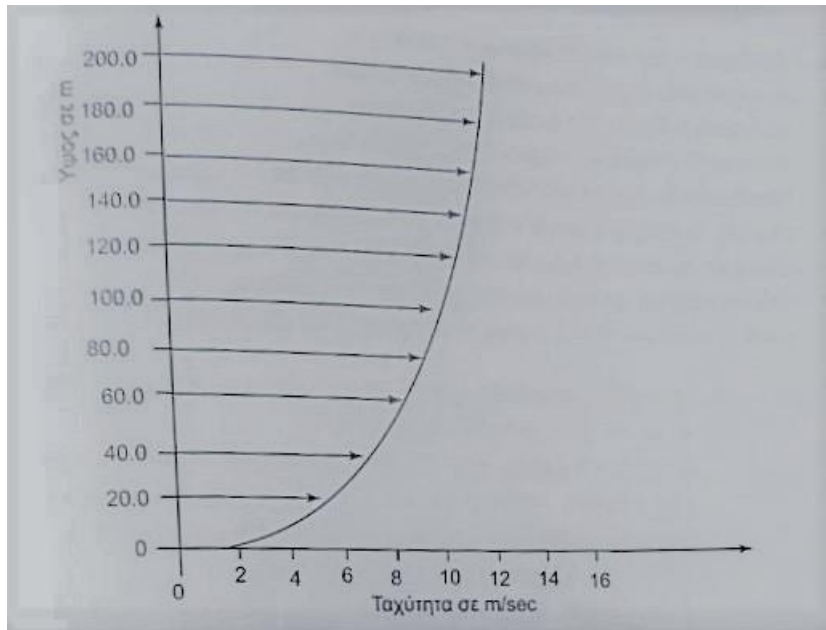
❖ **Στροβιλισμός του αέρα.** Ο στροβιλισμός ονομάζεται το σύνολο των αναταράξεων του αέρα εξαιτίας χαρακτηριστικών εμποδίων του εδάφους.

❖ **Κατανομή του ανέμου.** Η κατανομή του ανέμου εκφράζει τις διακυμάνσεις του ανέμου σε σχέση με το ύψος.



Εικόνα 15: ποσοστό μεταβολής του αέρα(%). Για ύψος  $h$ , ισχύει  $f_3 > f_2 > f_1$  [42]





Εικόνα 16: Μεταβολή του αέρα σε σχέση με το ύψος [42]

### Μέτρηση του αεροδυναμικού δυναμικού με κατανομή Weibull.

Τα ασφαλή συμπεράσματα που χρειάζονται για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μια περιοχή απαιτεί μεγάλο κόστος και μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα Weibull μπορούν να κάνουν μια ασφαλή εκτίμηση για τις περιοχές της Ελλάδας (εύκρατη ζώνη) για ύψος μέχρι και 100m από το έδαφος.

Η εξίσωση Weibull είναι:

$$P(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.10)$$

Όπου,

$P(v)$  = Η κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας

$c$  = Παράμετρος Weibull για την κατανομή ταχύτητας, σχετική με τη μέση ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

$k$  = Παράμετρος Weibull μορφής κατανομής, καθαρός αριθμός

$v=H$  ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

Για να βρεθεί η καμπύλη διάρκειας μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου, χρειάζεται να προσδιοριστεί η χρονική διάρκεια για την οποία η μετρούμενη ταχύτητα είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη σε σχέση με μια προσδιορισμένη τιμή.

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης κατανομής Weibull, ισχύει πως:

$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P_{(v)} dv = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^K} \quad (2.11)$$

Λογαριθμώντας τη σχέση 2.11 ισχύει:

$$\ln[-\ln(1 - P(V \leq V_x))] = -K \cdot \ln C + K \ln V_x \quad (2.12)$$

θέτοντας

$$y = \ln[-\ln(1 - P(V \leq V_x))] \quad (2.13)$$

και

$$x = \ln V_x \quad (2.14)$$

$$\text{οπότε } y = -K \ln C + K \cdot X \quad (2.15)$$

Από τη σχέση  $\eta_H/\eta_m = \eta_H \cdot \eta_m$  υπολογίζονται οι συντελεστές C και K με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων:

$$Y = A + BX$$

$$A = \frac{(\Sigma y) \cdot (\Sigma x^2) - (\Sigma x) \cdot (\Sigma x \cdot y)}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (2.16)$$

$$B = \frac{n \cdot (\Sigma x \cdot y) - (\Sigma x) \cdot (\Sigma y)}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (2.17)$$

Όπου n εκφράζει τον αριθμό των ζευγών σημείων (x,y)

Με τον υπολογισμό A και B, ισχύει πως:

$$C = e^{\frac{A}{B}} \quad (2.18)$$

Και  $K=B$  (2.19)

Η παράμετρος C σχετίζεται με τη μέση ταχύτητα μέσω του τύπου:

$$\bar{V} = C \cdot \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (2.20)$$

Όπου ισχύει η συνάρτηση Γ που υπολογίζεται από:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (2.21)$$

Όσον αφορά τη διασπορά της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma^2 = C^2 \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)\right)^2 \right] \quad (2.22)$$

Άρα  $\eta = 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,85 \cdot 0,95 = 0,712$

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε βάθος ενός έτους είναι:

$$E_{50} = P_{\mu 50} \cdot 8760 \cdot \eta = 77,677 \cdot 8760 \cdot 0,712 \Rightarrow$$

$$E_{50} = 484480 \text{KWh.}$$

Με λειτουργία σε ένα έτος με την ονομαστική ισχύ  $N_{ov} = 250 \text{KW}$ , θα είχε συνολική παραγωγή:

$$E_o = N_{ov} \cdot t \quad (2.23)$$

$$E_o = 250 \cdot 8760 = 2190000 \text{KWh.}$$

Ο ετήσιος συντελεστής φορτίου της εγκατάστασης υπολογίζεται ως:

$$C_{\Phi} = E_{50}/E_o \quad (2.24)$$

$$\text{Και } C_{\Phi}=484480/2190000 \Rightarrow C_{\Phi}= 0,22122$$

[42]

### Υπολογισμός της ονομαστική ισχύος της ανεμογεννήτριας

Η ονομαστική ισχύς  $P_{nom}$  της ανεμογεννήτριας, καθορίζεται από τον τύπο:

$$P_n = 1/2 \rho_a \cdot A \cdot C_p \cdot V_n^3 \cdot \eta_m$$

Εκ των οποίων,

$\rho_a$  = Πυκνότητα αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$

$C_p$  = Συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας (καθαρός αριθμός).

$V_n$  = Ονομαστική ταχύτητα του ανέμου

$\eta_m$  = Μηχανικός βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Εξαρτάται από τις απώλειες του κενού φορτίου, που είναι μέρος του 10% περίπου της ονομαστικής ισχύος ( $P_{K\Phi}=10\%$ )

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + P_{K\Phi}} \quad (2.25)$$

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + 0,1P_n} = 0,90$$

$P_n$  = ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε Watt.

$$A = \frac{2P_n}{\rho_a \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot (1,8V_{\mu})^3} \quad (2.26)$$

Και

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη:

$$C_p=0,385 \quad , \quad \rho_a=1,25 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{και} \quad \eta_m = 0,9$$

[42]

### **Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί**

Η ταχύτητα με την οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί ( $V_m$ ) επηρεάζεται από τις απώλειες του κενού φορτίου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{K\Phi} = \frac{1}{2} \rho_a \cdot C_p \cdot A \cdot V_{mi}^3 \quad (2.27)$$

$$\text{Άρα } V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{K\Phi}}{1/2 \rho_a \cdot C_p \cdot A}}$$

Και εφόσον ισχύει  $P_{K\Phi} = 0,1 P_n$ ,

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{0,2 P_n}{\rho_a \cdot C_p \cdot A}} \quad (2.28)$$

Εκ των οποίων

$\rho_a$ = Η πυκνότητα του αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$  (γενικώς θεωρείται  $\rho_a=1,25 \text{ Kg/m}^3$ )

$C_p$ = Ο συντελεστής ισχύος (συνήθως θεωρείται  $C_p=0,385$ )

$A$ = Η επιφάνεια σάρωσης της φτερωτής ανεμογεννήτριας σε  $\text{m}^2$

$P_n$ = Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε Watt

$V_{mi}$ = Η ταχύτητα έναρξης μετρούμενη σε m/sec

[42]

## Αιολικά συστήματα ανεμογεννητριών μικρής ισχύος

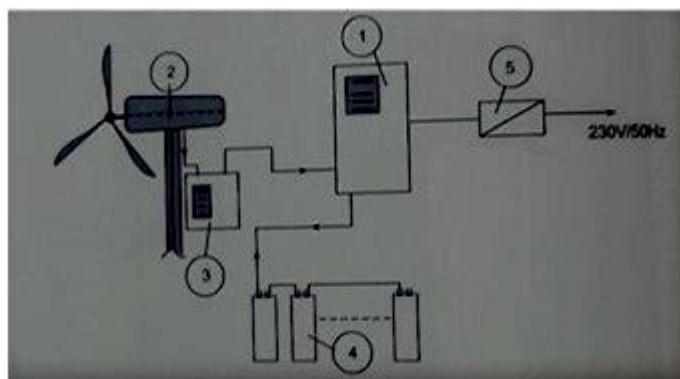
Όπως και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, έτσι και τα αιολικά πρακτικά μπορούν να λειτουργήσουν ως:

- A. Αυτόνομα αιολικά συστήματα
- B. Διασυνδεδεμένα σε κάποιο δίκτυο χαμηλής τάσης.

### Αυτόνομα αιολικά συστήματα

Οι περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αυτόνομα αιολικά συστήματα είναι σε απομονωμένες κατοικίες, τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, αγροικίες, αναμεταδότες, τροχόσπιτα κλπ.

Είναι αναγκαίο να συνδεθούν με συσσωρευτή (ή συστοιχία συσσωρευτών), για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και επιβάλλεται να συνδέονται μέσω συγκεκριμένων συσσωρευτών COMPACT για κατανάλωση.

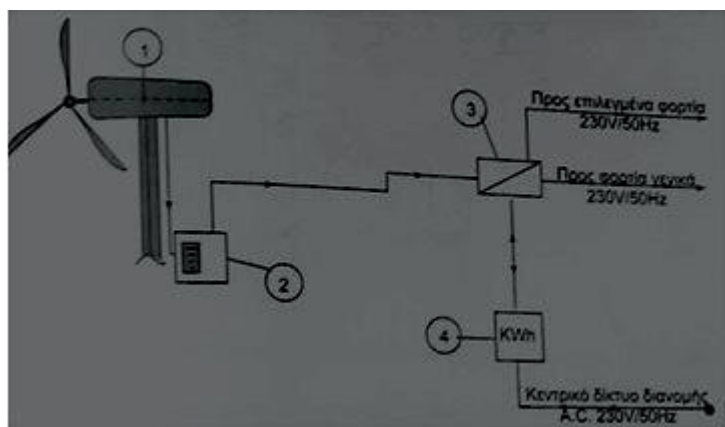


Εικόνα 17: Αυτόνομο αιολικό σύστημα [42]

1. Μετατροπέας COMPACT (απαιτείται ενσωματωμένος φορτιστής και ρυθμιστής φόρτισης)
2. Ανεμογεννήτρια με μικρή ισχύ.
3. Πίνακας στον οποίο αναγράφεται πλήρως η λειτουργία της ανεμογεννήτριας
4. Οι συσσωρευτές αποθήκευσης
5. Ο πίνακας της τροφοδοσία (230V/50Hz)

## Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα

Τα αιολικά συστήματα συνδέονται με δίκτυο χαμηλής τάσης. Μέσω ειδικού πίνακα ελέγχου και λειτουργίας και μέσω διπλού ψηφιακού μετρητή έχουν τη δυνατότητα να στείλουν την ενέργεια που περισσεύει (ή εξολοκλήρου) στο δίκτυο χαμηλής τάσης.



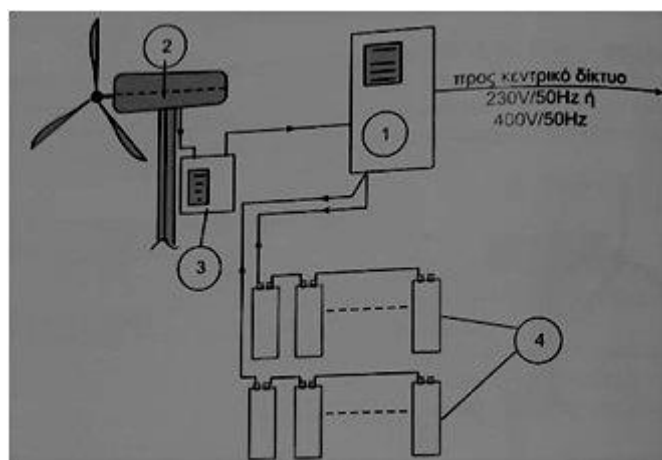
Εικόνα 18: Διασυνδεδεμένο αιολικό σύστημα [42]

1. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος
2. Ο πίνακας ελέγχου και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.
3. Πίνακας λειτουργίας και ελέγχου με δυνατότητα να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικό δίκτυο διανομής, σε περίπτωση που υπάρχει τυχόν διακοπή ρεύματος.
4. Ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας διπλής εγγραφής.

## Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα που παρέχουν δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας ειδικός πολυμορφικός σταθμός στον οποίο συνδέονται οι συσσωρευτές αποθήκευσης συντελεί στη σύνδεση της ανεμογεννήτρια με το βασικό δίκτυο διανομής. Το συγκεκριμένο σύστημα κάνει το αιολικό σύστημα άμεσα διαθέσιμο, έχοντας την επιλογή να μεταφέρει ισχύ το διάστημα που η ανεμογεννήτρια βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή έχει πολύ υψηλή ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά όμως υπάρχει

σημαντικό κόστος εξαιτίας των συσσωρευτών αποθήκευσης και της πολυμορφικής μονάδας.



Εικόνα 19: Αιολικό σύστημα με συσσωρευτές αποθήκευσης [42]

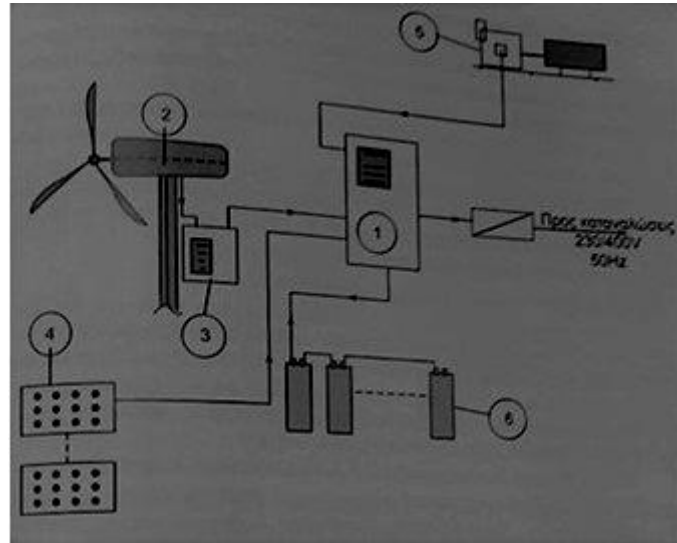
1. Πολυμορφικός σταθμός ελέγχου και μετατροπής της ισχύος.
2. Ανεμογεννήτρια ισχύος 230V/50Hz ή 400V/50Hz.
3. Ο πίνακας ελέγχου και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.
4. Το πλήθος (συστοιχία) των συσσωρευτών αποθήκευσης.

### Υβριδικά συστήματα με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Ο συνδυασμός ανεμογεννήτριας, φωτοβολταϊκών συλλεκτών και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/z) μπορεί να εξυπηρετήσει περιπτώσεις που χρειάζεται εγκατάσταση με αδιάλειπτη λειτουργία εβρισκόμενη μακριά από κάποιο δίκτυο διανομής.

Σε αυτό τον τύπο υβριδικού συστήματος, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις επι μέρους μονάδες, χρειάζεται να ελέγχεται από μία κεντρική μονάδα (πολυμορφικός σταθμός μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας). Η μονάδα ενεργοποιεί μέσω εντολής την νηζελογεννήτρια, όταν η ενέργεια που παράγεται από τις άλλες μονάδες είναι ανεπαρκής.





Εικόνα 20: Υβριδικό σύστημα με Α/Γ μικρής ισχύος.[42]

1. Πολυμορφικός σταθμός αδιάλειπτης λειτουργίας, σταθμός μετατροπής ισχύος.
2. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
3. Ο πίνακας ελέγχου και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.
4. Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες.
5. Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/z).
6. Συστοιχία συσσωρευτών αποθήκευσης.
7. Ο πίνακας της τροφοδοσίας καταναλώσεων (μονοφασικός είτε τριφασικός). [42]

## 2.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος

Η επόμενη μεθοδολογία αφορά υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από φωτοβολταϊκή συστοιχία και ανεμογεννήτρια. Μία από τις βασικότερες ανάγκες που χρειάζεται να ικανοποιεί το σύστημα είναι να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές, και να υπάρχει η δυνατότητα αυτονομίας ορισμένων ημερών συνδυαζόμενη με την παρουσία ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Σκοπός της παραγράφου είναι η ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, του συσσωρευτή, της ανεμογεννήτριας και του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών για τη διάρκεια ενός έτους, με δεδομένο τα ηλιακά και ανεμολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης.

Η παρακάτω ανάλυση του συστήματος γίνεται με δύο τρόπος που διαχωρίζονται από την συμβολή της ενεργειακής πηγής.

1. Σύστημα χωρίς κάποια βοηθητική πηγή ενέργειας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε συσσωρευτές, με την αυτονομία αυτών να φτάνει συγκεκριμένο αριθμό ημερών.
2. Σύστημα φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ανεμογεννήτριας, με τη συμμετοχή άλλης πηγής ενέργειας.

### Συμβολισμοί χρήσιμων μεγεθών

$P_P$  = Ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$P_R$  = Ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας

$\bar{E}_L$  = Μέση τιμή της κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα κατά τη διάρκεια ενός μήνα.

$\bar{P}_L$  = Μέση τιμή κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος (W)

$\bar{P}_{\Phi B}$  = Μέση τιμή ισχύος προερχόμενη από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία (W)

$\bar{P}_{A\Gamma}$  = Μέση τιμή ηλεκτρικής ισχύος προερχόμενη από την ανεμογεννήτρια (W)

$T = 24h$ , είτε  $N_d \cdot 24h$  (μηνιαία δεδομένα), είτε 8760h (δεδομένα έτους)

$CF_{\Phi B}$  = Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$CF_{A\Gamma}$  = Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος της ανεμογεννήτριας

$c_{\Phi B}$  = Το κόστος ενός W ονομαστικής ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$c_{AG}$  = Το κόστος ενός W ονομαστικής ισχύος ανεμογεννήτριας

$\overline{P_{\text{ΑΠΕ}}}$  = Η μέση τιμή (ενός μήνα) ηλεκτρικής ισχύος από το Α.Π.Ε. σύστημα

$\overline{P_{\text{ΥΣ}}}$  = Η μέση τιμή (ενός μήνα) ηλεκτρικής ισχύος από την έξοδο του φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος

[43]

### Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου κατά περιοχή

Τα ηλιακά και ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής εγκατάστασης, που χρειάζονται για τους παρακάτω υπολογισμούς είναι

1. Η μέση ενεργειακή απολαβή μέσω της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε διάστημα ενός μήνα  $\overline{H_t}$  (Insolation). Ισοδύναμο μέγεθος θεωρείται η πυκνότητα της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $\overline{G_t}$ .

$$[ \overline{G_t} = \overline{H_t} / T ]$$

2. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα  $\overline{\theta_{\alpha,D}}$ .
3. Οι πιθανότητες με κατανομή για την εμφάνιση ανέμου συγκεκριμένης ταχύτητας  $u$  μέσα στη διάρκεια ενός μήνα στην περιοχή. Εναλλακτικά αρκούν οι συντελεστές  $k, c$  της κατανομής Weibull.

### Αυτονομία του συστήματος

Οι ανάγκες εξαιτίας των οποίων δημιουργούν απαιτήσεις από το σύστημα επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τις ονομαστικές τιμές ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας  $P_P$  και της ανεμογεννήτριας  $P_R$ . Διάφορες μεθοδολογίες υπάρχουν για τον τρόπο σύνθεσης του συστήματος, με έμφαση να δίνεται στον παράγοντα κόστος, αυτονομία, και κάλυψη των μηνιαίων αναγκών, κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Η διαθεσιμότητα,  $A$  (availability), ενός συστήματος εκφράζει το ποσοστό καλυπτόμενων ενεργειακών αναγκών από την παραγόμενη ενέργεια. Ο τύπος υπολογισμού αυτής εξαρτάται από την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, και τις ώρες λειτουργίας της εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα:

$$A = 1 - \frac{t_{LoL}}{t_{tot}} \quad (2.29)$$

Εκ των οποίων  $t_{LoL}$ , το σύνολο των ωρών μέσα στο έτος που το σύστημα δεν κάλυψε τις ενεργειακή ζήτηση (Loss-ofLoad) και  $t_{tot}$ , ο χρόνος λειτουργίας της εφαρμογής κατά τη διάρκεια ενός έτους ( $t_{tot} = 8760h$ ). Οι λόγοι για τους οποίους θα μπορούσε να μειωθεί η διαθεσιμότητα πιθανόν να είναι συννεφιασμένες μέρες, οι βλάβες στο σύστημα, οι μέρες αφιερωμένες στη συντήρηση του, η άπνοια. Οι περιπτώσεις κρίσιμων καλύψεων φορτίων αναγκαία είναι μια διαθεσιμότητα της τάξης τουλάχιστον του 99%, ενώ σε μη κρίσιμα φορτία το 95% είναι μια ανεκτή τιμή. Οι στρατιωτικές εφαρμογές απαιτούν απόλυτη αυτονομία (100%). Σε πρακτικό παράδειγμα, η διαθεσιμότητα του 95% συνεπάγεται με 438 ώρες που το σύστημα δεν κάλυψε την ενέργεια που ζητήθηκε.

Ο όρος *αυτονομία* (Autonomy) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την δεδομένη διαθεσιμότητα του υβριδικού συστήματος, όπου σε αυτό συμβάλλει και κάποιος προβλεπόμενος συσσωρευτής. Αυτή η ενέργεια που έχει τη δυνατότητα να παρέχει ο συσσωρευτής εξαρτάται από το μέγεθος χωρητικότητα του συσσωρευτή (Αυτονομία αποθηκευμένης ενέργειας ή αυτονομία του συσσωρευτή), που υπολογίζεται σε μέρες (ή ώρες). Σε περίπτωση που για παράδειγμα μιλάμε για αυτονομία πέντε ημερών, συνεπάγεται πως εφόσον το σύστημα φωτοβολταϊκό-ανεμογεννήτρια αδυνατεί να καλύψει ενεργειακές ανάγκες για πέντε ημέρες η ενέργεια μπορεί να προσφερθεί μέσω του συσσωρευτή.

### Ηλεκτρική ενέργεια μέσω του συστήματος Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας

Ο παρακάτω τύπος εκφράζει την παραγόμενη ενέργεια ισχύος προερχόμενη από το σύστημα φωτοβολταϊκού-ανεμογεννήτριας  $\overline{P_{ΑΠΕ}}$ ,

$$\overline{P_{ΑΠΕ}} = CF_{ΦΒ} \cdot P_P + CF_{ΑΓ} \cdot P_R \quad (2.30)$$

Σε μία πρώτη προσέγγιση του υπολογισμού συστήματος φωτοβολταϊκού-ανεμογεννήτριας, σημαντική είναι η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας αντίστοιχα, με βάση τις ηλιακές και ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Ο συντελεστής περιθωρίου  $m$ , θεωρείται ενσωματωμένος στο  $\overline{P_L}$ . Για την απλότητα των υπολογισμών θέτεται

$$\eta_{μετ,ΦΒ} = \eta_{μετ,ΑΓ} = \eta_{μετ}$$

Η ημερήσια ισχύς  $\overline{P_{ΑΠΕ}}$  χρειάζεται να καλύπτει σε κάθε περίπτωση την ισχύ που καταναλώνεται ημερησίως ( $\overline{P_L}$ ), λαμβανομένων υπόψη των απωλειών της μεταφοράς ( $\eta_{μετ}$  = συντελεστής μεταφοράς), οπότε

$$\overline{P_{ΑΠΕ}} \geq \frac{\overline{P_L}}{\eta_{μετ}} \quad (2.31)$$

### Υπολογισμός των συντελεστών $CF_{ΦΒ}$ και $CF_{ΑΓ}$ στατιστικά βάσει ηλιακών-ανεμολογικών δεδομένων της περιοχής

Για των υπολογισμό των συντελεστών  $CF_{ΦΒ}$  και  $CF_{ΑΓ}$  είναι απαραίτητη η γνώση των αρχικών δεδομένων, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα χαρακτηριστικά του τόπου εγκατάστασης, που συμβάλλουν στην κλίση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και στο ύψος της ανεμογεννήτριας.

### Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Ο συντελεστής υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$CF_{ΦΒ} = \frac{\overline{P_{ΦΒ}}}{P_p} = PR_{\sigma} \cdot \frac{\overline{H_t}}{G_{STC} \cdot T} = PR_{\sigma} \cdot \frac{\overline{G_t}}{G_{STC}} \quad (2.32)$$

Αρχικά, η τιμή του λόγου επίδοσης  $PR_{\sigma}$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$PR_{\sigma} = PR_{opt} \cdot PR_T \cdot PR_{NIT} \cdot \eta_{αα}$$

Εκ των οποίων ο λόγος επίδοσης οπτικών απωλειών,

$$PR_{opt} = PR_R \cdot PR_S \cdot PR_{LI} \cdot PR_p$$

Ο λόγος της επίδοσης των θερμικών απωλειών,

$$PR_T = 1 + \gamma_{mp} \cdot (\theta_{c,wa} - \theta_{STC})$$

Ο λόγος επίδοσης απόκλισης από το ΣΜΙ

$$PR_{NIT}$$

Και ο συντελεστής άλλων απωλειών  $\eta_{αα} = \eta_{ανομ} \cdot \eta_D \cdot \eta_{w,\sigma}$

Για μια τυπική εκτίμηση, μπορούν να θεωρηθούν τυπικές τιμές  $PR_{\text{opt}}=0,90$  ,  $PR_{\text{NIT}}=1$  και  $\eta_{\text{α}}=0,95$  οπότε το γινόμενο τους παίρνει την υποθετική και πιθανή τιμή

$$PR_{\text{opt}} \cdot PR_{\text{NIT}} \cdot \eta_{\text{α}} \approx 0,86$$

Μήνες	Ηλιακά δεδομένα - ΦΒ συστοιχία			Ανεμολογικά δεδομένα - Χαρακτηριστική ανεμογεννήτριας				Καταπόληση (W)
	$H_t$ (kWh/m <sup>2</sup> d)	$PR_{\sigma}$	$CF_{\Phi B}$	k	c (m/s)	$P_{AG}/P_R$	$CF_{AG}$	
Ιανουάριος	3,96	0,803	0,132	1,6	6,5	Δεδομένα χαρακτηριστικής ανεμογεννήτριας, σχήμα 6.11.	0,335	333,3
Φεβρουάριος	4,41	0,799	0,147	1,6	5,8		0,280	333,3
Μάρτιος	5,06	0,790	0,167	2,1	5,1		0,199	333,3
Απρίλιος	5,93	0,775	0,191	1,9	4,5		0,155	416,7
Μάιος	6,76	0,763	0,215	1,7	4,0		0,125	416,7
Ιούνιος	6,58	0,762	0,209	1,5	3,8		0,123	500,0
Ιουλίου	6,70	0,757	0,211	1,6	4,5		0,172	500,0
Αύγουστος	6,68	0,770	0,214	1,7	4,2		0,141	416,7
Σεπτέμβριος	6,21	0,789	0,204	2,0	5,1		0,203	416,7
Οκτώβριος	4,90	0,798	0,163	1,8	4,8		0,186	333,3
Νοέμβριος	3,84	0,804	0,129	1,7	5,9		0,285	333,3
Δεκέμβριος	3,10	0,809	0,104	1,9	6,3		0,314	333,3

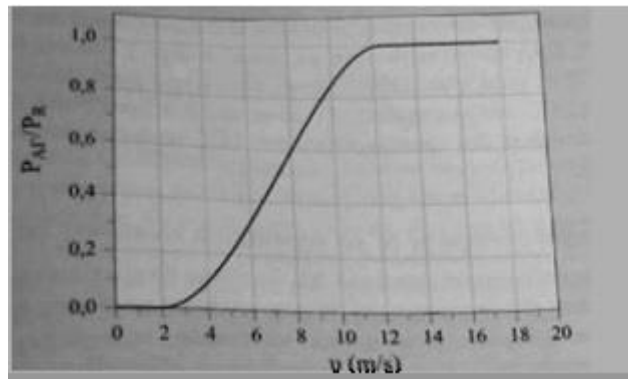
Εικόνα 21: Συντελεστές χρησιμοποίησης ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ανεμογεννήτριας [43]

Συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Ο τύπος βάσει του οποίου υπολογίζεται ο συγκεκριμένος συντελεστής είναι:

$$CF_{AG} = \int_0^{\infty} \frac{P_{AG}}{P_R} \cdot f(u) du$$

Έτσι μπορεί να γίνει και ο υπολογισμός των ταχυτήτων σε μηνιαία βάση και στη συνέχεια και των τιμών της ανηγμένης ισχύος ( $P_{AG}/P_R$ ) της ανεμογεννήτριας στην συγκεκριμένη περιοχή.



Εικόνα 22: Συνήθης καμπύλη ανεμογεννήτριας

### Βασικές μεθοδολογίες υπολογισμού ενός φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος

Οι δύο περιπτώσεις φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος είναι:

- Σύστημα φωτοβολταϊκού-ανεμογεννήτριας που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια
- Σύστημα φωτοβολταϊκού-ανεμογεννήτριας με συσσωρευτή και συμβατική ενεργειακή πηγή (H/Z).

Οι στόχοι του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σε οποιαδήποτε περίπτωση:

1. Η αποσαφήνιση των τιμών της ονομαστικής ισχύος του κάθε μέρους του γενικού συστήματος
2. Το οικονομικό κόστος του συστήματος, δηλαδή πόσο κοστίζει ένας κύκλος ζωής (LCC) με τα υποσυστήματα και εν τέλει ο ακριβής υπολογισμός κόστους ενέργειας.

[43]

## 2.5 Συνδυασμός νερού και αέρα σε υβριδικό σύστημα

Τα υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά που έχουν ως βάση το νερό και αυτά που έχουν ως βάση τον αέρα έχουν σχεδιαστεί για να βοηθούν την παραγωγικότητα σε διαφορετικές περιπτώσεις.

Τα συστήματα που στηρίζονται στο νερό μπορούν να λειτουργήσουν ωφέλιμα κυρίως σε περιοχές με μικρό είτε μεσαίο γεωγραφικό πλάτος (δηλαδή σχετικά κοντά στον Ισημερινό). Αυτό συμβαίνει διότι αποφεύγεται το πιθανό πρόβλημα για παράδειγμα του παγώματος του νερού που θα δρούσε ανασταλτικά. Από την άλλη πλευρά τα υβριδικά συστήματα των οποίων η λειτουργία βασίζεται στον αέρα, έχουν σχεδιαστεί κυρίως για περιοχές με μεσαίο είτε υψηλό γεωγραφικό πλάτος. Τα συγκεκριμένα συστήματα συστήνονται για περιοχές μακρύτερα από τον Ισημερινό, αφού χρησιμοποιώντας μάζες αέρα με αρκετά υψηλή θερμοκρασία δεν θα μπορούσαν να προσφέρουν αποδοτικό αποτέλεσμα.

Σύμφωνα με την πηγή [36], ένας συνδυασμός μεταξύ της χρησιμοποίησης νερού και αέρα μπορεί να επιφέρει μια διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα. Οπότε, στην περίπτωση που η θερμοκρασία είναι υψηλή, η ροή νερού με θερμοκρασία που δεν ξεπερνά τους 20°C μπορεί να αποδώσει. Αν η θερμοκρασία πάρει χαμηλότερες τιμές, η ροή αέρα είναι πιο χρήσιμη λύση.

Οι σωλήνες μεταφοράς νερού αλλά και οι αεραγωγοί είναι καλύτερα να τοποθετούνται στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού. Αν οι σωλήνες και οι αεραγωγοί έρχονται σε επαφή, μπορεί να επιδράσει θετικά, υπό την συνθήκη πως το νερό θα βρίσκεται συνεχώς σε θερμοκρασία μικρότερη των 20°C, όπου θα επηρεάζει και την θερμοκρασία του αέρα που διαπερνά τους αεραγωγούς.

## 2.6 Σύγκριση αποδοτικότητας συμβατικών με τα υβριδικά συστήματα

Κατά την περίπτωση που είναι επιθυμητή η μετάδοση θερμότητας, αυτό μπορεί να γίνει εφικτό μέσω συσκευών που ονομάζονται εναλλάκτες θερμότητας (heat exchangers).[37] Αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί με τη μετάδοση της θερμότητας μέσω ρευστού και να ωφελήσει στη λειτουργία συστημάτων θέρμανσης/ψύξης, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, κ.α. Στα συμβατικά φωτοβολταϊκά η θερμότητα που απορροφάται από τις κυψέλες και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια



είναι πολύ μικρό σε σχέση με τη συνολική ενέργεια που μεταφέρει η ηλιακή ακτινοβολία. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις κυψέλες κατά τη θερινή περίοδο μειώνουν την αποδοτικότητα, ενώ με την πάροδο του χρόνου φθείρουν και την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών.

Σύμφωνα με την πηγή [38], τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κατά γενική ομολογία είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούν το 13,5% της συνολικής ενέργειας που μεταδίδεται. Το υπόλοιπο ποσοστό μένει ανεκμετάλλευτο και διαχέεται στο περιβάλλον. Μέσω του εναλλάκτη θερμότητας που δύναται να εγκατασταθεί στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού, είναι εφικτό να εκμεταλλευτεί η εισερχόμενη ενέργεια και να μεταδοθεί προς διάφορες κατευθύνσεις. Ο βαθμός της απόδοσης όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με το σύνολο είναι 13,5%, και ο βαθμός που αφορά την θερμική ενέργεια είναι 35,5 %. Η πρόσθεση των δύο προηγούμενων, αποφέρει 49% αποδοτικότητα και δίνει σημαντικό πλεονέκτημα στα θερμικά υβριδικά φωτοβολταϊκά. Από την άλλη τα υβριδικά συστήματα που περιγράφονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως σε εγκαταστάσεις που η μετάδοση θερμότητας μέσω ρευστού είναι επιθυμητή.

# Κεφάλαιο 3

## Εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος (maximum power point)

### 3.1 Σκοπός

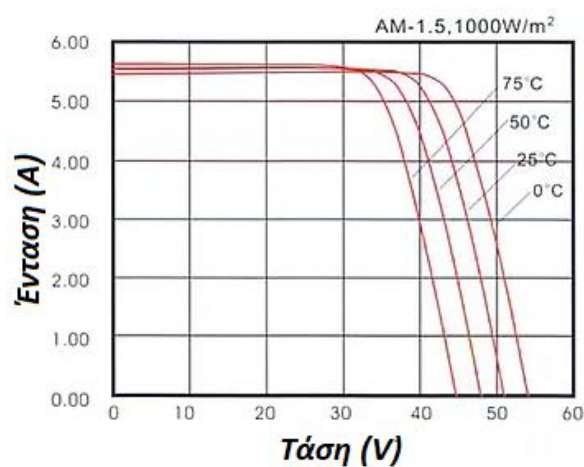
Η Ελλάδα αποτελεί μία χώρα που η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου. Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν μια πολύ σημαντική ανανεώσιμη ενέργεια στην σημερινή εποχή. Πραγματοποιώντας την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, ο κύριος σκοπός είναι η εκμάθηση του αντικειμένου των φωτοβολταϊκών σε βάθος. Τα υλικά κατασκευής τους και οι λεπτομέρειες λειτουργίας τους αποτελούν χρήσιμες πληροφορίες για να γνωρίσει όποιος ενδιαφέρεται για το συγκεκριμένο θέμα. Έπειτα θα πραγματοποιηθεί μελέτη κάποιων συγκεκριμένων εφαρμογών που σχετίζονται με την καλύτερη αποδοτικότητα, παράλληλα με την μείωση του κόστους είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη συλλογή των πληροφοριών.

## Μεθοδολογία έρευνας

### 3.2 Εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος

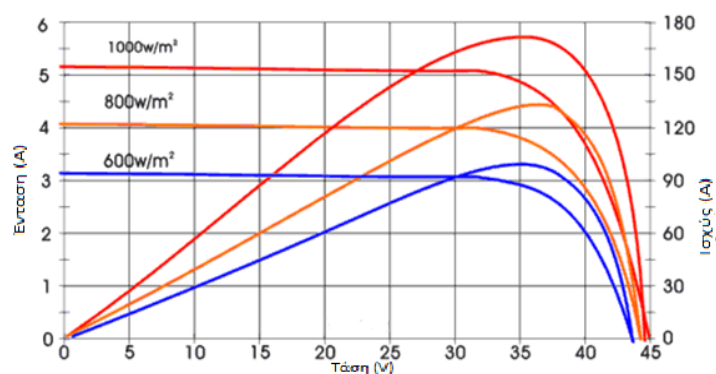
Ο σκοπός των φωτοβολταϊκών είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω ηλεκτρικών κυκλωμάτων και η έξοδος είναι ρεύμα τύπου DC, που χρησιμοποιείται είτε αυτούσιο, είτε μετά από επεξεργασία του μέσω μετατροπέων τάσης. Η εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point) είναι μια αρκετά σημαντική διαδικασία για την καλή αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού. Το συγκεκριμένο σημείο συμπεραίνεται και υπολογίζεται μέσω της γραφικής παράστασης που παρουσιάζει το φωτοβολταϊκό λόγω των τιμών ρεύματος και τάσης.

Η γραφική παράσταση όμως όπως είναι λογικό δεν παραμένει σταθερή, αφού στα ίδια επίπεδα δεν μένει ούτε η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.



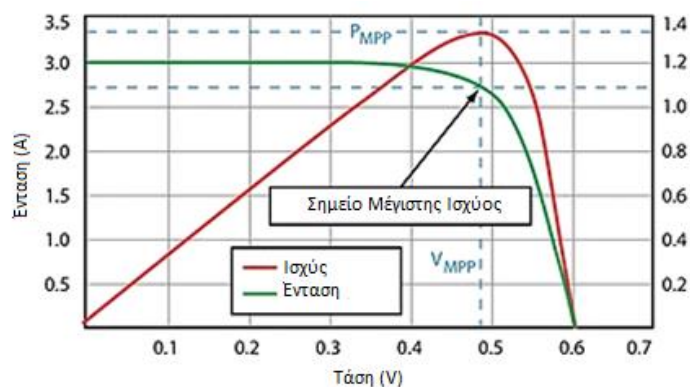
Εικόνα 23: Γραφική παράσταση έντασης-τάσης για διάφορες θερμοκρασίες

Πηγή: <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>



Εικόνα 24: Γραφική ισχύος-τάσεως για διάφορες τιμές θερμοκρασίας Πηγή: <https://electronics.stackexchange.com/questions/152931/how-to-autoregulate-a-tp4056-for-maximum-solar-power-extraction>

Ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης όπου έχει γίνει εντοπισμός του μέγιστου σημείου ισχύος είναι το παρακάτω, όπου φαίνονται οι τιμές έντασης-τάσης και οι τιμές της ισχύος



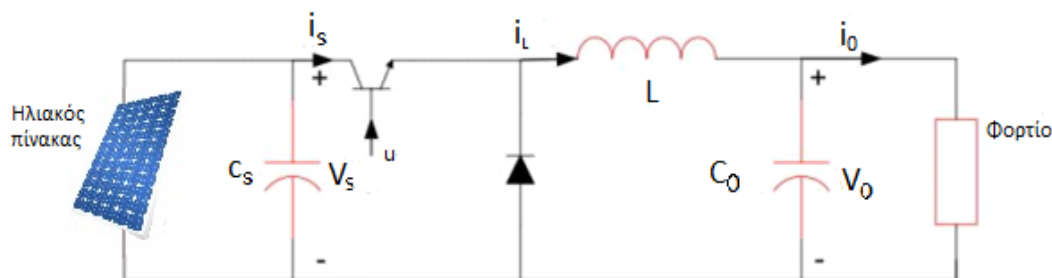
Εικόνα 25: Γραφική παράσταση με σημειωμένο το μέγιστο σημείο ισχύος

Πηγή: <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>

### 3.3 Γενικές παρατηρήσεις για τα κυκλώματα μετατροπών

Η εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος είναι μια δύσκολη διαδικασία που μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων, και να εκτελεστεί μέσω αλγορίθμων οι οποίοι έχουν κυρίως σκοπό τη συνεχόμενη μέγιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στην παρούσα πτυχιακή θα γίνει αναφορά στους μετατροπείς ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσης αλλά και στους μικτούς μετατροπείς. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα κυκλώματα μετατροπών τάσης από σταθερό ρεύμα σε επίσης σταθερό ρεύμα το οποίο και θα είναι χρήσιμο για εφαρμογές με συγκεκριμένου τύπου απαιτήσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται κύκλωμα για εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αποτελούμενο από ηλιακό πίνακα που έχει το ρόλο της πηγής τάσης, ένα μετατροπέα υποβιβαστή τάσης με βοηθητικά φίλτρα και στην έξοδο το φορτίο που υπόκειται στις διαταραχές.



Εικόνα 26: Κύκλωμα μετατροπέα τάσης

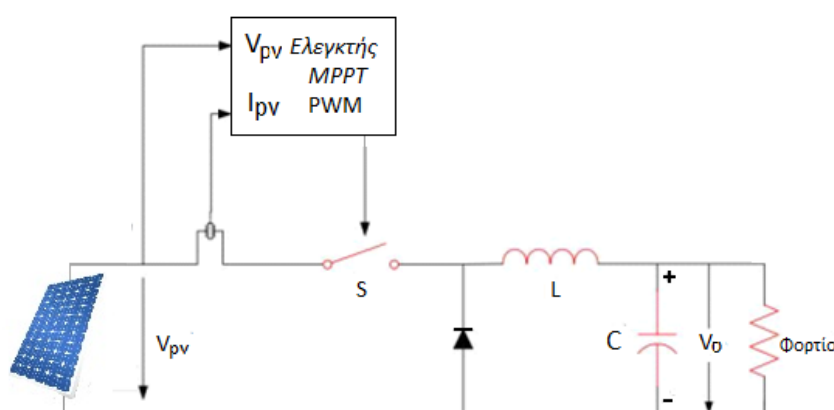
Το προηγούμενο σχήμα αποτελεί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατροπής τάσης, όπου η πηγή είναι ο ηλιακός πίνακας SA, ενώ μέσω του πυκνωτή  $C_s$  που έχει το ρόλο του φίλτρου καταφέρνει τελικά το κύκλωμα να αποδίδει ισχύ μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Οι καιρικές συνθήκες μεταβάλλονται κάτι που επηρεάζει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού. Η ρύθμιση της διάρκειας αγωγής χρειάζεται να ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε να εκμευεται η μέγιστη δυνατή ισχύς. Οι στόχοι του συστήματος εύρεσης μέγιστου σημείου ισχύος είναι:

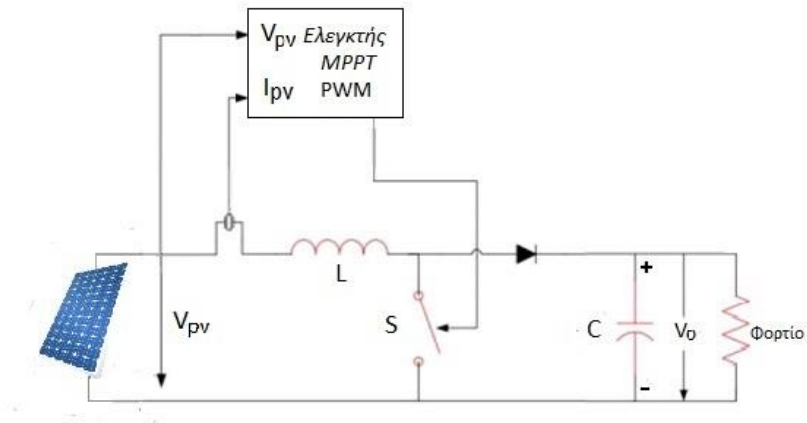
1. Η ακριβής εύρεση του σημείου MPP σε κάθε καιρική συνθήκη ή μεταβαλλόμενο φορτίο
2. Το σύστημα να παρουσιάζει ευστάθεια

### 3.4 Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Απόδοσης με μετατροπείς DC σε DC

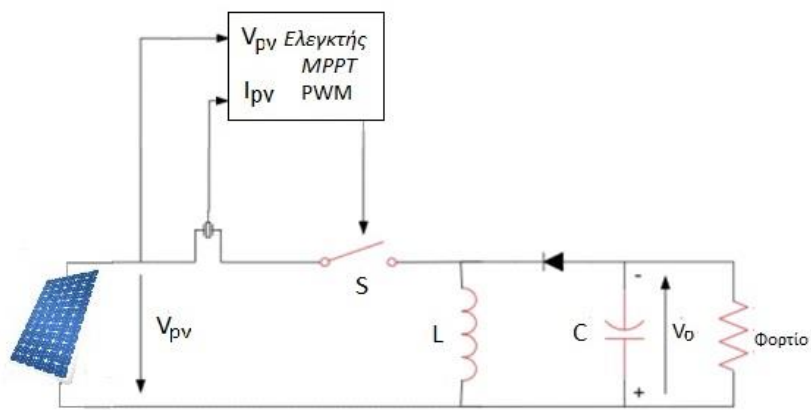
Τα κυκλώματα των μετατροπέων DC-DC είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε διατάξεις φωτοβολταϊκών. Οι τρεις πιο συνηθισμένοι τύποι που συναντώνται είναι οι μετατροπείς υποβιβασμού τάσης, μετατροπείς ανύψωσης τάσης αλλά και ο μικτός μετατροπέας. Στη συνέχεια παραθέτονται τα ενδεικτικά κυκλώματα των τριών περιπτώσεων που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 27: Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού



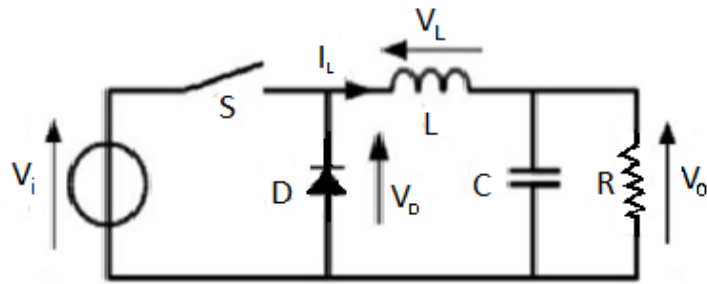
Εικόνα 28: Κύκλωμα μετατροπέα ανόψωσης



Εικόνα 29: Κύκλωμα μικτού μετατροπέα

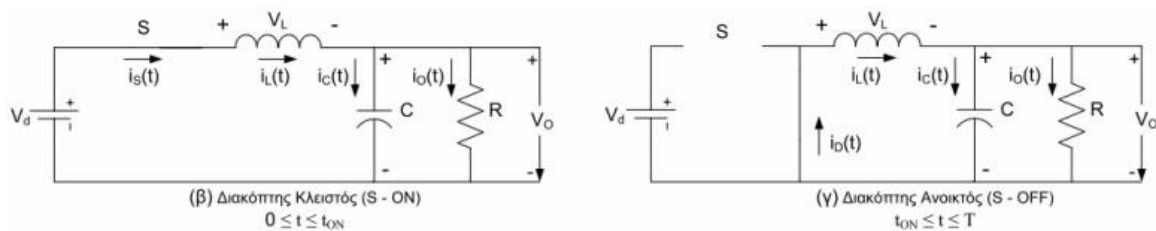
### 3.5 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Η τάση που επικρατεί στην έξοδο του μετατροπέα είναι κατά βάση μικρότερη από την τάση εισόδου.



Εικόνα 30: Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Το ρεύμα  $I_L$  κινείται με φορά από την πηγή εισόδου προς το φορτίο, κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός. Το ρεύμα εξόδου αντιθέτως είναι συνεχές όταν ο διακόπτης ανοίγει και η τιμή του δεν μηδενίζεται αφού ακολουθείται η «διέξοδος» της διόδου η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση άγει. Η τάση με ανοιχτό διακόπτη είναι  $V_L = -V_o$  και το πηνίο πλέον λειτουργεί παράλληλα με τον πυκνωτή το οποίο καταγράφεται στο επόμενο σχήμα. Επισημαίνεται ότι το ρεύμα είναι συνεχώς σε θετικές τιμές λόγω της ύπαρξης της διόδου.



Εικόνα 31: Οι δύο τρόποι λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

[23]

Ένα βασικό δεδομένο του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι πως η λειτουργία του στηρίζεται στον διακόπτη  $S$  και εκφράζεται μέσω της σχετικής διάρκειας  $D$ , η οποία υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{V_o}{V_d} = D \quad (3.1)$$

Όσον αφορά την ισχύ, αν θεωρηθεί πως οι απώλειες δεν υπάρχουν, η ισχύς εξόδου ( $P_o$ ) είναι ίση με της εξόδου ( $P_d$ ), και σε συνάρτηση με τη σχετική διάρκεια αγωγής προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$P_d = P_0 \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_0 \cdot I_0 \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = \frac{V_d}{V_0} \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = \frac{1}{D} \quad (3.2)$$

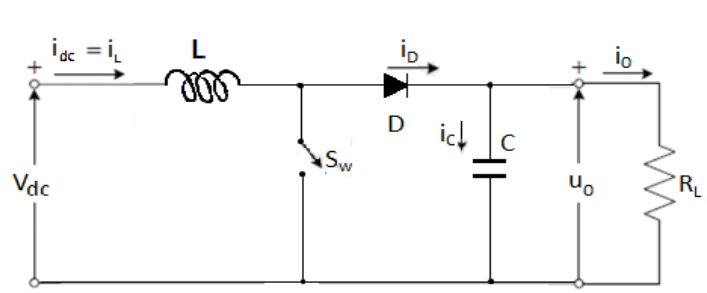
Μια διαφορετική έκφραση για τη σχετική διάρκεια αγωγής είναι:

$$D = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.3)$$

Όπου η χρονική διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αγωγής συμβολίζεται με  $t_{ON}$  και η περίοδος της παλμοδότησης συμβολίζεται με  $T$ .

### 3.6 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης

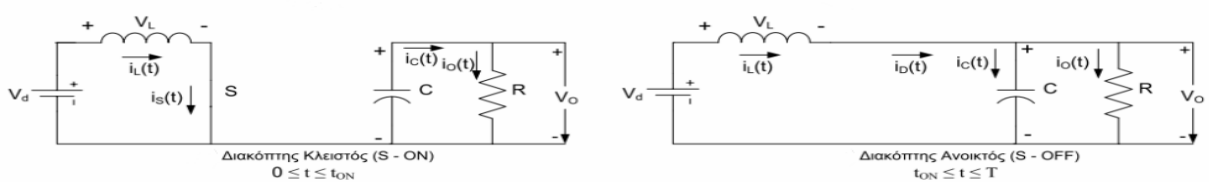
Στην περίπτωση του μετατροπέα DC-DC ανύψωσης τάσης ισχύει το αντίθετο από ότι στον μετατροπέα υποβιβασμού, αφού επιθυμητό είναι η τάση εξόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Το ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο βασίζεται ο μετατροπέας είναι το παρακάτω:



Εικόνα 32: Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Στην περίπτωση που ο διακόπτης είναι κλειστός, παρέχεται στην αυτεπαγωγή ενέργεια από την πηγή εισόδου. Η δίοδος βρίσκεται σε ανάστροφη πόλωση οπότε λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα, και κατά συνέπεια η έξοδος είναι αποκομμένη από την είσοδο. Με το που ανοίξει πλέον ο διακόπτης δημιουργείται μείωση στο ρεύμα του πηνίου, και υπάρχει αλλαγή στην πολικότητα της τάσης. Η δίοδος είναι πλέον σε κατάσταση αγωγής, και η ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στην αυτεπαγωγή μεταφέρεται στο πηνίο. Το άθροισμα των τάσεων της πηγής και της αυτεπαγωγής δίνει και την τιμή της τάσης εξόδου. Παρακάτω είναι καταγεγραμμένες οι φάσεις του κυκλώματος για κλειστό και για ανοιχτό διακόπτη.





Εικόνα 33: Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης για ανοιχτό και κλειστό διακόπτη

Η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου και την τάση εξόδου είναι η εξής:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (3.4)$$

Με τη σχέση της ισχύος με την σχετική διάρκεια  $D$  να τη συνοδεύει όπως και στον μετατροπέα υποβιβασμού, θεωρώντας ως δεδομένο την μηδενική απώλεια ενέργειας:

$$P_d = P_0 \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_0 \cdot I_0 \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = \frac{V_d}{V_0} \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = (1-D) \quad (3.5)$$

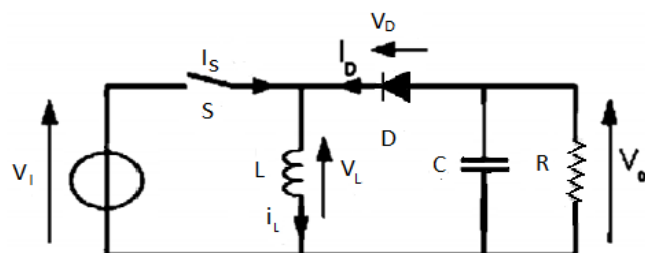
Αγωγή του διακόπτη συνεπάγεται με μη αγωγή της διόδου και όπως και με την τάση στα άκρα της που είναι ίση με την τάση εξόδου  $V_0$ . Επιπρόσθετα, όταν ο διακόπτης δε βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η διόδος άγει και η τάση που επικρατεί στα άκρα της έχει μηδενική τιμή.

### 3.7 Μετατροπέας Σ.Ρ.-Σ.Ρ. Υποβιβασμού-Ανύψωσης

Η περίπτωση του μικτού μετατροπέα είναι όπως υποδηλώνει και η ονομασία του ένα κύκλωμα με χαρακτηριστικά του μετατροπέα υποβιβασμού αλλά και του μετατροπέα ανύψωσης. Η τάση της εξόδου του υπάρχει η πιθανότητα να είναι μεγαλύτερη είτε μικρότερη από αυτή της εισόδου, όμως και στις δύο περιπτώσεις αποκτά αντίθετη πολικότητα.

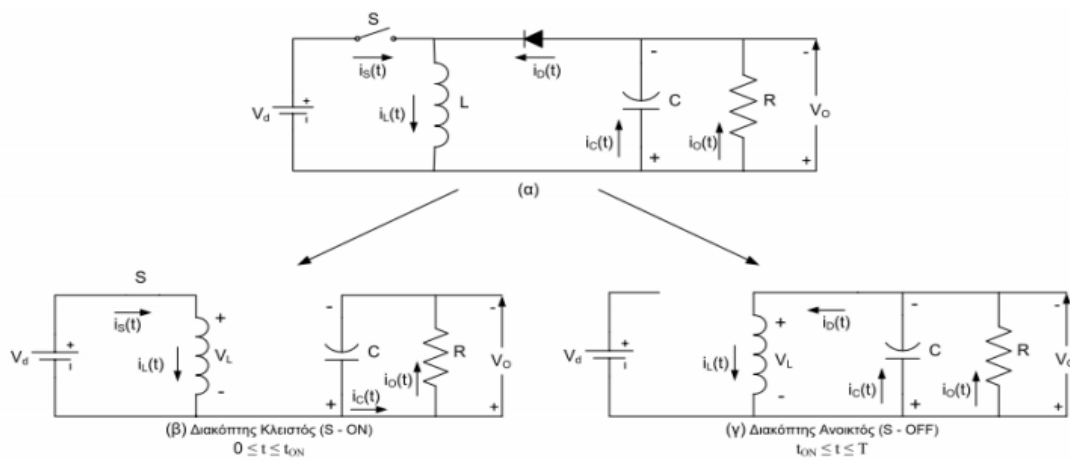
Στο παρόν κύκλωμα υπάρχουν δύο διαφορετικές λειτουργίες που εξαρτώνται από τον τρόπο συμμετοχής του διακόπτη. Στην περίπτωση του κλειστού διακόπτη η ενέργεια διοχετεύεται από την πηγή κατευθείαν στο πηνίο  $L$ , ενώ ο πυκνωτής με τη σειρά του τροφοδοτεί το φορτίο της αντίστασης. Κατά την περίπτωση του ανοιχτού

διακόπτη, ο ρόλος του πηνίου είναι να τροφοδοτεί το φορτίο R και τον πυκνωτή. Ακολουθεί το κύκλωμα του συγκεκριμένου μετατροπέα.



Εικόνα 34: Κύκλωμα μικτού μετατροπέα

Η δημιουργία αυτού του μετατροπέα μπορεί να γίνει συνδέοντας τους μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης σε σειρά. Όμως σε αυτή την περίπτωση τα ενεργά και παθητικά στοιχεία που θα χρειαστούν για την κατασκευή του κυκλώματος είναι σημαντικά περισσότερα από ότι το προηγούμενο σχήμα, η μορφή του οποίου κυκλώματος χρησιμοποιείται πιο συχνά. Παρακάτω φαίνεται η μορφή που παίρνει ο μετατροπέας με ανοιχτό και με κλειστό τον διακόπτη S.



Εικόνα 35: Κύκλωμα μικτού μετατροπέα για ανοιχτό και κλειστό διακόπτη

Η περίοδος T ισοδυναμεί με το άθροισμα των χρόνων  $t_{ON}$  και  $t_{OFF}$  όπως απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα, ενώ η τάση του πηνίου δίνεται από τον παρακάτω τύπο για τα δύο αυτά διαστήματα:

$$V_L(t) = \begin{cases} V_d & , 0 \leq t \leq t_{ON} \\ -V_0 & , t_{ON} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.6)$$

Το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου ισούται με μηδέν κάτι που εκφράζεται και από τον παρακάτω τύπο:

$$\int_0^T \mathbf{V}_L(t) dt = \mathbf{0} \Rightarrow \int_0^{t_{ON}} \mathbf{V}_L(t) dt + \int_{t_{ON}}^T \mathbf{V}_L(t) dt = \mathbf{0} \quad (3.7)$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής για το κύκλωμα ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{D} = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.8)$$

$$\int_0^{t_{ON}} \mathbf{V}_d dt + \int_{t_{ON}}^T (-\mathbf{V}_0) dt = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{V}_d \cdot \int_0^{t_{ON}} dt + (-\mathbf{V}_0) \cdot \int_{t_{ON}}^T dt = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{V}_d \cdot t_{ON} + (-\mathbf{V}_0) \cdot (T - t_{ON}) = \mathbf{0}$$

Αν στην πρώτη σχέση αντικατασταθεί η τάση του πηνίου με την δεύτερη σχέση προκύπτει:

$$\mathbf{V}_d \cdot t_{ON} = \mathbf{V}_0 \cdot (T - t_{ON}) \Rightarrow \frac{\mathbf{V}_0}{\mathbf{V}_d} = \frac{\mathbf{V}_0}{\mathbf{V}_d} = \frac{t_{ON}}{(T - t_{ON})} \Rightarrow \frac{\mathbf{V}_0}{\mathbf{V}_d} = \frac{\frac{t_{ON}}{T}}{\left(\frac{T - t_{ON}}{T}\right)}$$

Και μετατρέποντας τον τύπο αλλά και αντικαθιστώντας με τον τύπο της σχετικής διάρκειας προκύπτει ότι:

$$\frac{\mathbf{V}_0}{\mathbf{V}_d} = \frac{\mathbf{D}}{(1 - \mathbf{D})} \quad (3.9)$$

Ένα από τα σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με τον μικτό μετατροπέα είναι οι τιμές της σχετικής διάρκειας αγωγής. Αν δοθεί τιμή στην σχετική διάρκεια μικρότερη του 0.5, με βάση τον παραπάνω τύπο συμπεραίνουμε ότι ο παρανομαστής θα έχει μεγαλύτερη τιμή από τον αριθμητή. Συνεπώς η τάση εξόδου θα είναι μικρότερη της εισόδου. Αντίθετα αν δοθεί τιμή στη σχετική διάρκεια μεγαλύτερη του 0.5, με ότι αυτό συνεπάγεται ως προς το κλάσμα, η τάση εξόδου θα είναι μεγαλύτερη από της εισόδου.

[23]

# Κεφάλαιο 4

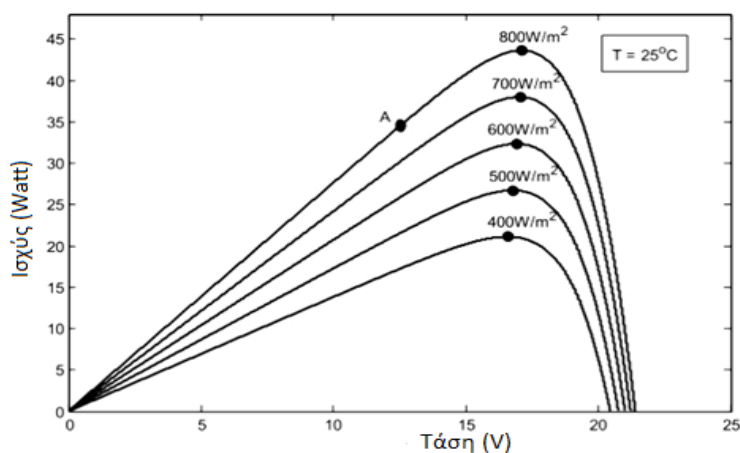
## Αλγόριθμοι αναζήτησης

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι αλγόριθμοι είναι με βάση την ποσότητα των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται, και με το αν η μέθοδος κρίνεται άμεση ή έμμεση.

### 4.1 Αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης

Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης είναι εύκολος στη χρήση του γι' αυτό και είναι ευρέως διαδεδομένος. Η βάση της λειτουργίας του στηρίζεται στην καμπύλη μεταξύ της τάσης και της ισχύος που αντικατοπτρίζει τις ηλεκτρικές τιμές του φωτοβολταϊκού.

Το σκεπτικό του αλγόριθμου αντικατοπτρίζεται σε διαταραχές που προκαλούνται στην τάση, με ταυτόχρονη παρατήρηση στην τιμή της ισχύος. Έστω ότι η διάταξη λειτουργεί σε ένα τυχαίο σημείο A. Σε περίπτωση που αυξηθεί η τάση και η μεταβολή της ισχύος είναι θετική, τότε ο αλγόριθμος προχωράει σε νέα αύξηση της τάσης. Ακολουθεί ένα σχετικό σχήμα:



Εικόνα 36: Σημείο μέγιστης ισχύος για διάφορες τιμές τάσης

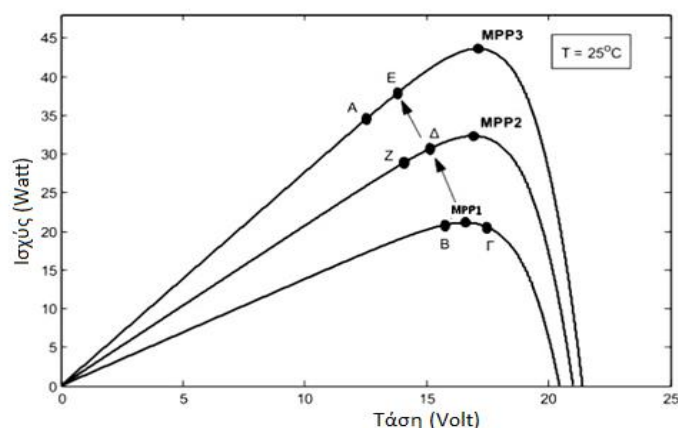
Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία και σε περίπτωση που η μεταβολή της ισχύος είναι αρνητική, τότε προχωράει στο επόμενο βήμα με μείωση της τάσης.

Επί της ουσίας πρόκειται για μία ταλάντωση γύρω από το Μέγιστο Σημείο Ισχύος.

Όπως γίνεται όμως εύκολα αντιληπτό κάτι που χαρακτηρίζει τον αλγόριθμο είναι η έλλειψη ακρίβειας, αφού ακόμα και αν με την επιβολή κάποιας μεταβολής βρεθεί το ΜΣΙ, ο αλγόριθμος δεν έχει την ιδιότητα να το αναγνωρίζει, και οπότε να μην προχωρήσει σε νέα μεταβολή.

Το παραπάνω στοιχείο επηρεάζει ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα στην περίπτωση που η καμπύλη είναι σε χαμηλά επίπεδα (όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα), οπότε και κάθε αυξομείωση στην τάση μπορεί να στερήσει σημαντική τιμή ισχύος.

Μια περίπτωση η οποία δυσκολεύει την εφαρμογή του αλγόριθμου είναι οι απότομες μεταβολές στην ακτινοβολία, αφού όπως είναι λογικό η καμπύλη αλλάζει μορφή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι συννεφιασμένες ημέρες που η ακτινοβολία του ήλιου αυξομειώνεται.



Εικόνα 37: Πιθανή δυσχερής εφαρμογή του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης

Έστω ότι το η παρούσα καμπύλη του φωτοβολταϊκού είναι η πρώτη και η παρούσα τάση είναι στο σημείο Γ. Με βάση τον αλγόριθμο η επόμενη κίνηση είναι μια μείωση της τάσης έτσι ώστε να φτάσει στο -προς το παρόν- επιθυμητό MPP1. Αν όμως η ηλιακή ακτινοβολία μεταβληθεί ξαφνικά, και η καμπύλη μετακινηθεί στην αμέσως πιο πάνω με σημείο λειτουργίας το Δ, και ο αλγόριθμος δώσει κανονικά την εντολή για μείωση, το νέο σημείο λειτουργίας που θα ισχύει θα είναι το Ζ, οπότε θα έχει μεγαλώσει η απόσταση από το νέο μέγιστο σημείο MPP2. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί με παρόμοιο τρόπο με νέο σημείο λειτουργίας το Ε, το οποίο σημαίνει ακόμα μεγαλύτερη απόσταση από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το συμπέρασμα που βγαίνει

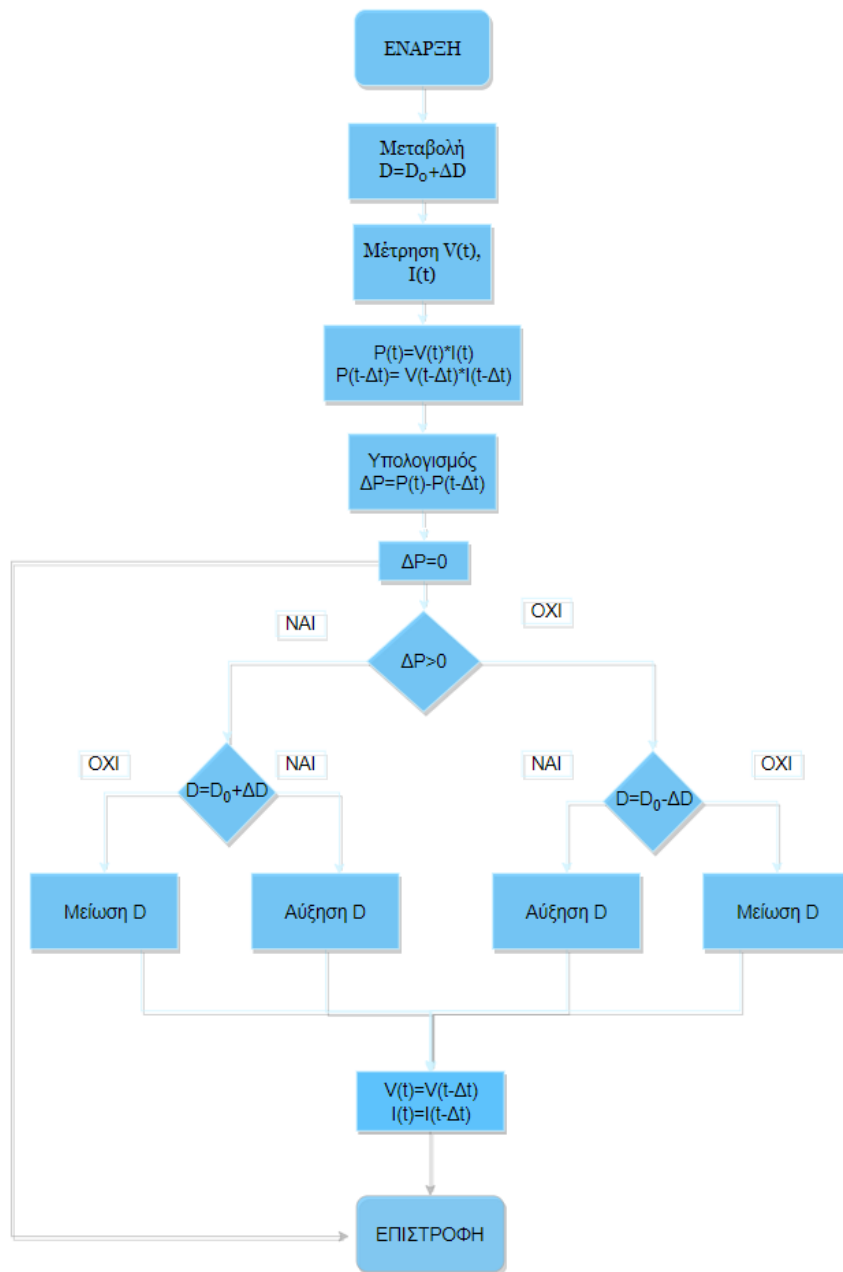
είναι ότι ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει σωστά στην περίπτωση που η ακτινοβολία είναι σταθερή.

Η εξομάλυνση αυτή του αλγορίθμου είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω τροποποιήσεων. Ένας πρώτος τρόπος βελτίωσης είναι η συνάρτηση καθυστέρησης, η οποία σταματάει τις μεταβολές στην τάση όταν το πρόσημο της μεταβολής της ισχύος εναλλάσσεται συνεχώς. Αυτό επί της ουσίας σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό έχει βρει το Μέγιστο Σημείο Ισχύος οπότε δεν χρειάζονται περαιτέρω μεταβολές.

Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης τροποποίησης έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του φωτοβολταϊκού αφού αποφεύγονται οι ταλαντώσεις, όμως ευνοείται μόνο στην περίπτωση που οι συνθήκες ακτινοβολίας είναι σταθερές.

Μία άλλη πρόταση για βελτίωση του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης είναι η παρακάτω. Έστω ότι το φωτοβολταϊκό λειτουργεί σε μία τάση  $V_A$  δηλαδή με μία ισχύ  $P_A$ , και μετά από διατάραξη ελέγχεται η λειτουργία του σε μία τάση  $V_B$ , η οποία θα αντιστοιχεί σε μία ισχύ  $P_B$ . Στο αμέσως επόμενο βήμα ο αλγόριθμος ελέγχει και πάλι την τάση  $V_A$  έτσι ώστε να παρατηρηθεί αν η τιμή της ισχύος είναι και πάλι η ίδια. Στην περίπτωση που η τιμή της ισχύος στην συγκεκριμένη τάση είναι διαφορετική σε σχέση με την προηγούμενη αντίστοιχη, ο αλγόριθμος γνωρίζει πλέον ότι η καμπύλη έχει μετακινηθεί, οπότε προσωρινά διακόπτει και τις μεταβολές. Η τροποποίηση αυτή δίνει την δυνατότητα στον αλγόριθμο να γνωρίζει πότε η ακτινοβολία μεταβάλλεται αισθητά, αλλά όπως γίνεται κατανοητό η διαδικασία αυτή επιβραδύνει και τον αλγόριθμο. [23]

Ένα πιθανό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης είναι το παρακάτω. Η μεταβολή της τάσης έχει συμβολιστεί με  $D$  και περιγράφεται η διαδικασία της αύξησης, αφαίρεσης είτε καμίας αυξομείωσης της τάσης. Στόχος η σταθεροποίηση στο καλύτερο δυνατό σημείο, όπου  $\Delta P=0$  εν τέλει, με στόχο την σταθεροποίηση στο Μέγιστο Σημείο Ισχύος.



Εικόνα 38: Πιθανό διάγραμμα ροής αλγόριθμου Διατάραξης και Παρατήρησης

Πηγή: <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>

επεξεργασία με τη βοήθεια του <https://www.draw.io/>

## 4.2 Αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας

Ο αλγόριθμος της αυξητικής αγωγιμότητας βασίζεται στην απλή μαθηματική σχέση που συνδέει την ισχύ με την τάση και την ένταση. Παραγωγίζοντας την ως προς ένα από τα δύο μεγέθη από τα οποία εξαρτάται, και εξισώνοντας τη σχέση με το μηδέν, μπορεί να βρεθεί το μέγιστο σημείο της ισχύος.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4.1)$$

Οπότε με απλές πράξεις προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4.2)$$

Στο δεξιά μέρος ουσιαστικά εκφράζεται η αυξητική αγωγιμότητα με αρνητικό πρόσημο, ενώ στο αριστερό μέρος της εξίσωσης βρίσκεται η αυξητική αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για την εύρεση του Μέγιστου σημείου ισχύος αρκεί σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο τα δύο μέρη να είναι ίσα. Ένα άλλο πολύ χρήσιμο στοιχείο που προκύπτει από τον παραπάνω τύπο είναι πως μέσω αυτού ο αλγόριθμος είναι ικανός να υπολογίσει αν η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί αριστερά ή δεξιά του μέγιστου σημείου ισχύος. Οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται είναι οι παρακάτω:

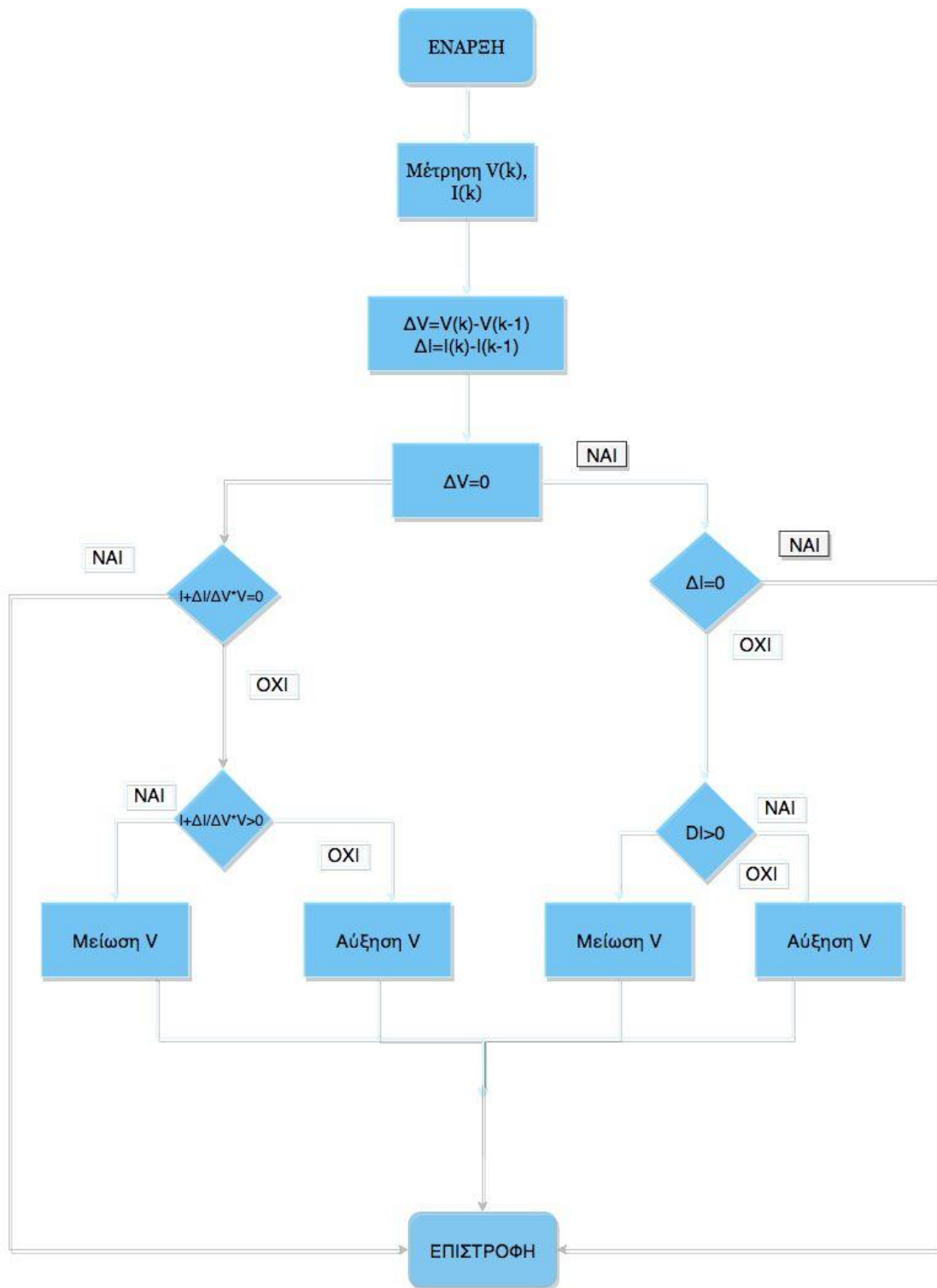
- $\left[ \frac{dP}{dV} = 0 \right] \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$
- $\left[ \frac{dP}{dV} = 0 \right] \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$
- $\left[ \frac{dP}{dV} = 0 \right] \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$

Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις γίνεται επί της ουσίας γνωστό (βάσει της ανισότητας) αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά ή δεξιά του Μέγιστου σημείου ισχύος. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος καθοδηγεί σε κατάλληλη μεταβολή, δηλαδή αύξηση είτε μείωση της τάσης. Όταν η πρώτη σχέση πλέον ισχύει, το μέγιστο σημείο ισχύος έχει βρεθεί. Αν η τιμή του ρεύματος μεταβληθεί, ο αλγόριθμος θεωρεί πως η ακτινοβολία



έχει μεταβληθεί οπότε η διαδικασία ξεκινάει και πάλι από την αρχή, μεταβάλλοντας την τάση κατάλληλα. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγόριθμου έναντι του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης είναι πως εφόσον βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας, διατηρεί την τιμή της τάσης σταθερή σε αντίθεση με την ταλάντωση του προηγούμενου αλγόριθμου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενδεικτικό της λογικής του αλγόριθμου.



Εικόνα 39: Πιθανό διάγραμμα ροής Αλγόριθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας

Πηγή: <https://www.mathworks.com/discovery/mpppt-algorithm.html>

Επεξεργασία με <https://www.draw.io/>

Στην περίπτωση που το κλάσμα των παραγώγων από τον πρώτο τύπο είναι ίσο με το μηδέν, ο το φωτοβολταϊκό λειτουργεί σε μέγιστο σημείο ισχύος, οπότε και διατηρείται η τρέχουσα τιμή της τάσης σταθερή. Κατά την περίπτωση που η τιμή του  $dV=0$  ενώ το  $dI$  έχει αρνητική τιμή, σημαίνει μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή το νέο μέγιστο σημείο ισχύος είναι μικρότερο οπότε ο αλγόριθμος προχωράει σε αντίστοιχη μείωση της τάσης. Αν η τιμή του  $dV$  είναι πάλι μηδενική, ενώ το  $dI$  έχει θετική τιμή, αντίστοιχα συνεπάγεται με μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία όπως και μεγαλύτερη τιμή τάσης στο μέγιστο σημείο απόδοσης, άρα και ο αλγόριθμος προχωράει σε αύξηση της τάσης.

Συμπερασματικά:

$$\text{Αν } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ τότε } \frac{dP}{dV} > 0$$

Στην περίπτωση αυτή το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται σε χαμηλότερη τιμή από την τάση για μέγιστο σημείο λειτουργίας από την αριστερή πλευρά. Ο αλγόριθμος προχωρά σε αύξηση της τάσης

$$\text{Αν } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ τότε } \frac{dP}{dV} < 0$$

Στην περίπτωση αυτή το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται σε υψηλότερη τιμή από την τάση για μέγιστο σημείο λειτουργίας. Ο αλγόριθμος προχωρά σε μείωση της τάσης.

Κώδικας προς υλοποίηση με βάση τη λογική της διατάραξης και παρατήρησης:

```
function (vref)= MPPT( Vsolar, Isolar)
persistent vold vrefold; %Μόνιμες μεταβλητές ανεξάρτητα αν τρέχει ή όχι το πρόγραμμα
    if isempty (vold) %Αν το Vold είναι μηδέν
        vold=0; %δίνεται η τιμή 0 στις μεταβλητές
        vrefold=0;
    end
    P=Vsolar*Isolar %υπολογίζεται η τρέχουσα ισχύς
    dV=Vpv-vold; %η διαφορά της τρέχουσας τάσης με την παλιά
    dP=P-Pold; % η διαφορά της τρέχουσας ισχύος με την παλιά
    step=0.1; %πρόσθεση ή αφαίρεση 0.1 κάθε φορά
    if dP~=0 %διαφορά της ισχύος είναι μη μηδενική
        if dP<0 %διαφορά της ισχύος είναι αρνητική
            if dV<0 %αν η διαφορά της τάσης είναι αρνητική
                vref=vrefold+step; %αυξάνεται η τάση αναφοράς
            else
                vref= vrefold -step; %διαφορετικά μειώνεται η τάση αναφοράς
            end
        else %για θετική διαφορά ισχύος
            if dV<0 %με αρνητική διαφορά τάσης
                vref=vrefold-step; %μειώνεται η τάση αναφοράς
            else
                vref=vrefold+step; %συνεχίζεται η αύξηση
            end
        end
    end
    else %το μέγιστο σημείο ισχύος έχει βρεθεί
        vref= vrefold;
    end
    %Νέες τιμές στα vrefold, vold και Pold
    vrefold=vref;
    vold=Vpv;
    Pold=P;
```

Η περίοδος που ορίστηκε για τη λειτουργία του συστήματος είναι 10ms, ούτως ώστε η έξοδος του συστήματος να έχει προλάβει να σταθεροποιηθεί πριν γίνει και πάλι είσοδος για τον ελεγκτή. Επειδή οι τιμές της τάσης και του ρεύματος δεν είναι σταθερές, χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές αυτών για συχνότητα 1250 Hz. Αυτές συμβολίζονται με  $V_{average}$  και  $I_{average}$ . Η τιμή που δόθηκε στο μέγεθος της αλλαγής στην τάση είναι 100 mV και ονομάστηκε step. [8]

### 4.3 Μέθοδοι σάρωσης ρεύματος

#### Μέθοδος Σάρωσης Ρεύματος (current sweep)

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται μια κυματομορφή αναζήτησης της μεταβλητής του ρεύματος, μέσω της οποίας λαμβάνεται η I-V χαρακτηριστική καμπύλη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Η κατασκευή του ανιχνευτή αιχμής της ισχύος βασίζεται σε ένα διαφορικό τελεστικό ενιχυτή και ένα συγκριτή. Για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αναλογικός μανδαλωτής που να διατηρεί την τάση (που συντελεί στη μέγιστη ισχύ).

Ένας πιο απλός τρόπος προς υλοποίηση της μεθόδου σάρωσης ρεύματος, χωρίς τη χρησιμοποίηση αναλογικού πολλαπλασιαστή, είναι να χρησιμοποιηθεί μια προκαθορισμένη χρονική συνάρτηση  $f(t)$  για την αναζήτηση του ρεύματος μέσω κυματομορφής η οποία εκφράζεται ως

$$I(t) = f(t) \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση είναι ανάλογη της παραγώγου της

$$f(t) = k_4 \cdot \frac{df(t)}{dt} \quad (4.4)$$

Το  $k_4$  συμβολίζει τη σταθερά αναλογίας. Οπότε η ισχύς του φ/β δίνεται από:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t)$$

Το χρονικό σημείο που η ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της δίνει αντίστοιχα μηδενική τιμή στην παράγωγο, δηλαδή

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \cdot \frac{df(t)}{dt} + f(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (4.5)$$

Αντικαθιστώντας την (1) στην (3) οδηγεί σε:

$$\frac{dp(t)}{dt} = [v(t) + k_4 \cdot \frac{dv(t)}{dt}] \cdot \frac{df(t)}{dt} = 0$$

Η οποία με τη συμβολή της – και λόγω του ότι η χρονική παράγωγος  $f(t)$  έχει τιμή διαφορετική του μηδενός, τροποποιείται σε:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k_4 \cdot \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (4.6)$$

Η λύση που επαληθεύει την εξίσωση (2) είναι η  $f(t) = C \exp(t/k_4)$ , όπου η σταθερά  $k_4$  έχει αρνητική τιμή, και η  $C$  χρειάζεται να είναι ίση με το  $I_{max}$  (μέγιστο ρεύμα). Οπότε η λύση της εξίσωσης (2) είναι μια εκθετική συνάρτηση που με σταθερά χρόνου  $\tau = -k_4$  έχει τη μορφή:

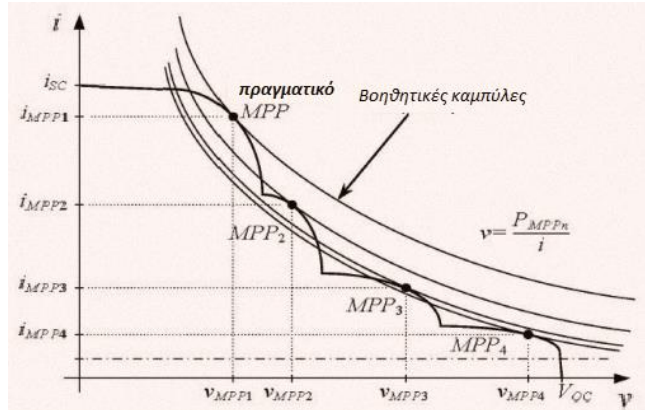
$$f(t) = I_{max} \cdot \exp(-t/\tau) \quad (4.7)$$

Στην τελική της μορφή η διαδικασία εύρεσης της κυματομορφής έχει απλοποιηθεί αφού ισούται με την τάση πυκνωτή που εκφορτίζεται μέσω κάποιας αντίστασης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι εύκολο να υπολογιστεί η τάση μέγιστης ισχύος. Μέσω του τύπου (4) μπορεί να γίνει επαλήθευση του σωστού σημείου μέγιστης ισχύος.

Η μέθοδος αυτή της ανίχνευσης έχει κάποιες ενεργειακές απώλειες. Η διαδικασία σάρωσης του ρεύματος γίνεται με τη βοήθεια αναλογικών υπολογισμών. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας απαιτεί περίπου 50ms, οπότε ωφέλιμο είναι να γίνεται χρήση αυτής μόνο αν η αύξηση που συμβαίνει στην ενέργεια του φωτοβολταϊκού υπερβαίνει τις απώλειες. [8]

## Βελτιωμένη Μέθοδος Σάρωσης ή GMPPS

Η μέθοδος αυτή έχει κοινά στοιχεία με την προηγούμενη, στηρίζεται στη γραφική παράσταση, αλλά τα βήματα της σάρωσης είναι μεταβλητά. Τα στοιχεία στα οποία στηρίζεται είναι βοηθητικές καμπύλες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ο στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η προσαύξηση της τάσης με την βοήθεια των καμπυλών.



Εικόνα 40: Παράδειγμα από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών, που κάθε πλαίσιο είναι εκτεθειμένο σε διαφορετική θερμοκρασία/ακτινοβολία.

Οι καμπύλες αυτές έχουν τον ρόλο των τετραγωνικών υπερβολών πάνω στην κυματομορφή, και επισημαίνουν τις περιοχές σταθερής ισχύος.

Ο τύπος της τετραγωνικής υπερβολής είναι :

$$Vi = P_{MPP} \quad (4.8)$$

Όπου το  $P_{MPP}$  είναι μια σταθερά που υποδηλώνει την τιμή της ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης I-V. Στο προηγούμενο σχήμα φαίνονται οι τετραγωνικές υπερβολές που έχουν σημείο τομής με τα τοπικά μέγιστα. Είναι δεδομένο πως χρειάζονται βοηθητικές καμπύλες σε όλο το μήκος της καμπύλης I-V.

Οι βοηθητικές καμπύλες όπως και η καμπύλη I-V είναι γνησίως φθίνουσες συναρτήσεις.

Πραγματική υπερβολή ονομάζεται όταν το  $P_{MPP}$  είναι η τελευταία μεγαλύτερη ισχύς στο κομμάτι της καμπύλης που εξετάστηκε.

Για την πραγματοποίηση της μεθόδου χρησιμοποιούνται προσαυξήσεις στην τιμή της τάσης, και εν συνεχεία με την συμβολή των βοηθητικών καμπυλών οι προσαυξήσεις μεγαλώνουν, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας. Ο λόγος

που η διαδικασία αυτή απαιτεί λιγότερο χρόνο είναι πως για μια συγκεκριμένη τιμή της έντασης του ρεύματος, η τιμή της τάσης πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη είναι αρκετά μικρότερη από την τιμή της στην αντίστοιχη βοηθητική καμπύλη. Δηλαδή, κατά μήκος των βοηθητικών καμπυλών αυξάνεται αισθητά πιο άμεσα από ότι στην πραγματική καμπύλη.

Έχοντας ως βάση την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της τάσης  $V_{min}$ , η μέθοδος GMPPS υπολογίζει σε κάθε νέα περίοδο μια αυξανόμενη τιμή για την τάση αναφοράς. Ο υπολογισμός της τάσης αναφοράς  $V_{ref, k+1}$  με τους εξής τρόπους:

A) Με την πρόσθεση ενός σταθερού βήματος  $\Delta V$  στην προηγούμενη τάση που μετρήθηκε, δηλαδή  $V_{ref, k+1} = V_{ref, k} + \Delta V$

B) Με την ακολούθηση της τροχιάς της υπερβολής, δηλαδή  $V_{ref, k+1} = P_{MPP} / i_k$

Όπου η σταθερή τιμή της  $P_{MPP}$  εκφράζει τη μεγαλύτερη ισχύ από όσες έχουν μετρηθεί, και  $i_k$  είναι το ρεύμα που ισχύει κατά τη στιγμή  $k$  της δειγματοληψίας.

Στην περίπτωση που η ισχύς  $P_k$  έχει μεγαλύτερη τιμή από την  $P_{MPP}$ , ο υπολογισμός της νέας τάσης γίνεται μέσω της περίπτωσης α). Με βάση το σημείο  $k$  ενημερώνεται και η τιμή του προηγούμενου MPP σε τάση και ισχύ, δηλαδή  $V_{MPP} = V_k$ , και  $P_{MPP} = P_k$

Στην περίπτωση που η πρόσφατη μέγιστη ισχύς  $P_{MPP}$  είναι μεγαλύτερη από την  $P_k$ , ο υπολογισμός της νέας τάσης γίνεται μέσω της περίπτωσης β). Αν η προσαύξηση  $V_{ref, k+1} - V_{ref, k}$  είναι πιο μικρή από τη  $\Delta V$ , η τιμή της τάσης βρίσκεται με τον πρώτο τρόπο, που εξασφαλίζει πως η προσαύξηση είναι ίση ή μεγαλύτερη από την  $\Delta V$ .

Τη στιγμή που η τάση αναφοράς εξισωθεί με την  $V_{MAX}$ , η λειτουργία συνεχίζεται με τον αλγόριθμο διαταραχής και παρατήρησης. [12]



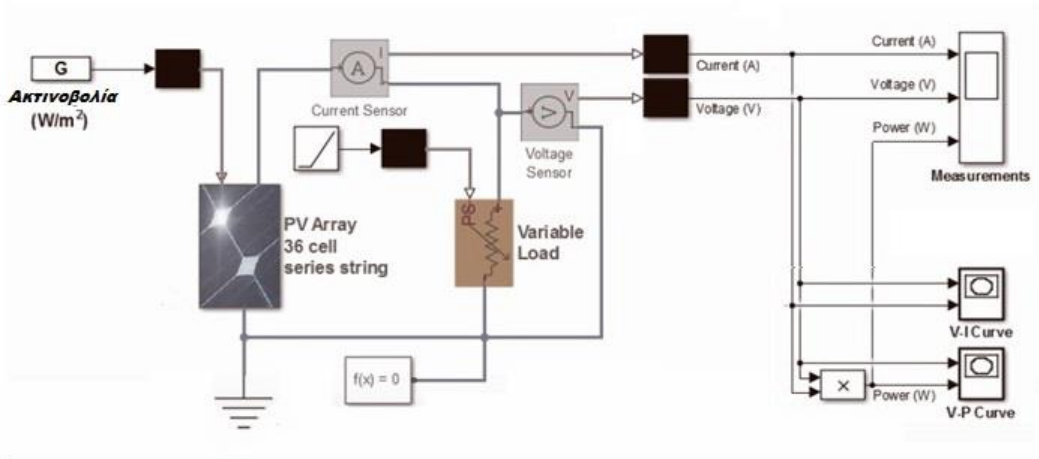
# Κεφάλαιο 5

## 5.1 Κυκλώματα για την εύρεση του Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα κυκλωμάτων που στόχος έχουν την εύρεση του Μέγιστου Σημείου Ισχύος με τη βοήθεια του Matlab/Simulink. Η είσοδος των συστημάτων είναι η ηλιακή ακτινοβολία (irradiance), μετρήσιμη σε  $W/m^2$ .

Το πρώτο κύκλωμα αποσκοπεί στην απλή μέτρηση των παραμέτρων[28]. Η απεικόνιση της τάσης, της έντασης και της ισχύος μπορούν να απεικονιστούν κάθε στιγμή.

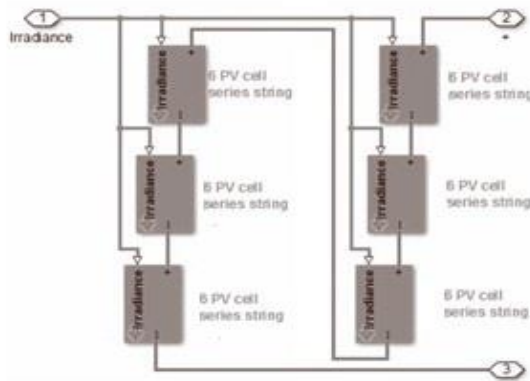
Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από 6 σειρές των 6 κελιών.



Εικόνα 41: : Κύκλωμα Φωτοβολταϊκής συστοιχίας για εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος

Πηγή : [28]

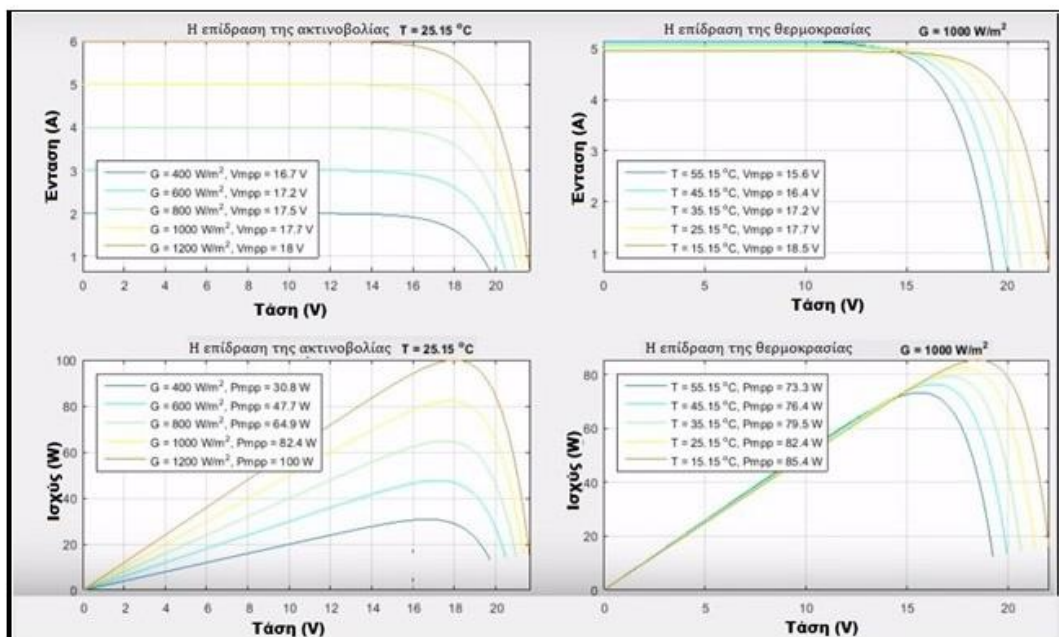
Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αφορά το ρεύμα που διαρρέει το ηλιακό στοιχείο όταν η τάση στα φωτοβολταϊκά κελιά είναι μηδενική. Η συγκεκριμένη τιμή της (τάση ανοιχτού κυκλώματος ) είναι 21.6V. Στο συγκεκριμένο σχήμα το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι 5 A. Η θερμοκρασία λειτουργίας έχει οριστεί στους 25.15 °C.



Εικόνα 42: Σχηματισμός φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Πηγή:[28]

Οι μετρήσεις που προκύπτουν από το απλό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού βρίσκονται παρακάτω για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Η επίδραση για τις διάφορες τιμές της ακτινοβολίας δημιουργεί μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των γραφικών της ισχύος, απ' ότι η επίδραση της θερμοκρασίας για μια σταθερή ακτινοβολία.

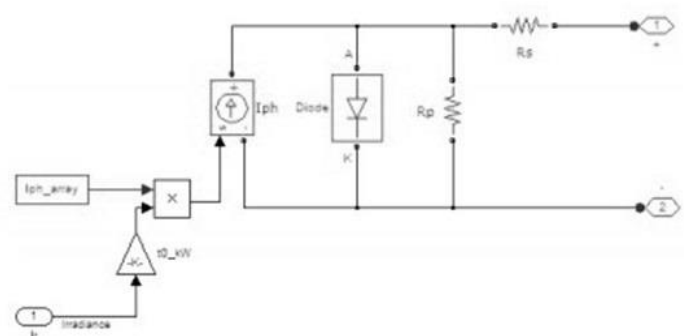


Εικόνα 43: Καμπύλες I-V και P-V φ/β συστοιχίας για τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

[28]

## Μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ανάλυση του

Οι παράμετροι ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορούν να επηρεαστούν από τις αλλαγές στην ακτινοβολία αλλά και στη θερμοκρασία, όμως η εσωτερική θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού δεν επηρεάζεται τόσο σημαντικά. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που θα αναλυθεί είναι το NE-Q5E3E της Sharp Corporation. Η ονομαστική τιμή της θερμοκρασίας (25°C) θεωρείται παρακάτω σταθερή και δεδομένη.



Εικόνα 44: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Πηγή: [35]

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του συγκεκριμένου μοντέλου (NE-Q5E3E) εμφανίζονται παρακάτω:

Μοντέλο	NE-Q5E3E
Ονομαστική ισχύς πλαισίου	165W
Τάση μέγιστης ισχύος, $V_{MPP}$	34.6V
Ρεύμα μέγιστης ισχύος, $I_{MPP}$	4.77A
$V_{oc}$	43.1V
$I_{sc}$	4.77A
$R_{dmsi}$	250Ω
$R_{serie}$	0.6Ω
Συντελεστής Πλήρωσης (FF)	0.705
Αποδοτικότητα συστοιχίας	12.7%
Μέγιστη τάση συστήματος (V max)	1000

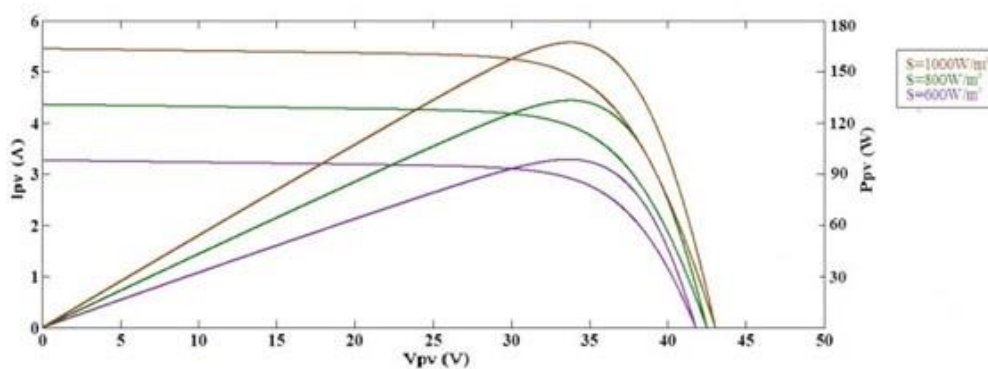
Στο σχήμα της εικόνας (36) φαίνεται το αναλυτικό σχεδιάγραμμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η είσοδος του φωτοβολταϊκού είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η τιμή της τάσης του πλαισίου. Το ρεύμα υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$I = I_P - I_S \left( e^{\frac{v + R_s i}{\eta V_T}} - 1 \right) - \frac{(v + R_s i)}{R_h} \quad (5.1)$$

Όπου,

- $R_s$  η αντίσταση σειράς,
- $R_h$  είναι η παράλληλη αντίσταση
- $I_P$  το φωτορεύμα
- $\eta$  ο συντελεστής της διόδου
- $I_S$  το ρεύμα κόρου που χαρακτηρίζει τη δίοδο
- $V_T$  η θερμική τάση

Τα αποτελέσματα των τιμών του φωτοβολταϊκού με σταθερή θερμοκρασία την ονομαστική που δίνεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ( $25^\circ \text{C}$ ), και για τρεις τιμές ακτινοβολιών ( $1000 \text{W/m}^2$ ,  $800 \text{W/m}^2$ ,  $600 \text{W/m}^2$ ) αναπαρίστανται στο επόμενο σχήμα.

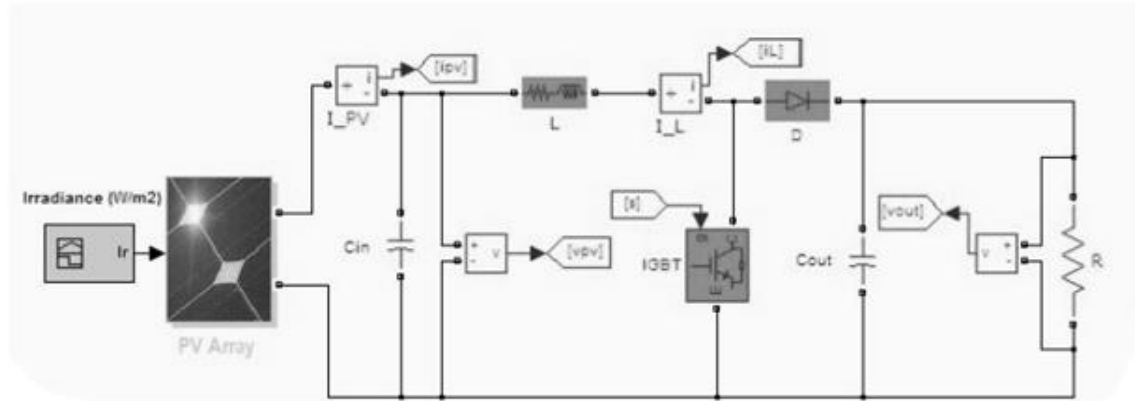


Εικόνα 45: Γραφικές I-V και P-V του μοντελοποιημένου σχήματος για θερμοκρασία  $25^\circ \text{C}$

Πηγή: [35]

## Ανάλυση κυκλώματος μετατροπέα ανύψωσης και οι παράμετροι του

Για την σύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το φορτίο και την εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος [35], αναλύεται το παρακάτω κύκλωμα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ένταξη του μετατροπέα ανύψωσης στο σχήμα της εικόνας 38 και το ισοδύναμο κύκλωμα του συγκεκριμένου μετατροπέα (εικόνα 39).



Εικόνα 46: Μοντελοποίηση σχήματος στο matlab για την ένωση φωτοβολταϊκού και φορτίου

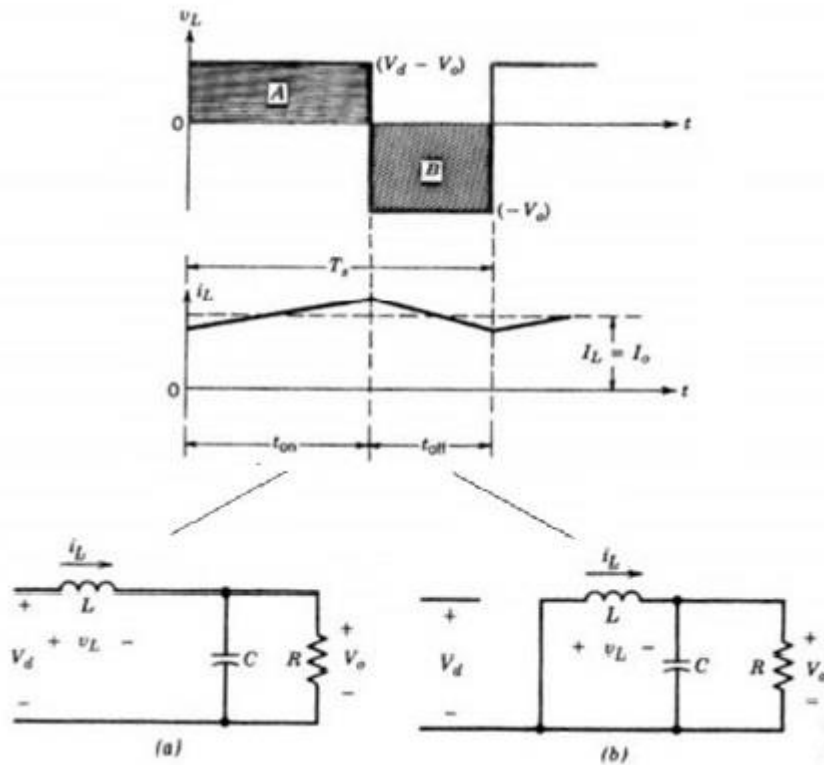
Η λειτουργία του εκτυλίσσεται ως εξής:

- Κατά την περίπτωση που ο διακόπτης του κυκλώματος είναι κλειστός, υπάρχει ανάστροφη πόλωση της διόδου. Η τροφοδοσία που παρέχεται στο φορτίο γίνεται μέσω του πυκνωτή και όχι από την πηγή εισόδου.
- Με το κλείσιμο του διακόπτη η ενέργεια που μεταφέρεται στο φορτίο γίνεται μέσω της πηγής και του πηνίου. Κατά τη διάρκεια αυτή ο πυκνωτής φορτίζεται.

Η τιμή της αυτεπαγωγής υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται ο μετατροπέας σε συνεχή αγωγή. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος η οποία προκαλείται από μια μέγιστη ισχύ εισόδου, χρειάζεται να μην είναι σε μεγαλύτερη τιμή από το ρεύμα του διακόπτη ισχύος [40]. Η τιμή της αυτεπαγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$L \geq \frac{V_{om}(1-a_m)a_m}{f_s|\Delta I_{LM}|} \quad (5.2)$$

- $f_s$  η διακοπτική συχνότητα
- $a_m$  το ποσοστό duty cycle όταν η εισερχόμενη ισχύς είναι μέγιστη
- $\Delta I_{LM}$  η κυμάτωση από την μία κορυφή έως την άλλη που δημιουργείται από το ρεύμα του πηνίου
- $V_{om}$  η μέγιστη τιμή της τάσεως εξόδου



Εικόνα 47: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης με ανοιχτό (a) και κλειστό (b) διακόπτη

Πηγή: [32]

Σύμφωνα με την πηγή [35], αποδείχθηκε μέσω προσομοιώσεων πως το ποσοστό duty cycle όταν η τάση παίρνει την τιμή  $V_{MPP}$  είναι ίσο με 60%. Για δεδομένο φορτίο  $R=30\Omega$ , η μέγιστη DC τάση είναι ίση με 56.5V. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρέχει  $I_{MPP}=4.77A$ , οπότε η τιμή της  $\Delta I_{LM}$  θα μπορούσε να είναι 0,5 A. Με βάση τον προηγούμενο τύπο, η L χρειάζεται να είναι  $L \geq 1.35mH$ . Μια πιθανά καλή τιμή έτσι ώστε να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή κυμάτωση στο ρεύμα του πηνίου είναι η  $L=2mH$ .

Με βάση το [41], η κυμάτωση του ρεύματος εξόδου του φ/β πλαισίου χρειάζεται να είναι πιο μικρή από 2% της μέσης τιμής του. Έτσι η τιμή του πυκνωτή της εισόδου ορίζεται ως:

$$C_{in} \geq \frac{I_{om} a_m^2}{0,02(1-a_m)V_{inm} f_s} \quad (5.3)$$

- $I_{om}$  είναι η συνιστώσα του ρεύματος της εξόδου, ενώ η ισχύς εξόδου είναι η μέγιστη
- $V_{inm}$ , η τιμή της τάσης εξόδου του πλαισίου κατά το μέγιστο σημείο ισχύος

Η τιμή της  $C_{in}$  που αποδόθηκε είναι η  $C_{in} = 330\mu F$ , για ελάχιστη κυμάτωση της τάσης  $V_{pv}$ , οπότε κατά συνέπεια ελάχιστη ταλάντωση της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου

$$C_{out} \geq \frac{I_{om}^2 m}{0,02 V_{om} f_s} \quad (5.4)$$

Η τιμή του πυκνωτή της εξόδου δίνεται με βάση πως η ταλάντωση της τάσης εξόδου χρειάζεται να είναι μικρότερη από 2%. Η επιλεγμένη τιμή είναι η

$$C_{out} = 235\mu F. \quad [35]$$

## 5.2 Μελλοντική παρουσία και εξέλιξη των φωτοβολταϊκών και άλλων ανανεώσιμων πηγών

Το μέλλον των φωτοβολταϊκών προβλέπεται ιδιαίτερα θετικό αφού ολοένα οι κυβερνήσεις των κρατών στρέφονται προς αυτά, αλλά και στις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές. Κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις που επιβεβαιώνουν την προτίμηση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα των φωτοβολταϊκών είναι οι παρακάτω:

- Το 2018 εγκρίθηκε φωτοβολταϊκός σταθμός φόρτισης για το νησί της Τήλου. Πρόκειται για μια κατασκευή από το Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα, η χρηματοδότηση της οποίας εγκρίθηκε από την Επιτροπή Ερευνών και Διαχείρισης του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας (ΕΛΚΕ). Ο εν λόγω σταθμός, που στηρίζεται στην ηλιακή ενέργεια θα έχει την ικανότητα να φόρτιζει ένα ή και 2 ηλεκτρονικά οχήματα. [22]
- Στην Ολλανδία είναι σε εξέλιξη έργο που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά έκτασης 2500 τετραγωνικών χιλιομέτρων στη θάλασσα, 15 χιλιόμετρα ανοιχτά της Χάγης. Τα κάτοπτρα θα βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, κάτι που οφείλει στην

αποφυγή προβλημάτων λόγω κυμάτωσης. Επιπρόσθετα, η χαμηλή θερμοκρασία στην οποία θα υπόκεινται οι συλλέκτες φαίνεται να ευνοεί τη λειτουργία τους συνολικά.  
[20]

- Και σε άλλα κράτη δίνεται ιδιαίτερα σημαντική βάση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως π.χ. στην Κίνα που εξαιτίας της λογικής αυτής αλλά και της προστασίας του περιβάλλοντος είχε τις εξής θετικές συνέπειες για το περιβάλλον:

- ο Μη καύση 215 εκατομμυρίων τόνων άνθρακα
- ο Όπως και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της τάξης των 491 εκατομμυρίων τόνων ετησίως, όπως αναφέρει η CBRC.[22]

### 5.3 Φωτοβολταϊκά σε βιομηχανίες

Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες σε θερμοκρασίες μεταξύ 50 °C -80 °C. Οι τύποι των φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιούνται εξαρτάται από την θερμοκρασία που είναι αναγκαία. Οπότε τα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα νερού χρησιμοποιούνται συνήθως σε καθαριστήρια. Στα περισσότερα εργοστάσια παρέχεται θερμό νερό σε θερμοκρασία κατάλληλη με τις απαιτήσεις. Το θερμό νερό πραγματοποιείται τόσο για την προθέρμανση νερού ή άλλων ρευστών για διάφορες διαδικασίες. Σε κατάσταση όπου έχει επέλθει η προθέρμανση του νερού, η απόδοση μεγιστοποιείται λόγω της μειωμένης θερμοκρασίας εισόδου του νερού στο κάθε ηλιακό σύστημα. Η αποθήκης θερμότητας επιτρέπει την κάθε λειτουργία της διεργασίας να χρησιμοποιείται σε διάρκεια που η ακτινοβολία του ήλιου είναι σε χαμηλά πλαίσια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα νερού και του αέρα είναι ικανά να πραγματοποιηθούν στον χώρο της βιομηχανίας. Αυτά τα δυο μπορούν να λειτουργήσουν σε όλη την περίοδο του χρόνου, αντίθετα σε αυτά που χρησιμοποιούνται στις κατοικίες δε μπορούν να είναι χρήσιμα σε όλη την χρονική περίοδο.

Όταν απαιτείται θερμοκρασία υψηλότερη από τους 80 με 100 βαθμούς κελσίου τότε προτείνεται η εγκατάσταση των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μπορεί να αποδώσουν θερμότητα σε αρεστό βαθμό. Το ζητούμενο είναι να επιτευχθεί το ποσοστό ενέργειας που θα καλύψει την προαπαιτούμενη βιομηχανική ενέργεια.

[6]



# Κεφάλαιο 6

## Παραδείγμα ηλιακού ακολουθητή (solar tracker)

### 6.1 Γενικές πληροφορίες για τους ηλιοστάτες

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελεί συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Μ'αυτήν την προϋπόθεση φαίνεται εύλογο ότι σε ορισμένα συστήματα που δεν υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς ώστε να έρχονται σε επαφή με την πορεία του ήλιου, η απόδοση είναι μειωμένη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αύξηση των αναγκών της εγκατάστασης σε ισχύ καθιστά αδήριτη ανάγκη την αύξηση της ωφέλιμης επιφάνειας με την προσθήκη περισσότερων πάνελ στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, επινοήθηκε η τεχνολογία του ηλιοστάτη, ή εντοπιστή ηλιακής ακτινοβολίας (tracker). Ο ηλιοστάτης είναι μια μηχανολογική διάταξη, πάνω στην οποία τοποθετείται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ώστε το σύστημα να μπορεί να περιστρέφεται μέσω των ειδικών εξαρτημάτων και του λογισμικού που διαθέτει. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και παράλληλα εξοικονομείται χρήμα συγκριτικά με την αγορά επιπλέον φωτοβολταϊκών πάνελ διότι η αγορά ενός ηλιοστάτη είναι συχνά πιο κερδοφόρα απόφαση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αποτελεί η ανθεκτικότητα του ηλιοστάτη σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, εναλλακτικά υπάρχουν και αυτοσχέδιες κατασκευές με παρόμοια αρχή λειτουργίας.

Το παρών κεφάλαιο αποτελείται από παραδείγματα συστημάτων με ηλιακό ιχνηλάτη (solar tracker). Το πρώτο μέρος βασίζεται στη λογική του μικροεπεξεργαστή με σχετικό κώδικα για την λειτουργία του, και το δεύτερο στη λογική του ευφυούς ελέγχου

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα προς υλοποίηση ενός εντοπιστή ηλιακής ακτινοβολίας είναι το παρακάτω όπου χρησιμοποιείται μικροεπεξεργαστής ArduinoUno και μέσω μιας βάσης κατασκευής δημιουργείται ένα αυτοματοποιημένο σύστημα. Στο επόμενο μέρος αναλύονται βήμα προς βήμα οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν.

## 6.2 Τμήματα του συστήματος

Τα εργαλεία που αποτελούν το συγκεκριμένο σύστημα είναι τα παρακάτω: Αρχικά ένας μικροεπεξεργαστής Arduino Uno, στον οποίο θα βασίζεται η επεξεργασία και ο έλεγχος των μελών της κατασκευής. Επιπρόσθετα η κίνηση των τμημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο σερβοκινητήρων της τάξης των 4.8V. Στα αναγκαία υλικά λογίζονται 4 αντιστάσεις των 10 K Ohm, όπως και 4 φωτοдиодοι. Ακόμη ένα φωτοβολταϊκό πάνελ των 5.5 V.

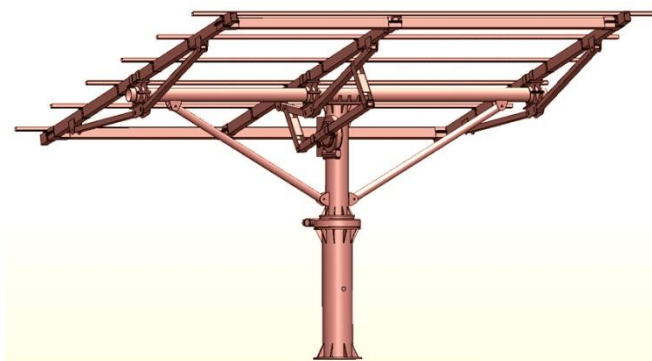
Ένας εντοπιστής ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να είναι ενός άξονα ή 2 αξόνων. Στην πρώτη περίπτωση σημαίνει πως ελέγχεται μόνο ένας άξονας από τον κινητήρα, για τη διαδικασία της ακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Εικόνα 48:** Εντοπιστής ηλιακής ακτινοβολίας ενός άξονα

Πηγή: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-21-S3-A401&id=252553>

Στην 2η περίπτωση ο έλεγχος γίνεται με αποτέλεσμα την κίνηση σε 2 άξονες.



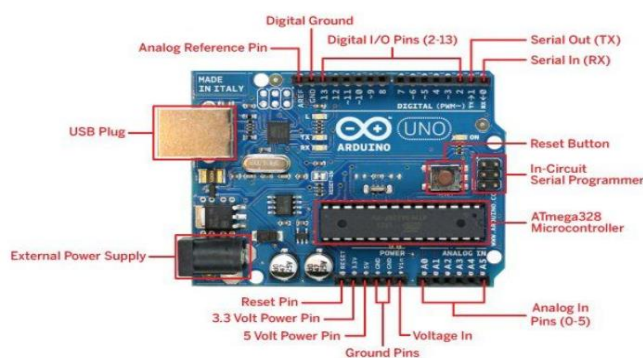
**Εικόνα 49:** Ακολουθητής ηλιακής ακτινοβολίας 2 αξόνων

Πηγή: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-21-S3-A401&id=252553>

Στην εν λόγω περίπτωση που περιγράφεται πρόκειται για έναν ενεργό ακολουθητή με δυνατότητα κίνησης σε 2 άξονες, ο οποίος ελέγχεται μέσω ενός μικροελεγκτή Arduino. Η λογική του ηλιακού ακολουθητή είναι πως στρέφεται συνεχώς προς την πιο δυνατή πηγή φωτός. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιούνται αισθητήρες φωτός.

### 6.3 Μικροεπεξεργαστής και τμήματα του

Ο μικροεπεξεργαστής που χρειάζεται για τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ένας Arduino Uno.

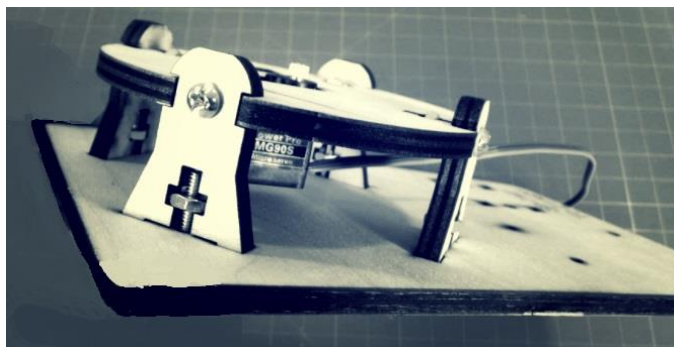


Εικόνα 50: Μικροεπεξεργαστής Arduino Uno και τα pins του

Πηγή: <https://github.com/ellak-monades-aristeias/CruiseCabinDigitalSignage/blob/master/Hardware/ArduinoUNO.md>

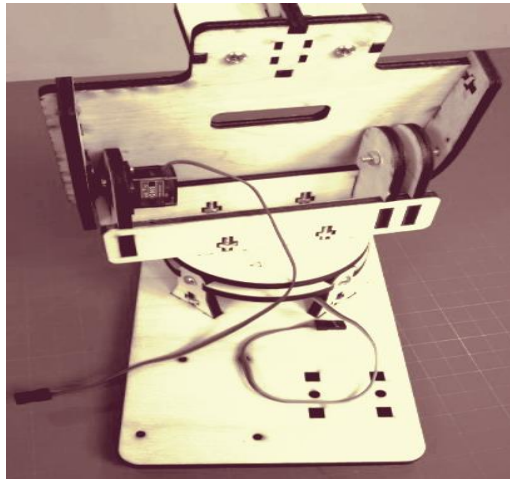
Τα μέρη που απαρτίζουν το σκελετό του φωτοβολταϊκού περιγράφονται παρακάτω:

Η βάση στρέφεται μέσω του κινητήρα παράλληλα σε σχέση με το δαπέδο όπως φαίνεται στις εικόνες:



Εικόνα 51: Φωτογραφία του πρώτου κινητήρα

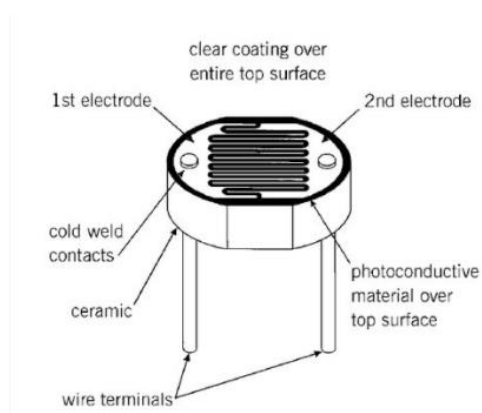
Το επάνω μέρος του σκελετού περιστρέφεται από την άλλη κάθετα σε σχέση με την επιφάνεια του δαπέδου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 52: Αποψη του επάνω μέρους του σκελετού/δεύτερος κινητήρας

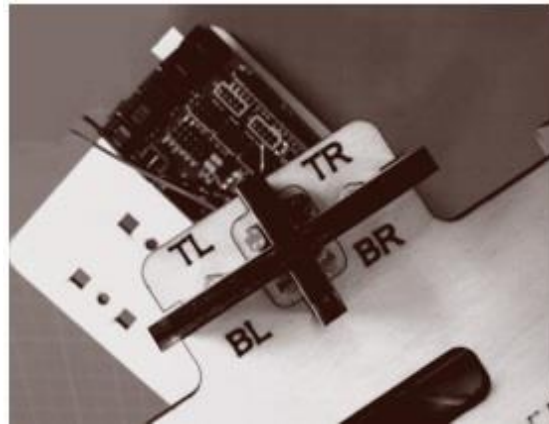
## 6.4 Φωτοαντίσταση

Η φωτοαντίσταση είναι ένα είδος μεταβλητής αντίστασης που η τιμή της εξαρτάται και μεταβάλλεται ανάλογα με το φως που προσπίπτει σε αυτή.

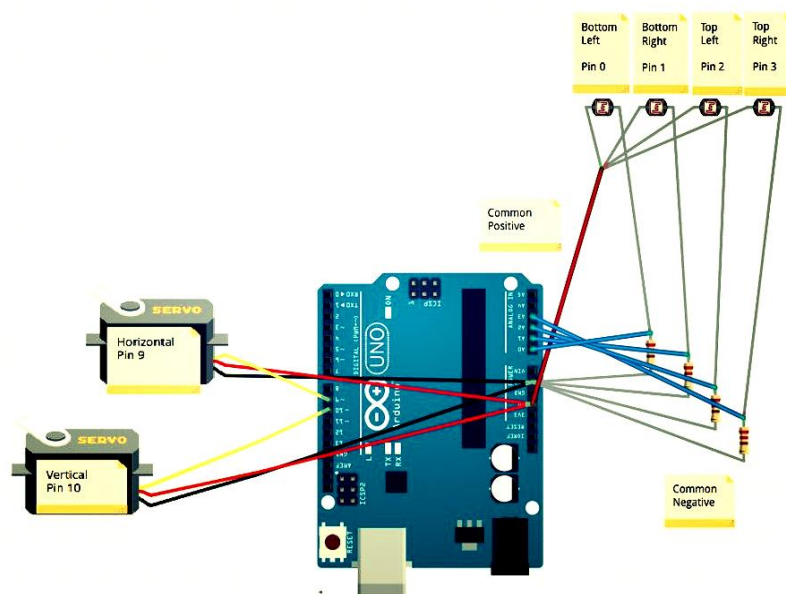


Εικόνα 53: Φωτοαντίσταση και τα τμήματά της

Στη συνέχεια φαίνεται ο τρόπος που έχουν συνδεθεί οι φωτοαντιστάσεις στο σκελετό του φωτοβολταϊκού ούτως ώστε να προσμετράται η ένταση του φωτός από κάθε κατεύθυνση:



Εικόνα 54: Σύνδεση της φωτοαντίστασης με τον σκελετό του συστήματος



Εικόνα 55: Τρόπος σύνδεσης των κινητήρων στα pins του Arduino

Πηγή : [16]

Ο ενδεικτικός κώδικας για τη λειτουργία είναι ο παρακάτω:

```
#include // Η βιβλιοθήκη του σερβοκινητήρα

// 180 οριζόντιος MAX
Servo horizontal; // Οριζόντιος σέρβο

int shorizontal = 180; // Θέση οριζόντιου σέρβο

int shorizontallimitH = 180;
int shorizontallimitL = 65;

// 65 μοίρες MAX
Servo vertical; // Κάθετος σέρβο

int svertical = 45; // Θέση κάθετου σερβοκινητήρα

int sverticalLimitH = 80;
int sverticalLimitL = 15;

// pin συνδέσεων αισθητήρων LDR
// name = analogpin;

int ldrlt = 0; //LDR top left - BOTTOM LEFT κάτω αριστερά ακροδέκτης

int ldrrt = 1; //LDR top right - BOTTOM RIGHT κάτω δεξιά ακροδέκτης

int ldrlld = 2; //LDR down left - TOP LEFT πάνω αριστερά ακροδέκτης

int ldrrd = 3; //ldr down right - TOP RIGHT πάνω δεξιά ακροδέκτης

void setup()
{ Serial.begin(9600);

// servo connections

// name.attach(pin);

horizontal.attach(9);

vertical.attach(10);

horizontal.write(180);

vertical.write(45);

delay(3000);

}

void loop()
{ int lt = analogRead(ldrlt); // πάνω αριστερά

int rt = analogRead(ldrrt); // πάνω δεξιά
```

```

int ld = analogRead(ldrld); // κάτω αριστερά

int rd = analogRead(ldrrd); // κάτω δεξιά

// int dtime = analogRead(4)/20; // read potentiometers

// int tol = analogRead(5)/4;

int dtime = 10; int tol = 50;

int avt = (lt + rt) / 2; // υπολογισμός μέσης τιμή πάνω

int avd = (ld + rd) / 2; // μέση τιμή κάτω

int avl = (lt + ld) / 2; // μέση τιμή αριστερά

int avr = (rt + rd) / 2; // μέση τιμή δεξιά

int dvert = avt - avd; // έλεγχος διαφοράς πάνω και κάτω τιμών

int dhoriz = avl - avr; // έλεγχος διαφοράς τιμών μεταξύ αριστερά και δεξιά

Serial.print(avt);

Serial.print(" ");

Serial.print(avd);

Serial.print(" ");

Serial.print(avl);

Serial.print(" ");

Serial.print(avr);

Serial.print(" ");

Serial.print(dtime);

Serial.print(" ");

Serial.print(tol);

Serial.println(" ");

if (-1*tol > dvert || dvert > tol) //Έλεγχος αν η διαφορά είναι σε ανεκτά επίπεδα, διαφορετικά αλλάζει η κάθετη κλίση

if (avt > avd)

{

```

```

svertical = ++svertical;

if (svertical > sverticalLimitH)
{
svertical = sverticalLimitH;
}
}

else if (avt < avd)
{
svertical= --svertical;

if (svertical < sverticalLimitL)
{
svertical = sverticalLimitL;
}
}

vertical.write(svertical);
}

if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // Έλεγχος διαφοράς σε οριζόντιο επίπεδο
{
if (avl > avr)
{
shorizontal = --shorizontal;

if (shorizontal < shorizontalLimitL)
{
shorizontal = shorizontalLimitL;
}
}
}

```



```

else if (avl < avr)
{
shorizontal = ++shorizontal;

if (shorizontal > shorizontalLimitH)
{
shorizontal = shorizontalLimitH;
}
}

else if (avl = avr)
{
// nothing
}

horizontal.write(shorizontal);

}

delay(dtime); }

```

## 6.5 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία μελετήθηκε η βελτίωση της απόδοσης μια φωτοβολταϊκής συστοιχίας μέσω εύρεσης αλλά και διατήρησης του MPP(maximum power point). Η χρησιμοποίηση ενός μετατροπέα τάσης είναι κομβική διότι με τη βοήθεια του πηνίου μπορεί να ρυθμιστεί το φωτοβολταϊκό ρεύμα σε επιθυμητές τιμές.

Η χρησιμοποίηση των μετατροπέων τάσης γίνεται ανάλογα τις ανάγκες για τάση εξόδου. Αν αυτή είναι υψηλή (160V), ο μετατροπέας ανύψωσης μπορεί να συμβάλλει σε αυτό. Αν η τάση είναι χαμηλότερη των 150 V ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης κρίνεται χρήσιμος, ενώ τέλος μια σταθερή τάση εξόδου μπορεί να εφαρμοστεί μέσω μικτού DC-DC μετατροπέα.

Σχετικά με τους αλγόριθμους εύρεσης του μέγιστου σημείου ισχύος, ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης χρησιμοποιείται συχνά λόγω της απλής εφαρμογής του. Όμως, ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας είναι πιο ακριβής, λόγω του ότι υπολογίζει την κατεύθυνση κατά την οποία η τάση χρειάζεται να μεταθληθεί. Κάτω από απότομες αλλαγές στις καιρικές συνθήκες μπορούν πιο εύκολα να αποφευχθούν πιθανές εσφαλμένες μεταβολές της τάσης με τη χρήση του 2<sup>ου</sup> αλγορίθμου.

Τα υβριδικά συστήματα έχουν ιδιαίτερη συμβολή στην προσπάθεια για αποδοτικότητα, δηλαδή την εκμετάλλευση της ενέργειας που μεταφέρεται μέσω της ακτινοβολίας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Στον τύπο που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση μεγάλο ρόλο παίζουν οι θερμοκρασιακές και οι καιρικές συνθήκες.

Οι περιπτώσεις του ηλιακού ακολουθητή (solar tracker) και του μετατροπέα ανύψωσης είναι επιλογές κυκλωμάτων που χωρίς μεγάλο κόστος μπορούν να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ακτινοβολία.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zadeh L., 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, 8:338-353.
- [2] Τσιλιγκιρίδης, Γ. (2008α). Διδακτικές σημειώσεις: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [3] Intelligent Solar Tracking Control System Implemented on an FPGA, Participants: Zhang Xinhong-wu Zongxian-Yu Zhengda, Institution: Institute of Electrical Engineering, Yuan Ze University
- [4] Σημειώσεις ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΝΤΟΥΝΗΣ, ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού ΤΕ Τομέας Βιομηχανικής Πληροφορικής, 2013
- [5] <http://slideplayer.gr/slide/2596087/>
- [6] Χαραλαμπόπουλος, Γ. (2009). Εσοδομείν: Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων & εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκδόσεις Ψύχαλου, Αθήνα.
- [7] Μελέτη και κατασκευή μετατροπέα dc-dc, Μαρκαναστασάκης Γεώργιος-Καψίμαλης Γεώργιος
- [8] M. Bodur and M. Ermis, Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels, in Proc. 7th Mediterranean Electrotechnical Conf., 1994, pp. 758–761
- [9] <http://www.helleniccollege.gr/works/helcolpedia/projects/energy/production/photovoltaic-kiratzis-2013.pdf>
- [10] ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Χατζηαντωνίου Κωνσταντίνος-Χρυσικού Χρυσάνθη, ΑΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ -Πτυχιακή Εργασία
- [11] <https://github.com/ellak-monades-aristeias/CruiseCabinDigitalSignage/blob/master/Hardware/ArduinoUNO.md>
- [12] [G. Escobar, C.N.M Ho, S. Pattersson, Maximum power point searching method for partial shaded PV strings, in 38<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 5726-5731
- [13] [https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en\\_US/portal/dsn/42/doc-us-dsnbk-42-4904342209-de1-usermanual.pdf](https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/portal/dsn/42/doc-us-dsnbk-42-4904342209-de1-usermanual.pdf)
- [14] <https://el.wikipedia.org/wiki/FPGA>
- [15] <http://www.koubarakis.gr/el/articles/197>
- [16] <http://www.instructables.com/id/Simple-Dual-Axis-Solar-Tracker/>
- [17] «Σχεδίαση Διαδραστικών και Βιομηχανικών Προϊόντων και Συστημάτων» στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου Κόκκαλης Θωμάς , ΘΕΜΑ: <<Εκτίμηση της απόδοσης φωτοβολταϊκού με τη χρήση συστήματος παρακολούθησης του ηλίου και αξιολόγησή του >>, Φεβρουάριος 2009
- [18] <http://energy.reporter.com.cy/>
- [19] [https://ocp.teiath.gr/.../9\\_Συστήματα\\_Ασαφούς\\_Λογικής\\_%28Χειμερινό\\_13%29.pptx](https://ocp.teiath.gr/.../9_Συστήματα_Ασαφούς_Λογικής_%28Χειμερινό_13%29.pptx)
- [20] <http://energy-industry.gr>

- [21] ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Αντωνίου Ευθύμιος-Τσέρνιχ Ελπίδα, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα καβαλας , Πτυχιακή Εργασία
- [22]<http://energy-industry.gr> {διαδικτυακή πύλη για θέματα γύρω από την ενέργεια και τη βιομηχανία}
- [23] Μελέτη καθορισμού των βέλτιστων σημείων λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών Κοσμά Χρήστου του Μιχαήλ Οκτώβριος 2010
- [24]<http://energy.reporter.com.cy/article/71477/fotovolta%CF%8Ako-fainomeno-ti-einai-kai-pos-exypiretei-ti-zoi-mas->
- [25] H. A. Zondag et al, The yield of different combined PV-thermal collector designs, Solar Energy Vol. 74, pp. 253–269 (2003).
- [26] <http://www.ecotec.gr/article.php?ID=250>
- [27] <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>
- [28] <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html> {2015 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc}
- [29] BALKAN JOURNAL OF ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING, 2014, Vol.2, No.1 , Photovoltaic Power Control Using MPPT and Boost Converter, A.Attou, A.Massoum and M.Saidi
- [30] Educational videos, Perturb and Observe MPPT for Solar PV with Boost Converter { <https://www.youtube.com/watch?v=jPBjw91Tq34&t=36s> }
- [31] Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων, [Σωκράτης Ν. Καπλάνης](#) Έκδοση: 2004 από "[Ιων](#)"
- [32] Kazmi, S., Goto, H., Ichinokura, O., Guo, H.-J.: An improved and very efficient MPPT controller for PV systems subjected to rapidly varying atmospheric conditions and partial shading. In: Power Engineering Conference (2009)
- [33] N. Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley, 2002
- [34] DESIGN OF A MAXIMUM POWER POINT TRACKER WITH SIMULATION, ANALYSIS, AND COMPARISON OF ALGORITHMS, MONTEREY, CALIFORNIA, December 2012
- [35] Σχεδίαση Ανιχνευτή Σημείου Μέγισ της Ισχύος Φ/Β Συστοιχίας μέσω Διακριτού Μοντελοποιημένου Προβλεπτικού Ελεγκτή Ρεύματος για Αποδοτική Λειτουργία υπό Ραγδαία Μεταβαλλόμενες Ατμοσφαιρικές Συνθήκες και Μερική Σκίαση, Ρενιέρης Βασίλειος, Μάρτιος 2013
- [36] Αποστολοπούλου, Α. (2013). Σύνθετες διατάξεις φωτοβολταϊκών και θερμικών συσκευών. Τμήμα Φυσικής. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [37] ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ Θεόδωρης Καραπάντσιος {[http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/heat\\_exchangers/heat01.pdf](http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/heat_exchangers/heat01.pdf)}
- [38] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών. (2011). Φωτοβολταϊκά: Ένας πρακτικός οδηγός. { [http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv\\_guide\\_jan11.pdf](http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv_guide_jan11.pdf) }
- [39] clean energy reviews { <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/8/14/what-is-hybrid-solar> }
- [40] N. Mohan et al., Power Electronics-Converters, Applications and Design. New

York: Wiley, 1989.

[41] M. Salhi, R. El-Bachtiri, A Maximum Power Point Tracking Photovoltaic System using a Proportional Integral Regulator, Science Academy Transactions on Renewable Energy Systems Engineering and Technology, Vol.1, No. 2, June 2011.

[42] Εναλλακτικές μορφές ενέργειας Φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά συστήματα, υβριδικά συστήματα Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης

Τζιόλα, 2010

[43] Φωτοβολταϊκά συστήματα Ι. Ε. Φραγκιαδάκης ,Ζήτη, 2007