



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Παρουσίαση μελέτης φβ πάρκου και τεχνικές τεχνητής
νοημοσύνης για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και για
ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Θοδωρής Τοκατλίδης

Επιβλέπουσα: Ασπασία Δασκαλοπούλου

Σεπτέμβριος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

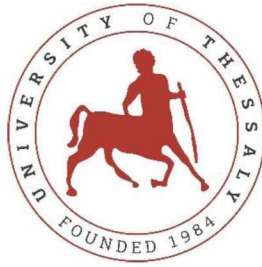
**Παρουσίαση μελέτης φωτοβολταϊκού πάρκου και
τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για φωτοβολταϊκές
εφαρμογές και για ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Θοδωρής Τοκατλίδης

Επιβλέπουσα: Ασπασία Δασκαλοπούλου

Σεπτέμβριος 2021



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Presentation of a photovoltaic park study and artificial
intelligence techniques for photovoltaic applications and
renewable energy systems**

Diploma Thesis

Thodoris Tokatlidis

Supervisor: Aspasia Daskalopulu

September 2021

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπουσα

Δασκαλοπούλου Ασπασία

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

Μέλος

Μπαργιώτας Δημήτριος

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

Μέλος

Παναπακίδης Ιωάννης

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρος Καθηγήτρια Ασπασία Δασκαλοπούλου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί της. Επίσης θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την καθοδήγησή της, τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και για τις χρήσιμες συμβουλές της, για τον επαγγελματικό μου προσανατολισμό.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Μανιάτη για το χρόνο που διέθεσε για να με ενημερώσει για το μέλλον της πράσινης ενέργειας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και κυρίως την οικογένειά μου για την υπομονή και για όλη την στήριξη που έδειξαν στο πρόσωπο μου, όλα αυτά τα χρόνια ακόμα και τις στιγμές που εγώ δεν το έκανα.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Ο Δηλών



Θοδωρής Τοκατλίδης

15/09/2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι οι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, χωρίς τη χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων (ορυκτοί άνθρακες, φυσικό αέριο, αργό πετρέλαιο). Ο τομέας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικούς και ταχέως αναπτυσσόμενους τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Παράλληλη είναι και η ανάπτυξη και η εισβολή της τεχνητής νοημοσύνης στην παραγωγή της πράσινης ενέργειας. Στην παρούσα λοιπόν διπλωματική εργασία, θα παρουσιαστεί ένας γενικός οδηγός μελέτης ενός φωτοβολταϊκού έργου, το οποίο αποτελεί έναν βασικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία, με στοιχεία βασισμένα σε εργασιακή εμπειρία. Επιπλέον θα γίνει αναφορά για τις εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στα φωτοβολταϊκά έργα, καθώς και στα ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας.

ABSTRACT

Renewable Energy Sources (RES) are alternative ways of generating electricity without the use of conventional fuels (fossil coal, natural gas, crude oil). The RES electricity generation sector is one of the most dynamic and rapidly growing sectors of the global economy. At the same time artificial intelligence is developing and invading in the production of green energy. In the present dissertation, a general study guide of photovoltaic project will be presented, which is a basic way of generating electricity from solar radiation, with data based on work experience. Reference will also be made to the applications of artificial intelligence in photovoltaic projects, as well as in renewable energy systems.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	x
ABSTRACT	xii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
Εισαγωγή	6
1.1 Ανάπτυξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	6
1.2 Ηλιακή Ενέργεια	7
1.3 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία	8
1.4 Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	10
1.5 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (Συστοιχία)	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
Φωτοβολταϊκό Πάρκο	13
2.1 Διαδικασίες αδειοδότησης φωτοβολταϊκού πάρκου	13
2.1.1 Έκδοση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	14
2.1.2 Άδεια εγκατάστασης.....	15
2.1.3 Άδεια λειτουργίας.....	15
2.2 Μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου	16
2.2.1 Χωροθέτηση.....	16
2.2.2 Υποσταθμός Μέσης Τάσης	17
2.2.3 Γείωση.....	20
2.2.4 Ομαδοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων	21
2.2.5 Καλωδιώσεις.....	22
2.2.6 Ηλεκτρική Εγκατάσταση	23

2.2.7 Σύστημα Τηλεμετρίας	26
2.2.8 Αντιστροφείς.....	27
2.3 Σύστημα ελέγχου του μετατροπέα	29
2.3.1 Βαθμός απόδοσης ενός inverter	29
2.3.2 Maximum Power Point Tracking.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	34
<i>Τεχνητή νοημοσύνη στα Φωτοβολταϊκά πάρκα</i>	34
3.1 Τεχνητή Νοημοσύνη	34
3.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks).....	34
3.2.1 Εισαγωγή	35
3.2.2 Artificial Neural Networks και Maximum Power Point Tracking	36
3.2.3 Sizing	42
3.2.4 Monitoring (Παρακολούθηση)	45
3.3 Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic).....	48
3.3.1 Εισαγωγή	48
3.3.2 Fuzzy logic and Maximum Power Point Tracking	49
3.4 Drones για ευφυή παρακολούθηση φωτοβολταϊκού πάρκου.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	53
<i>Τεχνητή νοημοσύνη και ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας</i>	53
4.1 Τεχνητή νοημοσύνη για προγνωστική συντήρηση ανανεώσιμων συστημάτων ενέργειας	53
4.1.1 Wind και Fuzzy Logic.....	54
4.1.2 Bio-Energy and Fuzzy logic.....	56
4.1.3 Hybrid Systems and Fuzzy logic	57
4.2 Μελλοντικές προτάσεις για εφαρμογές Artificial Intelligence	58
4.3 Το υδρογόνο σαν μελλοντική πηγή ενέργειας	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	61
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ. [3]	8
Σχήμα 2: Βασική δομή ηλιακού κελιού. [2].....	10
Σχήμα 3: Τυπική 24ωρη μεταβολή ηλιακής ενέργειας. [8]	30
Σχήμα 4: Διάγραμμα του ελεγκτή MPPT. [9].....	31
Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής της μεθόδου P&O. [10].....	37
Σχήμα 6: Η αναπτυγμένη διαμόρφωση ANN χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό κύκλου λειτουργίας στο MPP. [10]	38
Σχήμα 7: Φωτοβολταϊκά χαρακτηριστικά σε διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. [10]	38
Σχήμα 8: IV χαρακτηριστικά κάτω από διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. [10]	39
Σχήμα 9: Σχεδιάγραμμα αρχιτεκτονικής του συστήματος (φ/β σύστημα – μηχανή επαγωγής). [11].....	40
Σχήμα 10: Η διαμόρφωση του ANN χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής τάσης αναφοράς στο MPP. [11].....	41
Σχήμα 11: Οι σχετικές τιμές σφάλματος για δείγματα δοκιμών σε ένα εκπαιδευμένο ANN α) χωρίς βελτιστοποίηση GA και β) με GA βελτιστοποίηση . [11]	42
Σχήμα 12: Αρχιτεκτονική προσαρμοστικού δικτύου RBF-IIR. [12]	44
Σχήμα 13: Κανονικοποιημένο τετραγωνικό σφάλμα. [12].....	45
Σχήμα 14: Πλήρες σύστημα φ/β πάνελ με αισθητήρες, καταγραφή δεδομένων και σύστημα παρακολούθησης. [13].....	46
Σχήμα 15: Δομή του ANN. [13].....	47
Σχήμα 16: Διάγραμμα ροής προγράμματος συστήματος παρακολούθησης. [13]	48
Σχήμα 17: επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας για συνεχή θερμοκρασία (αριστερό σχήμα) – επίδραση θερμοκρασίας για συνεχή ηλιακή ακτινοβολία (δεξιό σχήμα). [14]	49
Σχήμα 18: Γενικό διάγραμμα του ελεγκτή. [14]	50
Σχήμα 19: Fuzzy and P&O controller responses, για γρήγορη αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (500 W/m^2 σε 5 δευτερόλεπτα στους 25 βαθμούς κελσίου). [14].....	51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πίνακας μέσης τάσης. (https://www.vimepp.gr/pinakes-mesis-tasis/).....	17
Εικόνα 2: Μετασηματιστής ισχύος του Υ/Σ. (http://www.gproject.gr/el/%CF%85%CF%80%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9.html)	18
Εικόνα 3: Πίνακας χαμηλής τάσης. (http://www.nrg-orion.gr/erga51.php)	18
Εικόνα 4: MCT4 (https://www.officepc.gr/product-category/energeiaka/kalodia-vysmata/)	24
Εικόνα 5: Τριφασικός Inverter Huawei Sun2000-60KTL. (https://www.estg.eu/en-gb/huawei-inverter-sun2000-60ktl-m0/).....	28
Εικόνα 6: Τριφασικός, Kaco αντριστροφέας. (https://www.oleng.eu/inberter-kaco)	29
Εικόνα 7: Ρυθμιστής φόρτισης VICTRON MPPT BLUE SOLAR 100/50 (12/24V-50A).	32

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Απαιτούμενες ενέργειες για την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων. [5]..... 14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Ανάπτυξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η κλιματική κρίση που βιώνουμε, κάνει επιτακτική την ανάγκη αναζήτησης και αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας, πιο φιλικές για το περιβάλλον. Η ηλιακή, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας προερχόμενες από φυσικές διαδικασίες, αποτελούν τέτοιες μορφές ενέργειας και ονομάζονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή πράσινη ενέργεια. Κατά κύριο λόγο οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται στην ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο. Η εκμετάλλευσή τους δεν είναι επιβλαβής για το περιβάλλον, διότι αξιοποιείται η ήδη υπάρχουσα ροή της φυσικής ενέργειας, σε αντίθεση με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Πρόκειται για «καθαρές» πηγές ενέργειας. Με τον όρο καθαρές εννοούμε ότι δεν απελευθερώνουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά ραδιενεργά απόβλητα, που είναι επιβλαβή για τον πλανήτη μας.

Η διαδικασία της εξόρυξης, της καύσης ή της άντλησης είναι διαδικασίες επιζήμιες για το περιβάλλον μας και παράγουν μολυσματικούς ρύπους. Για αυτό πρέπει να βρεθούν λύσεις άμεσα πριν γίνει η κατάσταση μη αντιστρέψιμη.

Το δυναμικό που προσφέρει η αξιοποίηση της ενέργειας από τις ΑΠΕ είναι μεγαλύτερο από την παγκόσμια ανάγκη κατανάλωσης ενέργειας που υπάρχει. Για αυτόν λοιπόν είναι σημαντικό να αξιοποιηθεί η ενέργεια που υπάρχει στη φύση με εναλλακτικούς τρόπους.

Η κατασκευή εφαρμογών όμως για την αξιοποίηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας είναι πολυέξοδη και σε συνδυασμό με τα τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της εφαρμογής τους, μπαίνουν εμπόδιο και δεν βοηθούν ακόμη στην αποτελεσματική και ολοκληρωτική αξιοποίηση τους.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ΑΠΕ: [1]

Πλεονεκτήματα:

- 1) Δεν είναι επιβλαβείς προς το περιβάλλον, γιατί δεν παράγουν κατάλοιπα και απόβλητα.

2) Είναι ανεξάντλητες, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που είναι περιορισμένα.

Μειονεκτήματα:

- 1) Ο συντελεστής απόδοσης είναι μικρός, περίπου 30% ή και χαμηλότερος. Απαιτείται λοιπόν μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό ο ρόλος τους είναι συμπληρωματικός.
- 2) Η εποχή του έτους επηρεάζει την απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας. Επίσης το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται παίζουν σημαντικό παράγοντα στην απόδοση.

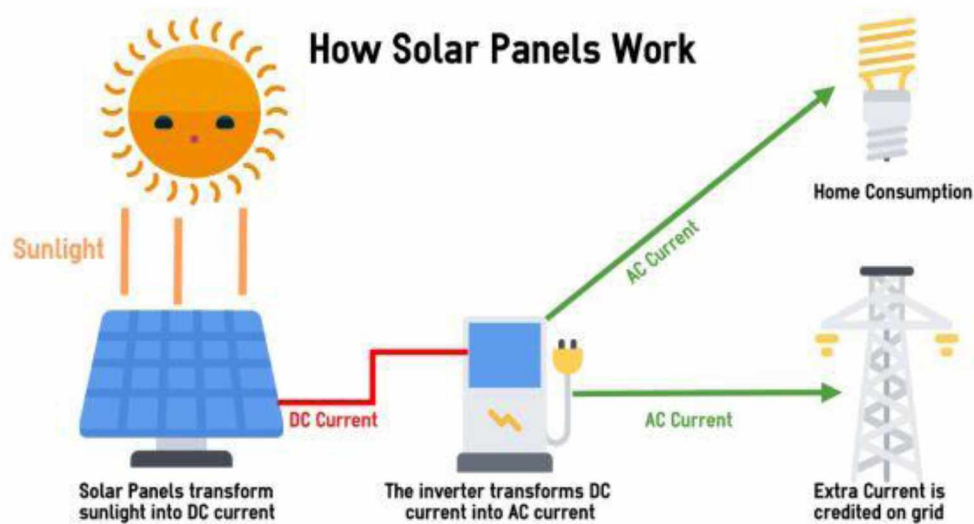
1.2 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια ατελείωτη πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση με την ενέργεια ορυκτών καυσίμων, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αντιπροσωπεύει έναν «καθαρό» τύπο ενέργειας, μία πολύτιμη πηγή ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για τη ζωή στη Γη και χρησιμεύει ως βάση για σχεδόν όλους τους άλλους τύπους ενέργειας.

Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια της Γης είναι τεράστια: η ενέργεια που αποθηκεύεται στα αποθέματα άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου στον κόσμο είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που παράγεται από είκοσι ημέρες ηλιοφάνειας. Η ενέργεια του ήλιου είναι περίπου 1,3kW /τ.μ πέρα από την ατμόσφαιρα της Γης. Η ατμόσφαιρα απορροφά μια ποσότητα αυτής της ενέργειας και σχεδόν ένα τρίτο αυτής ανακλάται πίσω στο διάστημα. Η ισχύς της ηλιακής ενέργειας φτάνοντας στην ατμόσφαιρα ,το μεσημέρι και κάτω από έναν καθαρό ουρανό, ελαττώνεται σε περίπου 1kW/τ.μ. Αν λάβουμε υπόψη τη συνολική επιφάνεια του πλανήτη, κάθε τ.μ. δέχεται περίπου 4,2kWh την ημέρα, κατά μέσο όρο. Η οριζόντια ένταση της ακτινοβολίας το μεσημέρι σε μια κανονική ημέρα, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο του σημείο, είναι 1kW / τ.μ.[2] Η ένταση παρουσιάζει μεταβολές, αλλά ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και την εποχή του χρόνου λόγω της περιστροφής της γης. Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια της ημέρας υπάρχει μια επαρκής παραγωγή ενέργειας και το βράδυ λόγω της έλλειψης του ήλιου υπάρχει μηδενική παραγωγή.

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται συχνότερα σε φωτοβολταϊκές γεννήτριες, στις οποίες η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρισμό, ή σε ηλιακούς συλλέκτες, που συγκεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες για να παράγουν υψηλές θερμοκρασίες.

Το ηλιακό φως που εισέρχεται στα ηλιακά πάνελ χτυπά έναν ημιαγωγό πυριτίου, το οποίο προκαλεί την κίνηση των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Το συνεχές ρεύμα DC που δημιουργείται από τον inverter μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το οικιακό δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ. [2]

1.3 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

Ο Γάλλος φυσικός Edmund Becquerel ανακάλυψε ότι κάτω από ηλιακή ακτινοβολία συγκεκριμένα υλικά έχουν την δυνατότητα να παράξουν σπινθήρες ηλεκτρισμού. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται από τους ηλιακούς συλλέκτες ηλεκτρικό ρεύμα, έτοιμο για χρήση, μέσω μιας διαδικασίας, γνωστή ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω σε έναν ημιαγωγό πυριτίου κινητοποιώντας έτσι τα ηλεκτρόνια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα (DC) που παράγεται μέσω του ηλεκτρικού μετατροπέα (inverter), μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα οικιακά

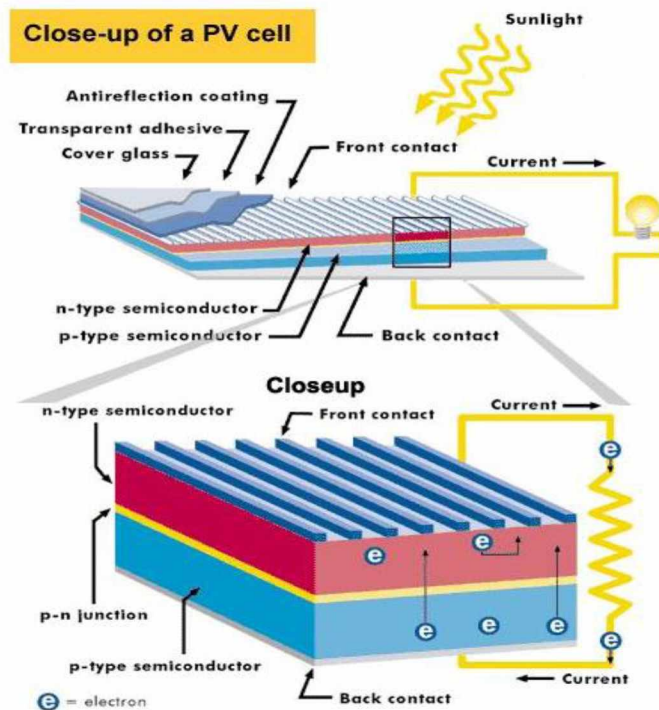
δίκτυα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Εφαρμόστηκε σε «πρωτόγονα» ηλιακά κελιά (Σχήμα 2) από σελήνιο στα τέλη του 18ου αιώνα.

Το φως που πέφτει σε μία επιφάνεια ή διαπερνά την επιφάνεια αυτή είτε απορροφάται από το υλικό της ή ανακλάται. Η απορρόφηση του φωτός, στην ουσία πρόκειται για την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ενέργειας) και συνήθως είναι θερμότητα.

Η προσπίπτουσα ενέργεια μέσω κάποιων υλικών μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Αυτά τα υλικά είναι ημιαγωγοί. [3]

Ένα ηλιακό κελί έχει δύο πολύ σημαντικά μέρη. Πρόκειται για δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού και αποτελούνται από κρυστάλλους πυριτίου. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο όταν προστίθενται σε αυτό διάφορες προσμίξεις, προκύπτουν κατάλληλες προϋποθέσεις για την παραγωγή ηλεκτρισμού γιατί γίνεται καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Οι δεσμοί πυριτίου, οι οποίοι ευθύνονται για την ανάπτυξη θετικού φορτίου (p), δημιουργούνται από την προσθήκη βορίου στο κάτω στρώμα του ηλιακού κελιού. Για το πάνω στρώμα του ηλιακού κελιού ο φώσφορος που προστίθεται δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο και σαν αποτέλεσμα αναπτύσσεται αρνητικό φορτίο (n). Η επιφάνεια μεταξύ θετικού (p) και αρνητικού (n) φορτίου που δημιουργείται μεταξύ των ημιαγωγών, ονομάζεται p-n επαφή.

Το ηλιακό φως που εισέρχεται στο ηλιακό κελί, απελευθερώνει ελεύθερα ηλεκτρόνια και στα δύο επίπεδα. Εξαιτίας των διαφορετικών πόσεων φόρτισης των δύο στρωμάτων, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να προσπαθούν να μετακινηθούν από το στρώμα τύπου n στο στρώμα τύπου p αλλά έρχονται αντιμέτωπα με το εμπόδιο από το ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή p-n. Η παρουσία εξωτερικού κυκλώματος αποτελεί γέφυρα για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων από το ένα στρώμα στο άλλο. Καλώδια λεπτά σε διατομή κατά μήκος του στρώματος n επιτρέπουν την διέλευση ηλεκτρονίων και δημιουργείται ρεύμα από την κίνηση αυτή. [2]



Σχήμα 2: Βασική δομή ηλιακού κελιού. [4]

1.4 Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου (που αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3), τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παράγουν και να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια. Το βασικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το ηλιακό στοιχείο (solar cell) το οποίο αποτελείται από ημιαγωγό, συνήθως, πυρίτιο. Έχει φιλική λειτουργία προς το περιβάλλον και αν υπάρχει κατάλληλη προστασία της συσκευής από καιρικές συνθήκες θα έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων, που τα διακρίνουν από τις υπόλοιπες ΑΠΕ είναι: [1] & [5]

- Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται απευθείας, ακόμη και για μερικά δεκάδες Watt.
- Είναι εύχρηστα. Μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν ακόμα και από τους ίδιους τους χρήστες.
- Συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (π.χ. άνεμος). (υβριδικά συστήματα)

- Είναι εύκολα επεκτάσιμα, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών.
- Η λειτουργία της είναι αθόρυβη και έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- Οι απαιτήσεις για την συντήρησή τους είναι σχεδόν μηδενικές.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία στην προσδοκόμενη παραγωγή.
- Αποτελούν κερδοφόρες επενδύσεις, καθώς έχουν γρήγορη απόσβεση (περίπου 4-5 χρόνια).
- Παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία. Μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσβατες περιοχές, σε πλωτές εξέδρες και γενικά όπου το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ δεν συμφέρει οικονομικά να φτάσει.

1.5 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (Συστοιχία)

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (Φ/Β) αποτελείται από Φ/Β πλαίσια και ηλεκτρονικά συστήματα. Ο ρόλος τους στην εγκατάσταση είναι για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η φ/β συστοιχία. Ένα ή περισσότερα φ/β πλαίσια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους αποτελούν μία φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική όταν τα φ/β πλαίσια εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία. Ο όρος «συστοιχία» αναφέρεται σε όλα τα πλαίσια ενός Φ/Β συστήματος, στην καλωδίωση, στις διόδους τους, καθώς και στη βάση της συστοιχίας.

Ο συνολικός αριθμός των πάνελ που χρησιμοποιούνται σε ένα φωτοβολταϊκό έργο υπολογίζεται από τη διαίρεση της ονομαστικής ισχύς της εγκατάστασης προς τη μέγιστη ισχύ του πάνελ.

Για παράδειγμα σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση 100kW, αν χρησιμοποιήσουμε πάνελ με μέγιστη ισχύ 240W, ο συνολικός αριθμός των πάνελ είναι:

$$n = \frac{100000w}{240w} = 416 \text{ πάνελ}$$

Επομένως το φωτοβολταϊκό πάρκο θα έχει 416×240=99840 Wp. [6]

Τα φ/β πλαίσια αποτελούνται από ηλιακές κυψέλες. Μία συστοιχία είναι μία ομάδα πλαισίων και ένα πλαίσιο αποτελείται από πολλές κυψέλες ομαδοποιημένες.

Η σύνδεση των ηλιακών κυψελών είναι συνήθως σε σειρά. Το φ/β πλαίσιο αποτελεί τη μικρότερη αυτοτελή μονάδα στη συστοιχία. Το φ/β πλαίσιο είναι μία ομάδα κυψελών οι οποίες έχουν συνδεθεί και ομαδοποιηθεί μεταξύ τους. Στη συνέχεια έχουν τοποθετούνται σε ένα «κέλυφος» ως μια αυτόνομη μονάδα. Ο αριθμός των κυψελών από τις οποίες διαμορφώνεται ένα πλαίσιο ρυθμίζεται από τις ανάγκες τάσης του συστήματος και τα περισσότερα πλαίσια κατασκευάζονται σύμφωνα με τις τάσεις των χρησιμοποιούμενων μπαταριών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Φωτοβολταϊκό Πάρκο

2.1 Διαδικασίες αδειοδότησης φωτοβολταϊκού πάρκου

Ο πιθανός επενδυτής να έχει μελετήσει το κόστος της επένδυσής του και την δυνατότητα χρηματοδότησης είτε από το τραπεζικό σύστημα είτε από μόνος του, πριν την εκκίνηση της διαδικασίας αδειοδότησης. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης και διασύνδεσης δεν συμπεριλαμβάνεται στις επενδύσεις που επιδοτούνται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Οι κατηγορίες αδειοδότησης χωρίζονται βάση θέσης εγκατάστασης και ισχύς ενός Φ/Β συστήματος:

- Σε στέγες κτιρίων συστήματα έως και 10 kWp.
- Φ/Β συστήματα σε στέγες βιομηχανιών.
- Φ/Β συστήματα σε αγροτεμάχια.

Για την ολοκλήρωση του στόχου των Φ/Β συστημάτων που έχουν εγκατασταθεί στη χώρα μας μετά την ψήφιση και την εφαρμογή του Ν. 3468/06 και τις υπουργικές αποφάσεις που δημοσιεύθηκαν, έχουν υπάρξει αλλαγές στις διαδικασίες που αφορούν την αδειοδότηση και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Βασικό ρόλο παίζει η ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος για τις ακολουθούμενες διαδικασίες (Πίνακας 1).

- $\Phi/B \leq 20kWp$
- $20kWp \leq \Phi/B \leq 150kWp$
- $150kWp \leq \Phi/B \leq 2MWp$
- $2MWp \geq \Phi/B$

Πίνακας 1: Απαιτούμενες ενέργειες για την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων. [5]

ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ [kW _p]	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ (§ 10.3)
< 20	Σύμβαση σύνδεσης με τη ΔΕΗ. Σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με ΔΕΣΜΗΕ (για συνδεδεμένο σύστημα) ή με τη ΔΕΗ (για μη συνδεδεμένα νησιά).
20 - 150	Αίτηση στη ΡΑΕ για εξαιρέση από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής. Όπου υπάρχει κορεσμός του δικτύου απαιτείται άδεια παραγωγής. Έγκριση περιβαλλοντικών όρων. Έγκριση πολεοδομίας ότι η εγκατάσταση μπορεί να συνδεθεί με τη ΔΕΗ. Σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με ΔΕΣΜΗΕ ή με ΔΕΗ.
> 150	Άδεια παραγωγής. Άδεια εγκατάστασης. Άδεια λειτουργίας. Έγκριση περιβαλλοντικών όρων. Έγκριση πολεοδομίας ότι η εγκατάσταση μπορεί να συνδεθεί με τη ΔΕΗ. Σύμβαση σύνδεσης με τη ΔΕΗ. Σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με ΔΕΣΜΗΕ ή ΔΕΗ.
Σημειώσεις: 1) Τα οικήματα στέγασης του εξοπλισμού ελέγχου και των μετασχηματιστών δεν απαλλάσσονται από την υποχρέωση έκδοσης οικοδομικής άδειας. 2) Σύμφωνα με την απόφαση 136 (20/7/2006) της ΡΑΕ, μέχρι τον προσδιορισμό των κορεσμένων περιοχών του δικτύου και τον καθορισμό του περιορισμού απορρόφησης ισχύος σε αυτές, δεν υποβάλλονται αιτήσεις για εξαιρέση λήψης άδειας παραγωγής για τα νησιά, συμπεριλαμβανομένης και της Εύβοιας.	

2.1.1 Έκδοση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) κάθε δύο μήνες γίνεται υποβολή αιτήσεων για χορήγηση τη Άδειας.

Ο δυνητικός επενδυτής υποβάλλει στη ΡΑΕ:

- Αίτηση για έκδοση άδειας παραγωγής ηλ.ενέργειας
- Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Π.Π.Ε)

Η ΡΑΕ αφού αξιολογήσει θετικά το έργο, προωθεί στην αρμόδια αρχή για την περιβαλλοντική αδειοδότηση την ΠΠΕ, με στόχο τη χορήγηση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ).

Ο υπουργός Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής είναι υπεύθυνος για την έκδοση χορήγησης της Άδειας παραγωγής. Η απόφαση βγαίνει σε διάστημα εντός 15 ημερών από την στιγμή της θετικής αξιολόγησης της ΡΑΕ.

Η άδεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισχύει για 20-25 χρόνια και μπορεί να επεκταθεί και για άλλα τόσα.

Έπειτα, ο κάτοχος της Άδειας Παραγωγής υποβάλλει στον αρμόδιο Διαχειριστή (ΔΑΠΕΕΠ ΑΕ), αίτημα για την παρουσίαση προσφοράς σύνδεσης του σταθμού, το οποίο περιλαμβάνει περιγραφή του τρόπου σύνδεσης του σταθμού, όπως και του εκτιμώμενου χρόνου σύνδεσης. Η προσφορά σύνδεσης ισχύει για δύο έτη.

Ο χρόνος αναμονής για την σύνδεση του έργου ορίζεται ως 45 εργάσιμες μέρες από την υποβολή της αίτησης.

2.1.2 Άδεια εγκατάστασης

Ο επενδυτής υποβάλλει αίτηση έκδοσης άδειας εγκατάστασης στην οικία Περιφέρεια. Η γενική γραμματεία της Περιφέρειας, αφού καταθέσει ο επενδυτής όλες τις προσκομισμένες αναγκαίες εγκρίσεις που έχει συλλέξει από την αρμόδια αρχή, του εκδίδει την Άδεια Εγκατάστασης του έργου.

Σε περίπτωση που η κατασκευή του έργου βρίσκεται πάνω από το 50%, η άδεια εγκατάστασης έχει ισχύ για 2 έτη.

Η σύμβαση που υπογράφεται έχει διάρκεια 20-25 έτη.

2.1.3 Άδεια λειτουργίας

Σχετικά με την έκδοση της άδειας λειτουργίας, ο επενδυτής υποβάλει μία αίτηση στην Διεύθυνση Προγραμματισμού και Ανάπτυξης της οικείας Περιφέρειας, ύστερα από την ολοκλήρωση του κατασκευής του έργου. Αυτή η αίτηση είναι η Σύμβαση Σύνδεσης με το Σύστημα και την Σύμβαση Αγοραπωλησίας Ηλεκτρικής Ενέργειας .

Ύστερα, η Άδεια Λειτουργίας εκδίδεται από τον Γενικό Γραμματέα της οικείας Περιφέρειας και έχει ισχύ για 2 χρόνια.

2.2 Μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου

Στην συγκεκριμένη ενότητα της διπλωματικής εργασίας, θα δοθεί μία γενική εικόνα, για τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Παραδείγματα και συγκεκριμένες αναφορές που σημειώνονται σε ορισμένα βήματα είναι βασισμένα σε εργασιακή εμπειρία που έχει αποκτηθεί.

2.2.1 Χωροθέτηση

Περιοχές προτεραιότητας για τη χωροθέτηση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αποτελούν οι γυμνές και άγονες περιοχές της ηπειρωτικής και νησιωτικής χώρας. Οι περιοχές αυτές, βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο, μακριά από πόλεις και προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο.

Ορισμένες κατηγορίες περιοχών που ανήκουν στις ζώνες αποκλεισμού για τη χωροθέτηση φ/β εγκαταστάσεων είναι οι ακόλουθες:

- Οι περιοχές απολύτου προστασίας της φύσης
- Οι γεωργικές γαίες υψηλής παραγωγικότητας.

Σκοπός της μελέτης χωροθέτησης είναι να αποτυπωθούν οι ακριβείς θέσεις των βάσεων και των πλαισίων (τοποθετούνται σιδερένια πασαλάκια) από εξιδεικευμένο τοπογράφο. Με αυτόν τρόπο μπορεί να γίνει η βελτιστοποίηση του φωτοβολταϊκού πάρκου και να εξαλειφθούν οι απώλειες που έχουμε στην παραγωγή ενέργειας. Τέτοιες απώλειες μπορεί να προέρχονται από:

- Σκιάσεις από φυσικά εμπόδια,
- Σκιάσεις της ίδιας της εγκατάστασης,
- Μεταφορά ενέργειας (DC-AC).

Η διαδικασία της χωροθέτησης δεν είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Οι βασικές πληροφορίες που διαθέτουμε, είναι τα όρια του διαθέσιμου χώρου, τις κλίσεις και τις ιδιομορφίες του εδάφους, καθώς και τη βλάστηση της περιοχής. Μέσω αυτών, προχωράμε στην τοποθέτηση των πανέλων. Η χωροθέτηση γίνεται με την βοήθεια ενός εξιδεικευμένου τοπογράφου και του AUTOCAD, του γνωστού σχεδιαστικού προγράμματος.

Στη διαδικασία της χωροθέτησης λαμβάνονται υπόψιν ορισμένοι παράγοντες, όπως:

- η επιλογή του μέγιστου επιτρεπτού μήκους ενός string να ισούται με 120μ. Η επιλογή γίνεται επειδή επιθυμούμε η πτώση τάσης να διατηρείται σε ανεκτά όρια.
- η τοποθέτηση του υποσταθμού (Υ/Σ) μέσης τάσης. Για να εξοικονομήσουμε καλώδιο, συχνά το τοποθετούμε στο κέντρο του πάρκου.
- αποφυγή της χωροθέτησης σε περιοχές με μεγάλη κλίση εδάφους, έντονο ανάγλυφο, ύπαρξη πετρωμάτων και υδάτινων πόρων (ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις όμως είναι εφικτή η εγκατάσταση του φ/β συστήματος).
- η μεγάλη προσοχή που πρέπει να έχουμε όταν υπάρχει κάποιος αγωγός αερίου.

2.2.2 Υποσταθμός Μέσης Τάσης

Ο υποσταθμός (Υ/Σ) μέσης τάσης είναι απαραίτητος σε περιπτώσεις σύνδεσης Φ/Β σταθμών, στις οποίες η εγκατεστημένη ισχύ είναι μεγαλύτερη των 100kWp. Για την απευθείας σύνδεση του σταθμού στο δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ) 20kV του δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ, πρέπει λοιπόν να υπάρχει ο υποσταθμός στην εγκατάσταση.

Ένας υποσταθμός κατά κύριο λόγο αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

- Το τμήμα του ηλεκτρικού πίνακα μέσης τάσης (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Πίνακας μέσης τάσης. (<https://www.vimepp.gr/pinakes-mesis-tasis/>)

- Τον μετασχηματιστή ισχύος (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Μετασχηματιστής ισχύος του Υ/Σ.

(<http://www.gproject.gr/el/%CF%85%CF%80%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9.html>)

- Το γενικό πίνακα χαμηλής τάσης. Στους ηλεκτρολογικούς πίνακες χαμηλής τάσεως στον υποσταθμό υπάρχει προνόηση για την τροφοδότηση φωτισμού και ρευματοδοτών γενικής χρήσης (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Πίνακας χαμηλής τάσης.(<http://www.nrg-orion.gr/erga51.php>)

Μέσα προστασίας στη μέση και χαμηλή τάση στον υποσταθμό

Μέσα προστασίας είναι εκείνες οι συσκευές, οι οποίες διακόπτουν έγκαιρα και με ασφάλεια μία μη ομαλή κατάσταση λειτουργίας που θα προκύψει. Μία μη ομαλή κατάσταση μπορεί να προκληθεί από κάποια υπερφόρτιση, κάποιο βραχυκύκλωμα, ακόμα και από την έλλειψη τάσης ή την υπέρταση. Τέτοια μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται, είναι οι ασφάλειες και οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος. Οι ασφάλειες είναι μέσα προστασίας κατά των βραχυκυκλωμάτων, δηλαδή ρευμάτων τα οποία είναι πολλαπλάσια του ονομαστικού ρεύματος.

Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος είναι μέσα προστασίας που καταφέρνουν να προστατεύουν σε συνθήκες υπερφόρτισης, αλλά και σε βραχυκυκλώματα όπως οι ασφάλειες. Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος μπορούν να ρυθμίσουν τις χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας τους. Ο υπολογισμός των μέσων προστασίας γίνεται για να προσδιοριστεί η ονομαστική τιμή τους αλλά και η αντίδραση τους σε καταστάσεις μετάβασης. Στις ασφάλειες προσδιορίζεται η ονομαστική τους τιμή αλλά και η καμπύλη που προσδιορίζει το χρόνο διακοπής συναρτήσει του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Επίσης στους αυτόματους διακόπτες ισχύος προσδιορίζεται η ονομαστική τιμή τους και οι χρόνοι απόκρισής τους σε καταστάσεις υπερφόρτισης και βραχυκυκλώματος.

Για τους μετασχηματιστές υπάρχουν και άλλα ειδικά μέσα προστασίας τα οποία εφαρμόζονται ανάλογα με την περίπτωση. Τέτοια μέσα είναι η επιτήρηση της θερμοκρασίας, ο ηλεκτρονόμος Buchholz και η διαφορική προστασία.

Οι ειδικές αντιστάσεις μας βοηθάνε στην επιτήρηση της θερμοκρασίας. Σε περίπτωση υπέρβασης πάνω από κάποιο όριο διακόπεται η παροχή. Άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί να προκληθεί από ένα βραχυκύκλωμα ή ακόμη και από μία διαρκή υπερφόρτιση. Ο ηλεκτρονόμος Buchholz τοποθετείται μεταξύ του δοχείου λαδιού του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Ενεργοποιείται με την παρουσία αερίων καύσης λαδιού ή μόνωσης σε ένα χώρο του ή με την παρουσία αέρα σ' αυτόν. Τα αέρια καύσης προκαλούνται από βραχυκυκλώματα ή αστοχίες στη μόνωση του μετασχηματιστή. Ο αέρας οφείλεται σε κάποια διαρροή λαδιού. Για οικονομικούς λόγους εφαρμόζεται σε μετασχηματιστές ισχύος 800 kVA και πάνω ή σε περιπτώσεις που θα ζητηθεί. Η διαφορική προστασία είναι μία ιδιαίτερα πλήρης αλλά και ακριβής μέθοδος προστασίας. Με τη

μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να ανιχνευτούν σφάλματα τριφασικά, διφασικά, μονοφασικά, μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή καθώς και σφάλματα μεταξύ σπειρών ενός τυλίγματος. Μεταξύ άλλων και του είδους της παροχής του δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ όπως θα αναλυθεί παρακάτω [7], επηρεάζει την επιλογή του κατάλληλου μέσου προστασίας (ασφάλεια ή αυτόματος διακόπτης ισχύος).

2.2.3 Γείωση

Η αγώγιμη σύνδεση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μίας συσκευής που συνδέεται με ένα αγώγιμο σώμα ή γενικότερα με τη γη, ονομάζεται γείωση. Χρησιμοποιείται και έχει καίριο ρόλο για την προστασία του ανθρώπινου δυναμικού από τις τάσεις επαφής, διότι μηδενίζει την πιθανότητα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό δυναμικό σε κάποια επιφάνεια. Οποιαδήποτε ανθρώπινη επαφή με τις επιφάνειες αυτές (τάσεις επαφής), θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την ακαιρευότητά του.

Η γείωση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Στη γείωση λειτουργίας και στη γείωση προστασίας. Η γείωση του ουδέτερου κόμβου των μετασχηματιστών ονομάζεται γείωση λειτουργίας. Γείωση προστασίας ονομάζεται η γείωση των μεταλλικών περιβλημάτων των πινάκων, των καλωδίων κτλ.

Πιο αποδοτική γείωση σε ένα υποσταθμό θεωρείται η γείωση που μπαίνει κατά μήκος των θεμελίων. Αυτή η γείωση ονομάζεται θεμελιακή γείωση. Η διατομή του αγωγού γείωσης καθορίζεται από την αντοχή του αγωγού αυτού στο αναπτυσσόμενο ρεύμα κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Η θεμελιακή γείωση τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων και πιο συγκεκριμένα μέσα στο σκυρόδεμα (τσιμέντο). Μπορεί να είναι ταινία ή κυλινδρικός αγωγός. Καθώς συνδέεται με τον οπλισμό της εγκατάστασης αναπτύσσει χαμηλές τιμές αντίστασης, γιατί σχηματίζει ένα μεγάλο ηλεκτρόδιο γείωσης. Για ηλεκτρόδια θεμελιακής γείωσης χρησιμοποιούνται ταινίες από χάλυβα με διατομή 30 mm × 3.5 mm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης χαλύβδινοι αγωγοί κυκλικής διατομής με διάμετρο 10 mm. Χαμηλότερη αντίσταση γείωσης επιτυγχάνεται με την χρήση ταινίας. Τα εξαρτήματα με τα οποία συνδέουμε τους αγωγούς ή τις ταινίες μεταξύ τους, πρέπει να έχουν κατασκευαστεί από θερμά γαλβανισμένο ή ανοξειδωτο χάλυβα, να έχουν επίσης αντοχή στη διάβρωση και να είναι καλοί αγωγοί.

2.2.4 Ομαδοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Χαρακτηριστικά των πλαισίων όπως η τάση και η ένταση, καθώς και τα χαρακτηριστικά των αντιστροφέων παίζουν καθοριστικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο θα χωρίσουμε τα πλαίσια σε ομάδες.

Κατά τη διαδικασία ομαδοποίησης των φ/β πλαισίων και της δημιουργίας string (αριθμός πλαισίων συνδεδεμένων στη σειρά), πρέπει να «υπολογίσουμε» μερικούς παράγοντες:

- Συνίσταται σε κάθε αντιστροφέα, να δημιουργούμε ομάδες που αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό πλαισίων για να έχουμε την ίδια τάση στα άκρα κάθε string. Υπάρχουν inverters, στους οποίους μπορούμε να συνδέσουμε string με διαφορετικό αριθμό πλαισίων.
- Τα string που θα δημιουργηθούν από την ομαδοποίηση, θα πρέπει να έχουν στα άκρα τους, τέτοια τάση ανοιχτού κυκλώματος, η οποία να βρίσκεται εντός των ορίων λειτουργίας του αντιστροφέα.
- Η τάση στα άκρα κάθε string προσπαθούμε να πλησιάζει όσο το δυνατόν στα υψηλότερα όρια της λειτουργίας του inverter, έχοντας έτσι μεγαλύτερη απόδοση. Χαμηλή ακτινοβολία, δημιουργεί χαμηλή τάση στα άκρα κάθε string, άρα και μικρότερη απόδοση. Αν όμως η τάση μειωθεί στα άκρα ενός string κάτω από ένα κρίσιμο σημείο, ο αντιστροφέας θα βγει εκτός λειτουργίας. Η κρίσιμη ακτινοβολία που πρόκειται να θέσει εκτός λειτουργίας τον inverter είναι πιο χαμηλή, όσο πιο μεγάλη είναι η τάση λειτουργίας μετά την ομαδοποίηση.
- Οι αντιστροφείς έχουν μία μέγιστη ένταση που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή τους και η ομαδοποίηση των πλαισίων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην ξεπερνιέται η ένταση που έχει οριστεί.
- Ακόμα από τον κατασκευαστή, δίνεται η ονομαστική ισχύ εισόδου του συνεχούς ρεύματος. Όλοι οι αντιστροφείς διαθέτουν ένα ποσοστό υπερφόρτισης της τάξεως του 20%.

2.2.5 Καλωδιώσεις

Η επιλογή των σωστών καλωδιώσεων στην κατασκευή, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος όταν γίνεται η μελέτη της σχεδίασης, καθώς ο τύπος και η διατομή των καλωδίων είναι κύριος παράγοντας για την ασφάλεια των χρηστών και της εγκατάστασης. Επίσης η σωστή επιλογή παίζει καίριο ρόλο στην απόδοση και την μακροβιότητα του συστήματος. Όσον αφορά την καλωδίωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης, τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι καλώδια DC και AC.

Τα καλώδια DC, είναι συνηθέστερο να χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο, σε μέρη που πραγματοποιείται αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στα φωτοβολταϊκά και τις μπαταρίες. Ως επί το πλείστον είναι διπλά μονωμένα επειδή χρησιμοποιούνται κυρίως για εξωτερικές εφαρμογές. Η ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι καλύτερη από αυτή ενός καλωδίου AC.

Η απόφαση για τις διατομές των καλωδίων που θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση, γίνεται επιλεκτικά, έτσι ώστε οι ωμικές απώλειες που υπάρχουν λόγω της αντίστασης, να είναι μικρές.

Τα καλώδια DC χρησιμοποιούνται για να συνδέσουμε τα πάνελ μεταξύ τους, με σκοπό να δημιουργηθούν string. Έπειτα συνδέουμε τα string με τις εισόδους του αντιστροφέα, επίσης με χρήση καλωδίων DC σύμφωνα πάντα με την ηλεκτρολογική μελέτη που έχει γίνει.

Τα καλώδια AC συμβατικού τύπου, με τη σειρά τους, χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν οι αντιστροφείς σε τριφασικό σύστημα και για την τελική σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

Τα πάνελ έχουν στην πίσω πλευρά τους καλώδια DC, που αξιοποιούνται για τη μεταξύ τους σύνδεση σε σειρά. Έχουν προδιαγραφές για χρήση σε εξωτερικούς χώρους και για να αντέχουν σε καταπονήσεις που μπορούν να δεχτούν κατά την τοποθέτησή τους (χτύπημα της μόνωσης σε πετρώματα, ακτίνα αντοχής καλωδίων – σπάσιμο σε πολλή μεγάλη καμπή τους). Η διατομή τους είναι συνήθως 4mm² για πάνελ κατασκευασμένα από κρυσταλλικό πυρίτιο και μικρότερη, 1,5mm² για πάνελ από άμορφο πυρίτιο, εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος τους. Τα καλώδια αυτά χρησιμοποιούνται για την αποφυγή σφαλμάτων μεταξύ

θετικού και αρνητικού πόλου των φωτοβολταϊκών πάνελ ή σφαλμάτων γης και συνήθως είναι μονοπολικά με διπλή μόνωση. Για να διαθέτουν την απαραίτητη ευελιξία που χρειάζεται για τη σύνδεση τους, κατασκευάζονται πολύκλινα, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται γύρω στο 1m.

Επιπλέον, κατά τη διαδικασία κατασκευής του έργου, θα πρέπει να λαμβάνεται υπ όψη η προσεκτική όδευση των καλωδίων με γνώμονα τις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας, με γνώμονα τη γειτνίαση των καλωδίων, τη χρήση σωλήνων για την προστασία τους από τρωκτικά και χτυπήματα από πετρώματα.

Ιδιαίτερη μέριμνα ακόμα πρέπει να λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των πάνελ (δηλαδή από το (+) ενός πάνελ στο (-) του επόμενου κτλ) όσο και μεταξύ των string στις εισόδους του αντιστροφέα. Όταν η σύνδεση είναι χαλαρή, υπάρχει η πιθανότητα να εμφανιστεί τόξο το οποίο μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά. Επειδή υπάρχει ο κίνδυνος υψηλής DC τάσης, η εργασία σύνδεσης των καλωδίων πρέπει να πραγματοποιείται από έμπειρο εξειδικευμένο προσωπικό.

Για τη σύνδεση των Φ/Β πάνελ με τους αντιστροφείς, χρησιμοποιούμε καλώδια DC, συνήθως με διατομή, από 4 έως 16mm². Η διατομή του καλωδίου προσδιορίζεται από τις απώλειές του όπως προαναφέραμε και όχι από τη θερμική φόρτιση, η οποία είναι μικρή, γιατί τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν μικρό ρεύμα λειτουργίας. Επομένως, ο μελετητής είναι σημαντικό να προχωράει σε υπολογισμούς απωλειών, έχοντας λάβει υπόψη την γραμμική αύξηση με το μήκος των καλωδίων. Στις αποστάσεις αρκετών δεκάδων μέτρων που πρέπει παράλληλα να μεριμνήσουμε για την αντίσταση των καλωδίων, συνίσταται μεγάλη προσοχή. Είναι προτιμότερο επίσης να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρωματισμοί καλωδίων για το θετικό και αρνητικό.

2.2.6 Ηλεκτρική Εγκατάσταση

Καλωδίωση DC

Κάθε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων πρέπει να συνδεθεί με τον αντίστοιχο αντιστροφέα, όπως προβλέπεται από το σχέδιο. Ένας τύπος καλωδίων DC, είναι το καλώδιο τύπου DC Solar 1x6mm². Είναι εύκαμπτα καλώδια με μόνωση και περιβάλλονται από έναν μανδύα για επικάλυψη, κατασκευασμένος από ελαστικό υψηλής αντοχής. Τα καλώδια

ακολουθούν τις προδιαγραφές ΕΛΟΤ 623.4 και HD 22.4. Ενδείκνυνται για χρήση σε ξηρούς, υγρούς ή βρεγμένους χώρους στην ύπαιθρο, κάτι τα οποία τα καθιστά κατάλληλα για τα εργοτάξια. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.5, για την καλύτερη διάκριση των καλωδίων και την αποφυγή λαθών κατά την σύνδεση τους, συνίσταται να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρωματισμοί ανάλογα με την πολικότητα των ισχύων που μεταφέρουν. Συνιθίζεται RED για τον θετικό πόλο και BLACK για τον αρνητικό.

Στα άκρα της κάθε στοιχειοσειράς (string) υπάρχουν απολήξεις τύπου MCT4 (Εικόνα 4) κατάλληλες για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων, που πρεσσάρονται πάνω στα καλώδια dc για την σύνδεση των πάνελ μεταξύ τους, καθώς και για να συνδεθούν με τους αντιστροφείς (string).

Η στήριξη των καλωδίων πάνω γίνεται πάνω στην αναδομή με δεματικά από πλαστικό υλικό για την αποφυγή επαγωγικών ρευμάτων. Οι προδιαγραφές που έχει το καλώδιο είναι:

- Εύρος θερμοκρασίας από -40οC ως 120οC.
- Επιτρεπτή τάση λειτουργίας 2 kV.
- Προσδοκώμενη διάρκεια ζωής > 25 έτη.
- Ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV protection).
- Το καλώδιο μπορεί να εγκατασταθεί και σε εξωτερικούς χώρους καθώς και εντός σωλήνων ή καναλιών.
- Μανδύας και μόνωση για ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4: MCT4 (<https://www.officepc.gr/product-category/energeiaka/kalodia-vysmata/>)

Τα καλώδια θα οδεύουν ανά ζευγάρια, διασυνδέοντας το ένα μετά το άλλο πλαίσιο καταλήγοντας στην είσοδο του αντιστροφέα. Απόρροια αυτού είναι η μείωση της επιφάνειας του βρόγχου, ελαχιστοποιώντας έτσι τον κίνδυνο δημιουργίας υπερτάσεων από πιθανή πτώση κεραυνού στα άκρα του string.

Καλωδίωση AC

Για την μεταφορά της ισχύος από τους αντιστροφείς προς τον κεντρικό πίνακα, που βρίσκεται στον χώρο χαμηλής τάσης στον υποσταθμό, ένας τύπος καλωδίου που συνηθίζεται να προτιμάται, είναι τα καλώδια τύπου H07RN-F, με διατομή 3x25mm². Οι απώλειες τις μεταφερόμενης ενέργειας με τον συγκεκριμένο τύπο καλωδίων δεν ξεπερνούν το 2%.

Τα καλώδια του συγκεκριμένου τύπου είναι επίσης ανθεκτικά σε όλες τις καιρικές συνθήκες, δεν είναι εύλεκτα και μπορούν να αντέξουν σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις. Έχουν ως επικάλυψη εξωτερικό μανδύα για προστασία, εσωτερικά φέρουν λαστιχένια μόνωση. Ο αγωγός είναι χάλκινος, λεπτοπολύκλωνος, προσφέροντας έτσι υψηλή αγωγιμότητα ηλεκτρικού ρεύματος και ελαστικότητα.

Καλωδίωση AC (Ισχύος)

Για την μεταφορά της ισχύος από τον κεντρικό πίνακα ως το σημείο σύνδεσης με τον ΔΕΔΔΗΕ, λόγω της μεγάλης ισχύος που μεταφέρουν τα καλώδια, επιλέγεται στην κατασκευή καλώδιο N2XSJ 12/20 KV 1*50/16 με επιπλέον μηχανική ενίσχυση. Ενταφιάζεται στα χαντάκια που έχουν σκαφτεί (συνήθως σε βάθος 1m από την επιφάνεια της γης) μέσα σε στρώμα άμμου για να επιτευχθεί χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και άρα βέλτιστη συμπεριφορά αγωγιμότητας. Η εισαγωγή άμμου επίσης βοηθάει στην προστασία των καλωδίων από την υγρασία αλλά και από τα τρωκτικά. Το καλώδιο έχει πολύκλωνους αγωγούς από σύρματα καθαρού χαλκού, μόνωση αγωγών από XLPE, όπως και εσωτερική μόνωση.

Καλωδίωση Σηματοδοσίας

Ένα καλώδιο σηματοδοσίας τύπου FTP Cat5e ξεκινάει από τον πίνακα χαμηλής τάσης του υποσταθμού και διατρέχει έναν έναν τους inverter προκειμένου να υπάρχει η φυσική

διασύνδεση και η συλλογή των δεδομένων από τον κεντρικό συλλέκτη και επεξεργαστή δεδομένων.

2.2.7 Σύστημα Τηλεμετρίας

Ένα σύστημα Τηλεμετρίας και ελέγχου εγκαθίσταται για τον αποτελεσματικό έλεγχο της ομαλής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάρκου. Το σύστημα αυτό μπορεί να ελέγχει:

- Την περιβαλλοντική θερμοκρασία.
- Την θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Την εισερχόμενη ενέργεια συνεχούς ρεύματος στους μετατροπείς και την εξερχόμενη ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος από αυτούς.
- Τις συνολικές kW που παράγονται μέσα στη μέρα.

Τα δεδομένα αυτά καταγράφονται και αποστέλλονται μέσω ενός modem στον ηλεκτρονικό μας υπολογιστή για την περαιτέρω ανάλυσή τους καθώς και για την αποθήκευσή τους.

Σύστημα ασφαλείας (συναγερμός)

Περιμετρικά του χώρου εγκατάστασης του Φ/Β πάρκου, θα τοποθετηθούν κάμερες κεντρικού συστήματος ασφαλείας (CCTV), για την παρακολούθηση όλου του χώρου χωρίς να αφήνουν κενά σημεία. Επίσης τοποθετείται και ειδικός συναγερμός (beam) ανά 50m και δημιουργούνται δέσμες ασφαλείας. Το καλώδιο που διατρέχει την κατασκευή για να έχει σήμα η κάμερα, είναι ένα καλώδιο rgb και ένα καλώδιο 2x1,5 για να ρευματοδοτείται.

Σύστημα περιμετρικού φωτισμού

Το πάρκο φωτίζεται περιμετρικά και επιτυγχάνεται με προβολείς ιωδίνης 500W ο καθένας, που τοποθετούνται σε γαλβανισμένους πασσάλους (4m συνήθως), στις γωνίες και στις μεγάλες πλευρές του πάρκου, οι οποίοι μπορεί να είναι και οι ίδιοι πάσσαλοι που έχουν τοποθετηθεί οι κάμερες και τα beam. (χρησιμοποιείται καλώδιο 3x2,5).

2.2.8 Αντιστροφείς

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα για να είναι εφικτό να διοχετεύσει την ισχύ του στο δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ με το οποίο έχει συνδεθεί, είναι αναγκαίο να μπορεί να μετατρέπει την συνεχή τάση εξόδου του σε εναλλασσόμενη, διατηρώντας τα χαρακτηριστικά του δικτύου που συνδέεται. Αυτό αποσκοπεί στο να μην προκύπτει πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου και στη ποιότητα ισχύος που παρέχεται. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται μέσω ενός αντιστροφέα (Inverter).

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της παραγόμενης τάσης σε:

- Μονοφασικούς αντιστροφείς, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10- 11kW.
- Τριφασικούς αντιστροφείς, με μεγέθη ισχύος από 6-7kW έως και 1MW.

Για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις άνω των 5Kw, ο ΔΕΔΔΗΕ επιβάλλει να συνδεθούν οι αντιστροφείς, ενώ για εγκαταστάσεις άνω των 100kW η σύνδεση γίνεται απευθείας με το δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) του ΔΕΔΔΗΕ.

Η χρήση μετασχηματιστή στους αντιστροφείς

Ο πιο βασικός λόγος που ένας μετασχηματιστής χρησιμοποιείται σε έναν αντιστροφέα είναι ο στόχος να απομονωθεί η DC πλευρά, η οποία συνδέεται με τα φωτοβολταϊκά πάνελ με την AC πλευρά που συνδέεται στο δίκτυο. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται κατασκευάζονται για συχνότητα 50Hz, ενώ για μικρότερη ισχύ χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές που είναι κατασκευασμένοι για μεγαλύτερες συχνότητες (της τάξης των 10–15kHz). Οι μετασχηματιστές χαμηλής συχνότητας έχουν αρκετά μειονεκτήματα, διότι εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες, καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο και το βάρος τους είναι μεγαλύτερο. Αντιθέτως οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας χαρακτηρίζονται από πιο εξειδικευμένη κατασκευή. Εκτός από το μεγάλο κόστος ανά μονάδα ισχύος, η κυριότερη αδυναμία της χρήσης του μετασχηματιστή, είναι οι απώλειες που υπάρχουν σε ποσοστό 2-4%. Όμως είναι σύνηθες και οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, αν χρησιμοποιούν μετατροπείς ανύψωσης της DC τάσης των φ/β πάνελ (DC/DC μετατροπείς ανύψωσης), να παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες. [1]

Αντιστροφείς κλάδων ή στοιχειοσειρών (string inverters)

Για τους σταθμούς μικρής και μέσης ισχύς οι string inverters είναι η πιο συνηθισμένη κατηγορία αντιστροφέων που χρησιμοποιείται. Η παράλληλη σύνδεση ενός αριθμού κλάδων (strings) σε αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα, αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργία τους. Οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς βρίσκονται στην αγορά με μετασχηματιστή αλλά και χωρίς μετασχηματιστή, καθώς επίσης και σε μονοφασική ή τριφασική σύνδεση. Ανάλογα με τον αριθμό των πάνελ που είναι εφικτό να συνδεθεί στις εισόδους τους, διαθέτουν αρκετή ευελιξία, όμως με την προϋπόθεση οι μέγιστες ρυθμίσεις ασφάλειάς τους να μην παραβιαστούν. Είναι συνετό να συνδέονται στις εισόδους του αντιστροφέα ο ίδιος τύπος και αριθμός των πάνελ.

Παραδείγματα inverter (Εικόνα 5 – Εικόνα 6):

1. Ο τριφασικός διασυνδεδεμένος αντιστροφέας Huawei Sun2000-60KTL παράγει 60kW. Διαθέτει 6 MPPT εισόδους για σύνδεση - μέχρι δύο MPPT ανά είσοδο - συστοιχιών (strings) πάνελ, για μέγιστη δυνατή απορρόφηση ισχύος από κάθε string. Με ετήσια παραγωγή ενέργειας έως και 90.000 kWh (εικ. 5).



Εικόνα 5: Τριφασικός Inverter Huawei Sun2000-60KTL. (<https://www.estg.eu/en-gb/huawei-inverter-sun2000-60ktl-m0/>)

2. Τριφασικός, Kaco αντριστροφέας, Ισχύς εξόδου (AC) 50Kw (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Τριφασικός, Kaco αντριστροφέας.
(<https://www.oleng.eu/inbert-er-kaco>)

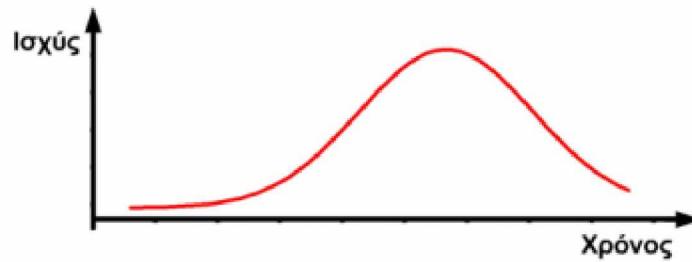
2.3 Σύστημα ελέγχου του μετατροπέα

2.3.1 Βαθμός απόδοσης ενός inverter

Ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος δεν παραμένει σταθερός μέσα στη μέρα, αλλά ποικίλει ανάλογα με τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης ενός μετατροπέα δεν αρκεί για να προσδιορίσουμε πόσο αποδοτικός είναι. Για να έχουμε μία πιο προσεγγιστική μέτρηση για την αποδοτικότητα ενός αντιστροφέα, έχει οριστεί ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης η_{EU} ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\eta_{EU} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.10 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.2 \cdot \eta_{100\%}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, ο βαθμός απόδοσης, μας δείχνει ότι η απόδοση ενός μετατροπέα, είναι ο υπολογισμός του αθροίσματος των επιμέρους βαθμών απόδοσης του, πολλαπλασιάζοντας τον καθένα με έναν συντελεστή βαρύτητας (για διαφορετικά ποσοστά της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος). [7]



Σχήμα 3: Τυπική 24ωρη μεταβολή ηλιακής ενέργειας. [7]

2.3.2 Maximum Power Point Tracking

Συνήθως οι περισσότερες κοινές πηγές ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρίσκονται στην κανονική τους λειτουργία, διατηρούν την τάση τους σχεδόν σταθερή. Αντίθετα ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και το ρεύμα που μας δίνει, είναι μεγέθη συνεχή. Η τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταβάλλεται μη γραμμικά, συναρτήσει της εντάσης που παρέχουν στο εξωτερικό κύκλωμα, όταν μεταβάλλεται είτε η θερμοκρασία, είτε η ακτινοβολία στο περιβάλλον. Εξαιτίας αυτής της συγκεκριμένης ιδιαιτερότητας που εντοπίζεται στις φωτογεννήτριες, απαιτείται συχνή παρακολούθηση των μετατροπέων, έτσι ώστε στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας, να αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως, ανίχνευση του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, διεθνής ορολογία M.P.P.T.).

Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης (Σχήμα 4, Εικόνα 7) πρόκειται για ένα DC-DC μετασχηματιστή. Μπορεί να συνδεθεί με string μεγαλύτερης τάσης, δηλαδή με ένα string με περισσότερα πάνελ που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, με μεγαλύτερη ισχύ και μεγαλύτερο ρεύμα φόρτισης.

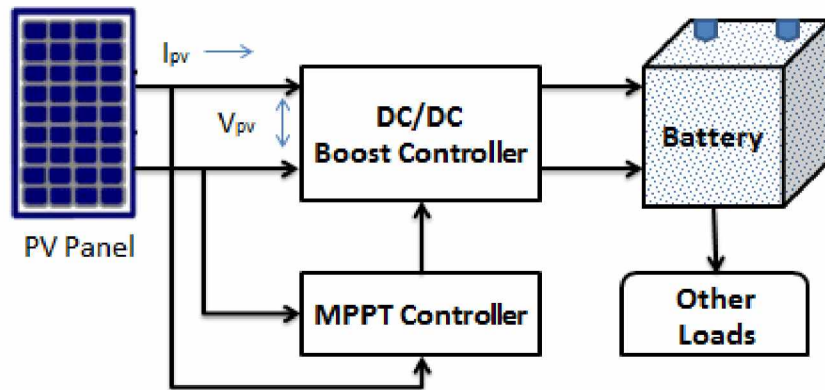
Ο MPPT ρυθμιστής χρησιμοποιεί έναν έξυπνο αλγόριθμο ο οποίος ανάλογα με τις συνθήκες της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας προσαρμόζει την τάση στην είσοδό του. Κάθε φορά λοιπόν αξιοποιείται όλη η ενέργεια που παράγει το πανελ, λαμβάνοντας το μέγιστο δυνατό ρεύμα που μπορεί να ληφθεί από τα πάνελ στις εκάστοτε καιρικές συνθήκες (ηλιοφάνεια – συννεφιά). Επιπλέον, οι έξυπνες λειτουργίες του MPPT ρυθμιστή όσον αφορά στη φόρτιση και την εξισορρόπηση (equalization) των μπαταριών,

προσφέρουν πιο ομαλή φόρτιση και συντήρησή τους, με αποτέλεσμα μακροχρόνια διάρκεια ζωής.

Οι μπαταρίες αποθηκεύουν και παράγουν ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε αποθηκευμένη χημική μορφή. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, συλλαμβάνουν την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β σύστημα και επιτρέπουν να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν ισχύ όταν τα ηλεκτρικά φορτία απαιτούν περισσότερη ισχύ από αυτήν που παράγουν τα Φ/Β πάνελ.

Έως και 30% περισσότερη ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από τα πάνελ που χρησιμοποιούν MPPT ρυθμιστή σε αντίθεση με έναν αντίστοιχο Pulse Width Modulation (PWM) ρυθμιστή σε ένα αντίστοιχο σύστημα.

Πριν από περίπου 10 χρόνια οι ρυθμιστές φόρτισης που χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά ήταν οι ρυθμιστές PWM. Οι PWM ρυθμιστές φόρτισης απλά συνδέει το string με την μπαταρία και δεν μπορεί να δεχτεί μεγάλη τάση από το string.



Σχήμα 4: Διάγραμμα του ελεγκτή MPPT. [8]



Εικόνα 7: Ρυθμιστής φόρτισης VICTRON MPPT BLUE SOLAR 100/50 (12/24V-50A).

(https://www.texnostore.gr/index.php?route=product/product&product_id=3967&gclid=CjwKCAjwieuGBhAsEiwA1Ly_nXY7NE_oDsOxrziyEPKo5oJQGISBFISnPOygyJ0pDDRqa0zBwbkEhhoCuoIQAvD_BwE)

ΜΕΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ VICTRON MPPT BLUE SOLAR 100/50 (12/24V-50A):

- **Εξελιγμένη και γρήγορη ανεύρεση βέλτιστης απόδοσης ισχύος σε μερική σκίαση**
Αυτός ο ρυθμιστής φόρτισης μπαταριών, λόγω της τεχνολογίας γρήγορης ανεύρεσης του σημείου MPP από φ/β πάνελ που χρησιμοποιεί, προσφέρει γρήγορη δυνατή φόρτιση των μπαταριών, προστατεύοντας τον εξοπλισμό και εξασφαλίζοντας την τάση που απαιτείται για τη φόρτιση των μπαταριών, ακόμα και σε πιθανές σκιάσεις ή όταν μεταβάλλεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την μακροζωία της μπαταρίας.
- **Ευέλικτος και πλήρως προγραμματισμένος αλγόριθμος φόρτισης**
- **Ηλεκτρονική προστασία**
Προστατεύει από την υπερθέρμανση μειώνει αυτόματα την έξοδο ισχύος για να προστατεύσει τη συσκευή σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών.
Προστατεύει επίσης από βραχυκυκλώματα καθώς και από αντιστροφή πολικότητας ή αντιστροφή ροής ρεύματος.
- **Εμφανίζει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο**
- **Έξοδος φορτίου**

Η αποφόρτιση της μπαταρίας μπορεί να αποφευχθεί με την σύνδεση όλων των φορτίων στην έξοδο φορτίου. Το φορτίο θα αποσυνδεθεί από την έξοδο φορτίου όταν η μπαταρία φτάσει στο σημείο εκφόρτισής της.

Όταν ένας ελεγκτής ηλιακής φόρτισης δεν είναι σε θέση να επαναφορτίσει την μπαταρία στην πλήρη της χωρητικότητα, το αποτέλεσμα είναι η μπαταρία να κυμαίνεται σε μία ενδιάμεση κατάσταση φόρτισης. Αυτό έχει αρνητική επίδραση στην υγεία της μπαταρίας. Ο αλγόριθμος που ελέγχει τη ζωή της μπαταρίας, παρακολουθεί την κατάσταση φόρτισης και μπορεί να αυξήσει ελαφρώς το σημείο που θα αποσυνδεθεί το φορτίο, μέχρι η συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας να είναι αρκετή για να φορτίσει την μπαταρία ξανά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τεχνητή νοημοσύνη στα Φωτοβολταϊκά πάρκα

3.1 Τεχνητή Νοημοσύνη

Τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence AI) είναι κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών, στον οποίο κύριο στόχος είναι η μίμηση της ανθρώπινης και ζωικής νοημοσύνης με απώτερο σκοπό την υλοποίηση ενός «μηχανικού ανθρώπου».

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης των μηχανών και της υπολογιστικής ισχύος τους, η τεχνητή νοημοσύνη έχει εισέλθει σε πάρα πολλούς τομείς της ζωής μας από απλές πειραματικές θεωρίες που ήταν τα προηγούμενα χρόνια. Οι εφαρμογές της, ολοένα και πληθαίνουν, έχοντας τεράστιο εύρος, από την κατανόηση της ομιλούμενης γλώσσας και απάντηση σε αυτή, μέχρι πιο προσωποποιημένες διαφημίσεις ή και γρηγορότερα προγράμματα που μαθαίνουν την συμπεριφορά μας και προσαρμόζονται σε αυτή.

Έτσι και η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να παίξει ρόλο και στα φωτοβολταϊκά συστήματα με διάφορους τρόπους. Μέσω αυτής μπορεί να επιτευχθεί καλύτερο πλάνο εγκατάστασης, καλύτερη παρακολούθηση των πάρκων αυτών μέχρι και καλύτερες επιδόσεις από τα πάνελ.

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει διάφορες μεθόδους να επιτύχει τους προαναφερθέντες τρόπους. Αυτές που θα αναλυθούν κυρίως σε αυτό το κεφάλαιο είναι τα νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks), η ασαφής λογική (fuzzy logic) και τα drones.

Η τεχνητή νοημοσύνη αναμένεται να παίξει καθοριστικό ρόλο ως τεχνολογία του μέλλοντος, σε ένα μέλλον που η τεχνολογική εξέλιξη είναι επιτακτική και αναπτύσσεται ραγδαία.

3.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα επεκτείνονται γρήγορα και έχουν αυξανόμενο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύς, αποτελώντας ασφαλές πηγές ενέργειας προς το περιβάλλον γιατί η παραγωγή ρύπων είναι μηδαμινή. Επειδή όμως η εγκατάσταση ενός συστήματος για την φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι δαπανηρή, συγκριτικά με την

ενέργεια που παίρνουμε από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ο πελάτης θέλει να χρησιμοποιεί το μέγιστο της διαθέσιμης παραγόμενης ισχύος. Επομένως, τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν με τη μέγιστη ισχύ εξόδου τους, για οποιαδήποτε θερμοκρασία και επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας.

3.2.1 Εισαγωγή

Αρχικά για την εισαγωγή μας στην έννοια των τεχνητών νευρωνικών δικτύων αξίζει να σημειωθεί ότι ιδέα προήλθε από την προσπάθεια των επιστημόνων να προσομοιάσουν τον ανθρώπινο εγκέφαλο σε υπολογιστικό περιβάλλον. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, λοιπόν αποτελείται από νευρώνες οι οποίοι διαθέτουν εισόδους και εξόδους από και προς άλλους νευρώνες με αποτέλεσμα να συνδυάζουν πολύπλοκες πληροφορίες ώστε να καταλήξουν στο ιδανικό αποτέλεσμα. Όπως και στον ανθρώπινο εγκέφαλο υπάρχουν νευρώνες διαφορετικά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, έτσι και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα υπάρχουν πολλές και διάφορες αρχιτεκτονικές με σκοπό να πετύχουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε κάθε πρόβλημα. Οι αρχιτεκτονικές αυτές ξεχωρίζουν τους νευρώνες τους σε 3 διαφορετικά μέρη, τους νευρώνες εισόδου που δέχονται την πληροφορία, τους κρυφούς νευρώνες που κάνουν υπολογισμούς και τους νευρώνες εξόδου που υλοποιούν τους τελευταίους υπολογισμούς και παράγουν το τελικό αποτέλεσμα. Το μεγαλύτερο και πιο σημαντικό μέρος των νευρωνικών δικτύων ανήκει στην κατηγορία της επιβλεπόμενης μάθησης supervised learning στην οποία κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, το ζητούμενο αποτέλεσμα είναι γνωστό με αποτέλεσμα να έχει την δυνατότητα να βελτιώνεται από τα «λάθη» του. Για να κατανοήσουμε λίγο καλύτερα τις έννοιες αυτές θα εξηγήσουμε απλά την διαδικασία εκπαίδευσης. Έστω λοιπόν ότι έχουμε x_1, x_2, \dots, x_n σύνολα δεδομένων με εξόδους y_1, y_2, \dots, y_n . Σε αυτήν την φάση θέλουμε να υπολογίσουμε το λάθος μεταξύ της πραγματικής τιμής εξόδου και της προβλεπόμενης από το νευρωνικό. Για τον υπολογισμό αυτόν, υπάρχουν αρκετές μετρικές και καθεμιά πιο σημαντική ανάλογα την φύση του προβλήματος και των δεδομένων. Έχοντας λοιπόν αυτήν την συνάρτηση σφάλματος, επιχειρούμε μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το ελάχιστό της, καθώς στο σημείο αυτό οι παράμετροι του δικτύου έχουν τέτοιες τιμές που το τελευταίο μπορεί να κάνει όσο το δυνατόν καλύτερη πρόβλεψη. Είναι λογικό δηλαδή οι εφαρμογές τους να ποικίλουν π.χ.

όπως η πρόβλεψη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών ανάλογα το μέρος την εποχή αλλά και πολλές άλλες παραμέτρους.

Οι εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στα Φ/Β συστήματα που θα παρουσιαστούν είναι :

- MPPT
- Sizing
- Monitoring & Fault Detection

3.2.2 Artificial Neural Networks και Maximum Power Point Tracking

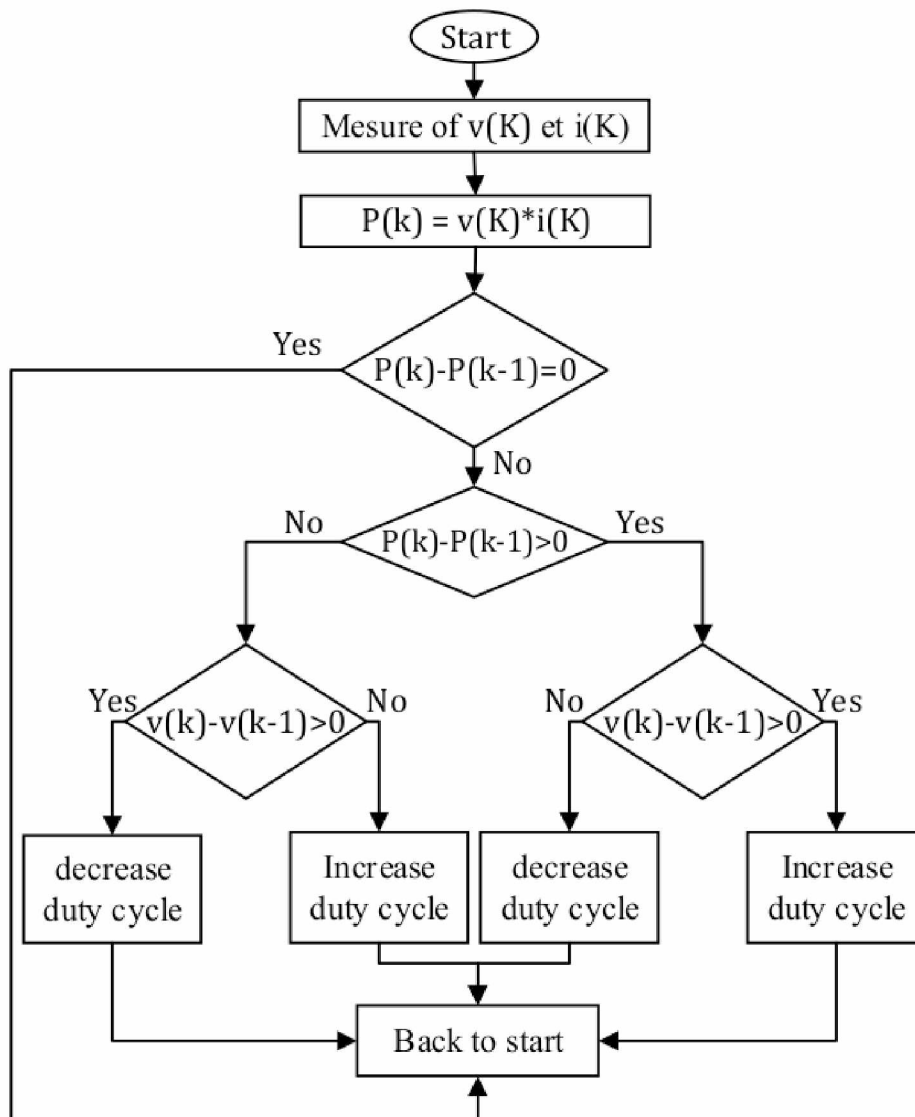
Ίσως το κομμάτι στο οποίο τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την μεγαλύτερη εφαρμογή στα φωτοβολταϊκά είναι στο MPPT.

Ενώ έχουν αναπτυχθεί πολλές μελέτες και αλγόριθμοι για το optimal mppt τα νευρωνικά δίκτυα φαίνεται να έχουν αρκετές αρχιτεκτονικές που να το βελτιώνουν και εν τέλει να υπάρχει μεγαλύτερη απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου, καθώς υπάρχουν συνεχώς άγνωστοι παράγοντες.

- Ελεγκτής Ισχύος και Τάσης

Μία εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων στο mppt είναι μέσω ενός ελεγκτή, ο οποίος έχει τον ρόλο να ελέγχει τις διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Τα δεδομένα που προπονούν το νευρωνικό σύστημα παράγονται μέσω της μεθόδου Διαταραχή και Παρακολούθηση (Perturbation and observation method) (Σχήμα 5). Συγκεκριμένα, διαταράσσεται ο πίνακας τάσης και μετριέται η τιμή της ισχύος εκείνη την χρονική στιγμή $P(k)$. Η τιμή αυτή της ισχύος συγκρίνεται με την προηγούμενη καταγεγραμμένη τιμή $P(k - 1)$. Αν η καινούργια τιμή είναι μεγαλύτερη, η επόμενη διαταραχή θα είναι προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ αν μειωθεί η ισχύς, η επόμενη διαταραχή θα είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση. [9]



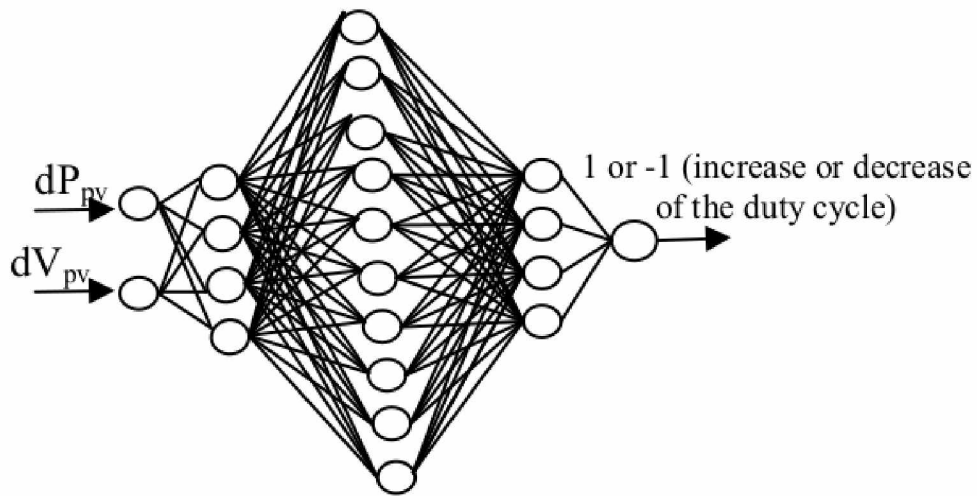
Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής της μεθόδου P&O. [9]

Αφού παραχθούν τα δεδομένα, τότε γίνεται μια επιλογή από αυτά, καθώς η επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης (training set) για το νευρωνικό δίκτυο είναι το πιο σημαντικό για την αποτελεσματικότητά του.

Στην συνέχεια μία multilayered feedforward backpropagation αρχιτεκτονική επιλέγεται (Σχήμα 6) όπου:

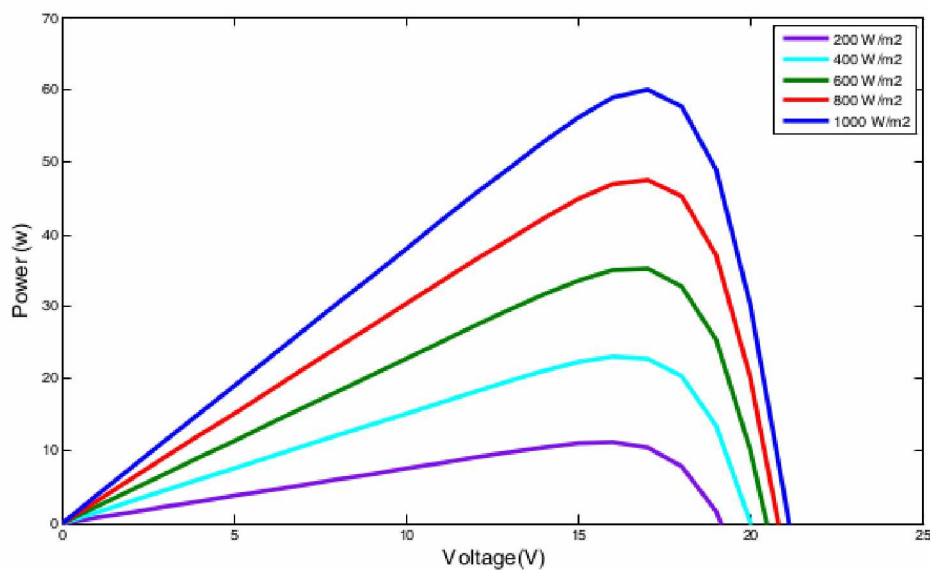
- έχει τρία κρυφά επίπεδα, τα οποία χρησιμοποιούν για συνάρτηση ενεργοποίησης μία logsig και δύο purelin το καθένα, με 4, 10 και 4 νευρώνες κάθε κρυφό επίπεδο.

- το εξωτερικό επίπεδο έχει έναν τελικό νευρώνα όπου καταλήγει σε αυτόν μέσω της poslin συνάρτησης.

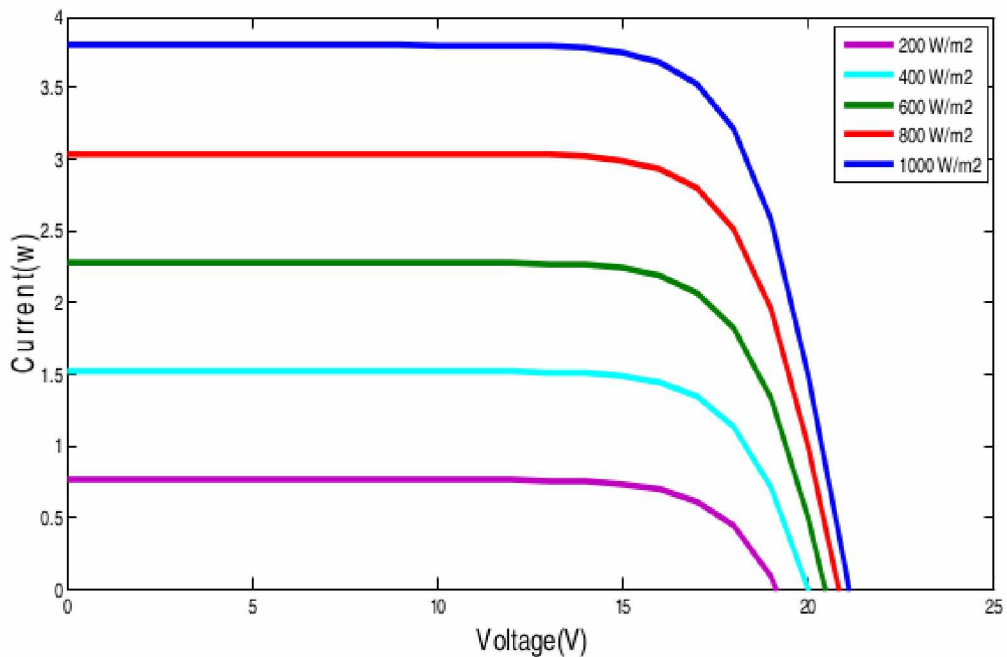


Σχήμα 6: Η αναπτυγμένη διαμόρφωση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου (artificial neural network – ANN) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό κύκλου λειτουργίας στο MPPT. [9]

Αφού τελειώσει η εξάσκηση του δικτύου και βρεθεί ο optimal mppt ελεγκτής, μπορεί να εισαχθεί στα φ/β πάρκα και να βρίσκει κάθε φορά το MMPT. Στο Σχήμα 7 και στο Σχήμα 8 απεικονίζονται γραφικές παραστάσεις φωτοβολταϊκών χαρακτηριστικών σε διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 7: Φωτοβολταϊκά χαρακτηριστικά σε διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. [9]

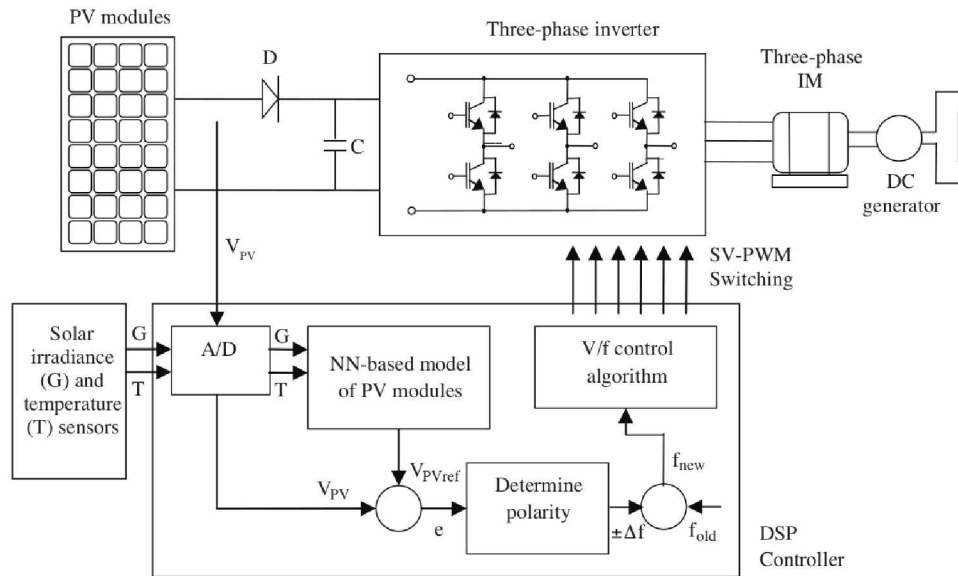


Σχήμα 8: IV χαρακτηριστικά κάτω από διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. [9]

- Μηχανή Επαγωγής

Μία άλλη μελέτη χρησιμοποίησε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε συνδυασμό με έναν γενετικό αλγόριθμο για την εκπαίδευση και την βελτιστοποίηση μιας επαγωγικής μηχανής που με την σειρά της χρησιμοποιεί έναν αντιστροφέα και επιτυγχάνει την απόσπαση της βέλτιστης ισχύς από τα φωτοβολταϊκά πάνελα (Σχήμα 9).

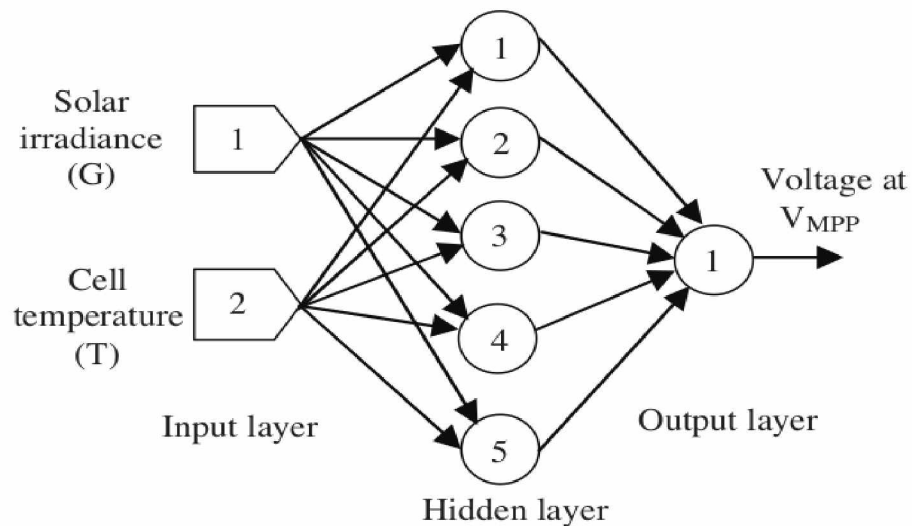
Το MPPT επιτυγχάνεται μέσω της εναλλαγής της ταχύτητας της επαγωγικής μηχανής και της ελεγχόμενης ισχύς που χρειάζεται το μηχανικό φορτίο. Ενώ ο έλεγχος του αντιστροφέα επιτεύχθηκε μέσω της μεθόδου space vector (SV) - PWM. [10]



Σχήμα 9: Σχεδιάγραμμα αρχιτεκτονικής του συστήματος (φ/β σύστημα – επαγωγική μηχανή). [10]

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μελέτης, ένας ελεγκτής τάσης χρησιμοποιήθηκε και ο αλγόριθμος MPPT βασίστηκε πάνω σε αυτόν. Μέσω αυτού του ελεγκτή σκοπός είναι να βρεθεί μία τιμή της τάσης που επιτυγχάνεται το MPP. Το σύνολο δεδομένων (dataset) για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου δημιουργήθηκε από μετρήσεις σχετικές με εισόδους την ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία και σαν έξοδο την ιδανική τιμή τάσης.

Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου είναι multilayer-perceptron, η οποία αποτελείται από το επίπεδο εισόδου με 2 εισόδους, ένα κρυφό επίπεδο με 5 κρυφούς νευρώνες και το επίπεδο εξόδου που βγάζει ένα τελικό αποτέλεσμα. Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης του κρυφού και του επιπέδου της εξόδου είναι tangent hyperbolic (Σχήμα 10).

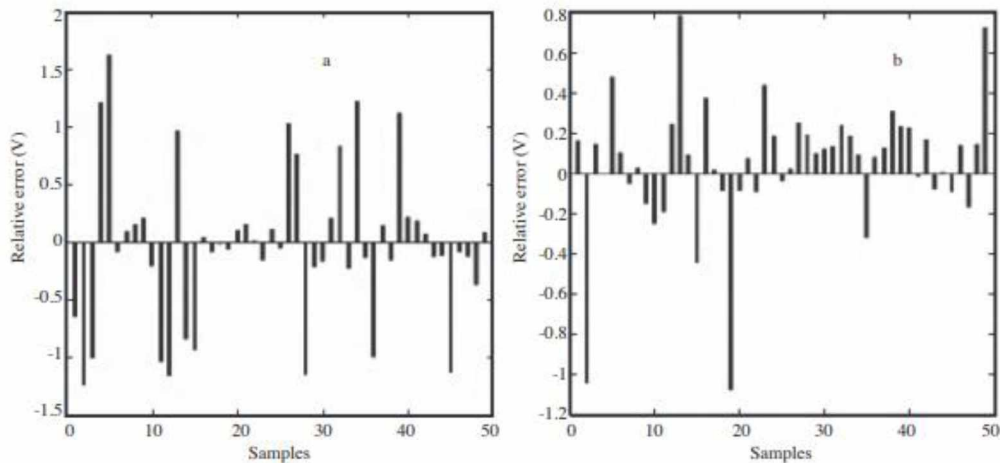


Σχήμα 10: Η διαμόρφωση του ANN χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής τάσης αναφοράς στο MPP. [10]

Για την εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο φάσμα από εισόδους το οποίο καλύπτει $91-1105 \text{ W/m}^2$ για ακτινοβολία και $11-72.2 \text{ }^\circ\text{C}$ από θερμοκρασίες.

Ο γενετικός αλγόριθμος, σαν σκοπό έχει να μειώσει το πλήθος των δεδομένων εισόδου κρατώντας μόνο τα απαραίτητα στοιχεία, με αποτέλεσμα το νευρωνικό δίκτυο να εκπαιδευτεί καλύτερα και να βγάζει πιο σωστά αποτελέσματα. Στην αρχή ο αλγόριθμος εκπαιδεύει το δίκτυο σε έναν αρχικό πληθυσμό και αξιολογεί το αποτέλεσμα. Ο πληθυσμός μετά πληθαίνει με έναν μεγάλο αριθμό από γενιές και ψάχνει τις βέλτιστες τιμές εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται το νευρωνικό δίκτυο και το σύνολο δεδομένων για την εκπαίδευση, ως μία συνάρτηση εφαρμογής για τον γενετικό αλγόριθμο. Ο γενετικός αλγόριθμος συνεχίζει έως ότου ένας προκαθορισμένος αριθμός από γενιές ολοκληρωθούν για να παραχθούν οι πληθυσμοί με τους καινούργιους αριθμούς παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα που επέφερε το νευρωνικό δίκτυο από μόνο του έδειξαν 72 με 79% επιτυχία στην εύρεση του MPP, ενώ σε συνδυασμό με το γενετικό αλγόριθμο οι επιδόσεις ανέβηκαν σε 78 με 92% επιτυχία. Στο Σχήμα 11 φαίνονται οι σχετικές τιμές σφάλματος για δοκιμές σε ένα εκπαιδευμένο ANN.



Σχήμα 11: Οι σχετικές τιμές σφάλματος για δείγματα δοκιμών σε ένα εκπαιδευμένο ANN α) χωρίς βελτιστοποίηση γενετικού αλγορίθμου (genetic algorithm – GA) και β) με GA βελτιστοποίηση . [10]

Η σχετική έρευνα έλυσε το πρόβλημα της συνεχούς μεταβαλλόμενης κατάστασης του αλγορίθμου (P&O) και λόγω της εφαρμογής του αλγορίθμου στον αντιστροφέα η συνήθης χρήση του DC-DC μετασχηματιστή κρίθηκε περιττή.

Τα αποτελέσματα αυτά επέφεραν καλύτερες επιδόσεις στο ολοκληρωμένο σύστημα και στις αποδόσεις που επιφέρει.

3.2.3 Sizing

Σε οποιαδήποτε φ/β σύστημα, το sizing αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού. Για παράδειγμα η βέλτιστη επιλογή του αριθμού των πάνελ, το μέγεθος της μπαταρίας αποθήκευσης και το μέγεθος της ανεμογεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες υβριδικές εφαρμογές. Αναμφίβολα στο παρόν στάδιο ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, το σημαντικό εμπόδιο είναι το υψηλό επενδυτικό κόστος ενός φ/β συστήματος.

Το sizing ενός αυτόνομου φ/β πάρκου αποτελείται από τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ κόστους και αξιοπιστίας. Συνήθως, η αξιοπιστία είναι εκ των προτέρων απαραίτητη προϋπόθεση για τον χρήστη, και το μηχανικό πρόβλημα είναι να βρεθούν τα βέλτιστα C_D και C_S που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις: [11]

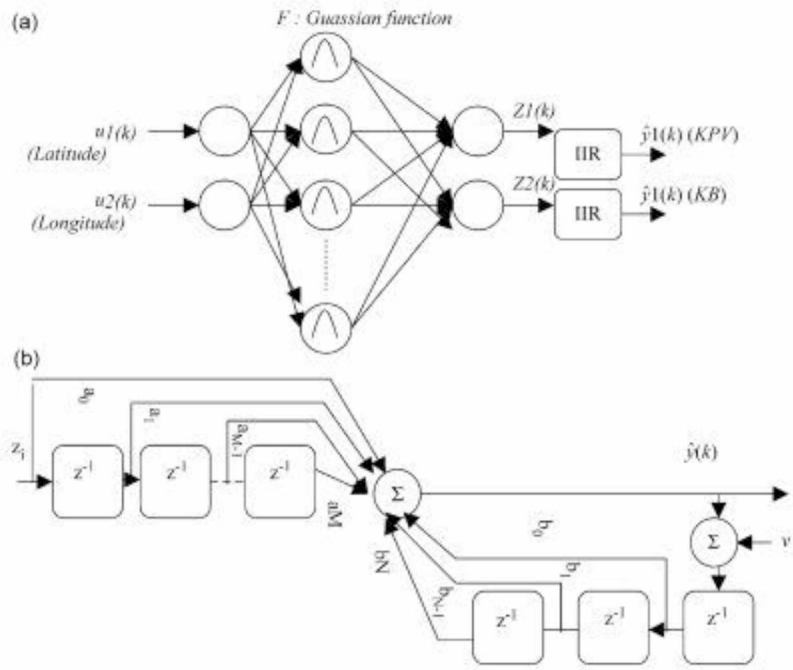
$$C_A = \frac{\eta_{PV} A_{PV} H}{L} \text{ and } C_S = \frac{C_U}{L}$$

- η_{PV} : αποτελεσματικότητα πλαισίου ϕ/β
- A_{PV} : επιφάνεια του ϕ/β πλαισίου
- H : ηλιακή ακτινοβολία
- L : μέσος όρος καθημερινής κατανάλωσης ενέργειας.
- C_U : χρήσιμη χωρητικότητα συσσωρευτή

τα οποία οδηγούν στην δοσμένη τιμή της μικρότερης πιθανής πιθανότητας του μικρότερου κόστους.

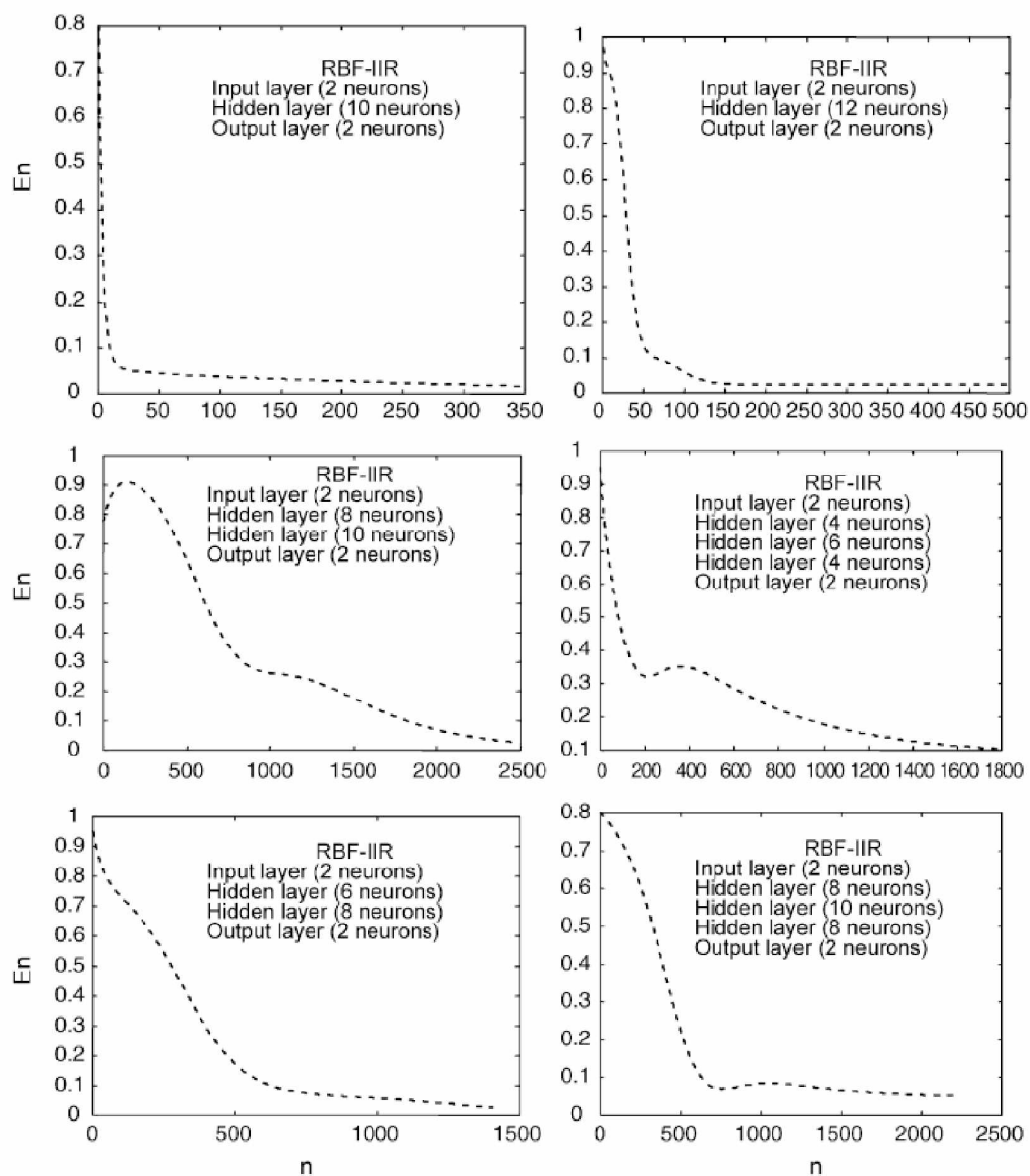
Για την επίτευξη του στόχου, χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με Radial Basis Function στο κρυφό επίπεδο σε σύνδεση με ένα Infinite Impulse Response (IIR) φίλτρο (Σχήμα 12). Το IIR το χρησιμοποιούμε για τη δημιουργία μιας διπλής αρχιτεκτονικής στο τοπικό δίκτυο (RBF-IIR), το οποίο πλέον διαθέτει μια υπολογιστικά αποδοτικότερη μέθοδο εκπαίδευσης. Αποτέλεσμα αυτής της αναβάθμισης είναι η ταχύτερη μάθηση του νευρωνικού, καθώς και η ταχύτερη σύγκλιση (δηλαδή προσεγγίζει πιο γρήγορα το ελάχιστο της συνάρτησης λάθους). Αξίζει να σημειωθεί ότι η παράμετρος ν (Σχήμα 12 - (β) μέρος) έχει μικρές τιμές γιατί το IIR είναι ένα feedback μοντέλο και δεν θέλουμε οι παρελθοντικές τιμές να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις μελλοντικές, καθώς μπορεί να διαταραχθεί η σταθερότητα του δικτύου.

Με trial and error παρατηρήθηκε ότι η ιδανική τιμή για τους κρυφούς νευρώνες είναι 8, όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση. Αυτή η μέθοδος μας δίνει ένα ποσοστό εγκυρότητας γύρω στο 98%, ένα ποσοστό που την καθιστά αξιόπιστη.



Σχήμα 12: α) Αρχιτεκτονική προσαρμοστικού δικτύου RBF-IIR, (β) Μοντέλο IIR. [11]

Στο Σχήμα 13 απεικονίζεται το κανονικοποιημένο τετραγωνικό σφάλμα του RBF-IIR δικτύου.



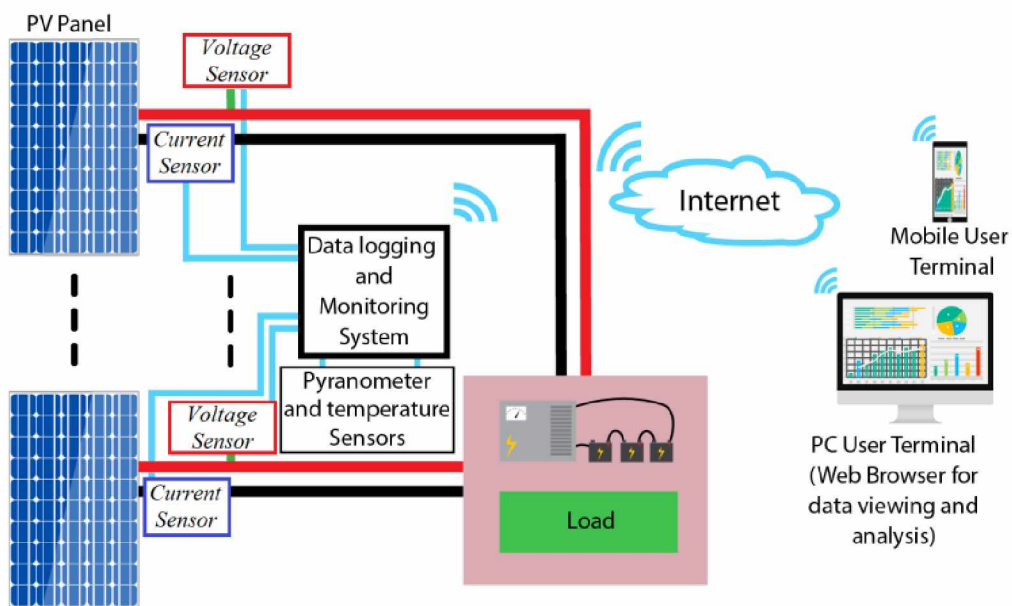
Σχήμα 13: Κανονικοποιημένο τετραγωνικό σφάλμα. [11]

3.2.4 Monitoring (Παρακολούθηση)

Για την παραγωγή ενός σεβαστού ποσού ενέργειας, χρειάζεται να εγκατασταθεί μεγάλη έκταση. Οι καιρικές συνθήκες, όμως διαβρώνουν την λειτουργικότητα των πανέλων στο πέρασμα του χρόνου. Σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των πελατών, όπου αναζητούν αξιοπιστία και συνεχόμενη ισχύ, παρουσιάζεται μια ανάγκη για βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχοντων μηχανισμών παρακολούθησης των φωτοβολταϊκών πάρκων, διορθώνοντας

όλες τις μικρές πιθανές βλάβες που θα υπάρξουν σε αρχικό στάδιο. Οι μηχανισμοί παρακολούθησης, θα μετράνε την είσοδο και την έξοδο του συστήματος και θα μπορούν να αποφασίσουν, αν υπάρχει κάποια ελαττωματική λειτουργία των Φ/Β πανέλων. Ένας έξυπνος μηχανισμός διαφέρει καθώς μπορεί να αναγνωρίσει και την πηγή του προβλήματος, βρίσκοντας το πανέλο που υπολειτουργεί και προκαλεί την ολοκληρωμένη μείωση παραγωγής. Για την επίτευξη ενός τέτοιου συστήματος διάφοροι ελεγκτές πρέπει να εγκατασταθούν (Σχήμα 14): [12]

- σε κάθε πανέλο ένας ελεγκτής τάσης και ένας ρεύματος
- ένα κεντρικό πυρανομέτρο για την ηλιακή ακτινοβολία και για την θερμοκρασία
- ένας μικροελεγκτής (microcontroller), όπου συλλέγει όλες τις πληροφορίες από τους υπόλοιπους ελεγκτές

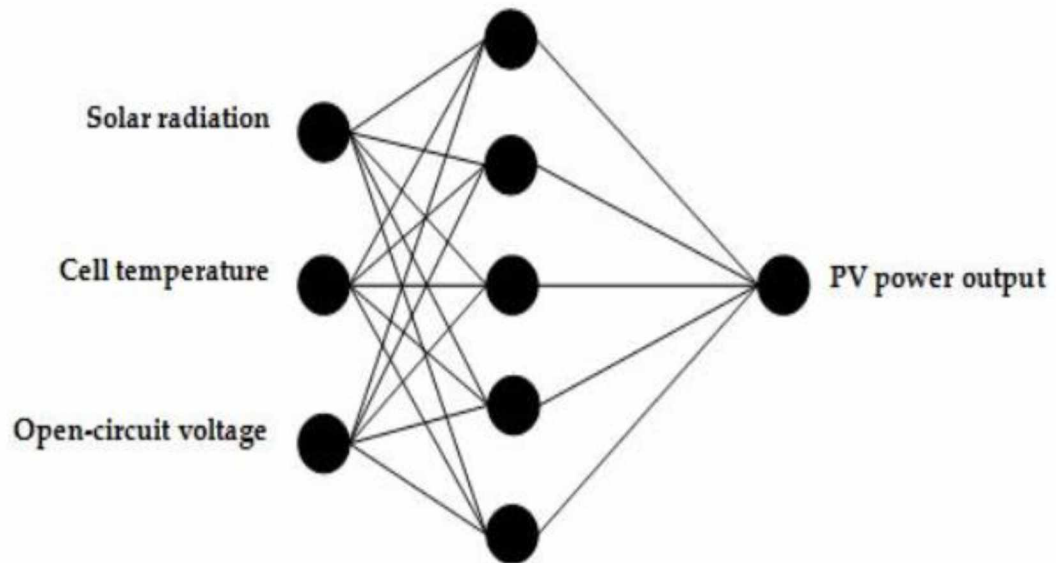


Σχήμα 14: Πλήρες σύστημα φ/β πάνελ με αισθητήρες, καταγραφή δεδομένων και σύστημα παρακολούθησης. [12]

Για την πρόβλεψη του λογικού αποτελέσματος χρησιμοποιείται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Σχήμα 15), το οποίο αποτελείται από:

- ένα επίπεδο εισόδου με νευρώνες εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία του πανέλου και την τάση του ανοιχτού κυκλώματος του πανέλου.

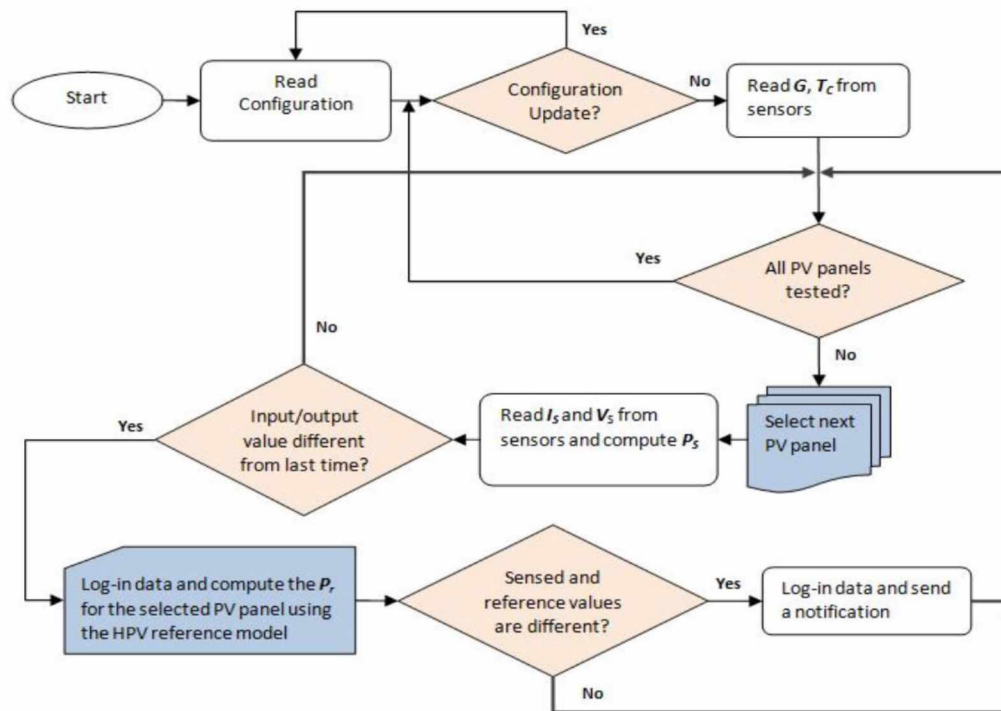
- ένα κρυφό επίπεδο που αποτελείται από πέντε νευρώνες και χρησιμοποιούν για συνάρτηση ενεργοποίησης την hyperbolic tangent sigmoid.
- το εξωτερικό επίπεδο που αποτελείται από έναν νευρώνα, χρησιμοποιεί μία γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης (linear) και παράγει την τελική τιμή ισχύος που πρέπει να παραχθεί από το σύστημα για τις συγκεκριμένες εισόδους.



Σχήμα 15: Δομή του ANN. [12]

Αφού βρεθεί αυτή η τιμή, συγκρίνεται με την πραγματική τιμή της ισχύος που παράχθηκε και αν διαφέρουν παραπάνω από 10%, τότε ενημερώνει ο κεντρικός microcontroller ότι υπάρχει κάποιο πρόβλημα.

Στο Σχήμα 16 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του συστήματος παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκε στον microcontroller.



Σχήμα 16: Διάγραμμα ροής προγράμματος συστήματος παρακολούθησης. [12]

3.3 Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)

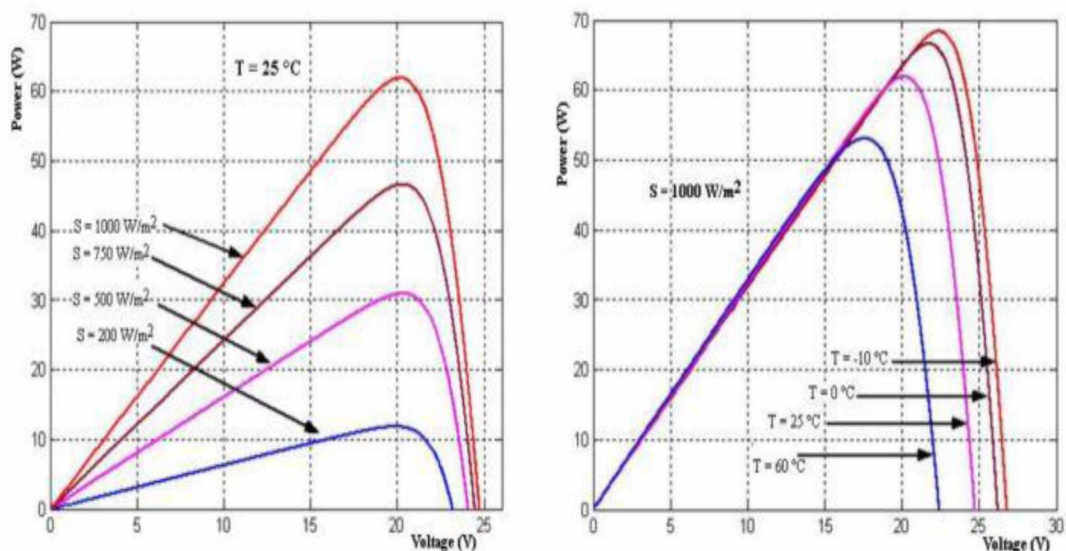
3.3.1 Εισαγωγή

Η ασαφής λογική είναι μία μορφή πολυ-τιμικής λογικής, όπου η πραγματική τιμή της κυμαίνεται μεταξύ του μηδέν και του ένα. Χρησιμοποιείται για να χειριστεί καταστάσεις μερικής αλήθειας, όταν η τιμή της αλήθειας είναι ενδιάμεσα από τελείως αλήθεια ή ψέματα. Έρχεται σε αντίθεση από την δυαδική λογική, όπου υποστηρίζονται μόνο οι τιμές μηδέν και ένα. Η ασαφής λογική βασίζεται στην παρατήρηση πως οι άνθρωποι παίρνουν αποφάσεις με ατελής και όχι αναγκαστικά μαθηματικές πληροφορίες. Τα ασαφή μοντέλα είναι μαθηματικά μέσα που αναπαριστούν ασάφεια και ατελής πληροφορίες. Τα μοντέλα αυτά, έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν, απεικονίζουν, χειρίζονται και μεταφράζουν δεδομένα και πληροφορίες που είναι ασαφή, χωρίς απόλυτη βεβαιότητα.

3.3.2 Fuzzy logic and Maximum Power Point Tracking

Ελεγκτής:

Όπως αναφέρθηκε και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η διαρκής παρακολούθηση της τάσης και η εναλλαγή της τις κατάλληλες χρονικές στιγμές, μπορούν να υποφέρουν σε μεγαλύτερη απόδοση του Φ/Β πάρκου. Για αυτό η χρήση ενός ελεγκτή μεταξύ της πηγής και του φορτίου χρίζεται υποχρεωτική σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιος άλλος αποτελεσματικός τρόπος για να γίνεται MPPT. Ο ελεγκτής αυτός οφείλει να μπορεί να καταγράψει και τις τιμές της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς τα χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πάρκου ποικίλουν ανάλογα των τιμών αυτών των παραμέτρων (Σχήμα 17).



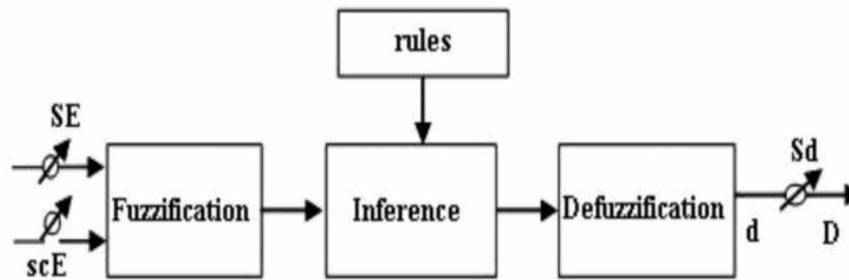
Σχήμα 17: επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας για συνεχή θερμοκρασία (αριστερό σχήμα) – επίδραση θερμοκρασίας για συνεχή ηλιακή ακτινοβολία (δεξιό σχήμα). [13]

Ο ασαφής λογικής διαχειριστής χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της μεθόδου Διαταραχή και Παρακολούθηση (Perturbation and observation method), η οποία παρουσιάστηκε στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, ο ελεγκτής έχει δύο εισόδους και μία έξοδο (Σχήμα 18). Οι εισοδοί είναι ο υπολογισμός του σφάλματος $E(k)$ (error) και της αλλαγής του σφάλματος $CE(k)$ (change of error) την κάθε χρονική στιγμή k : [13]

$$E(k) = \frac{P_{ph}(k) - P_{ph}(k-1)}{V_{ph}(k) - V_{ph}(k-1)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1)$$

Όπου, $P_{ph}(k)$: στιγμιαία ισχύς του ϕ/β γεννήτριας.



Σχήμα 18: Γενικό διάγραμμα του ελεγκτή. [13]

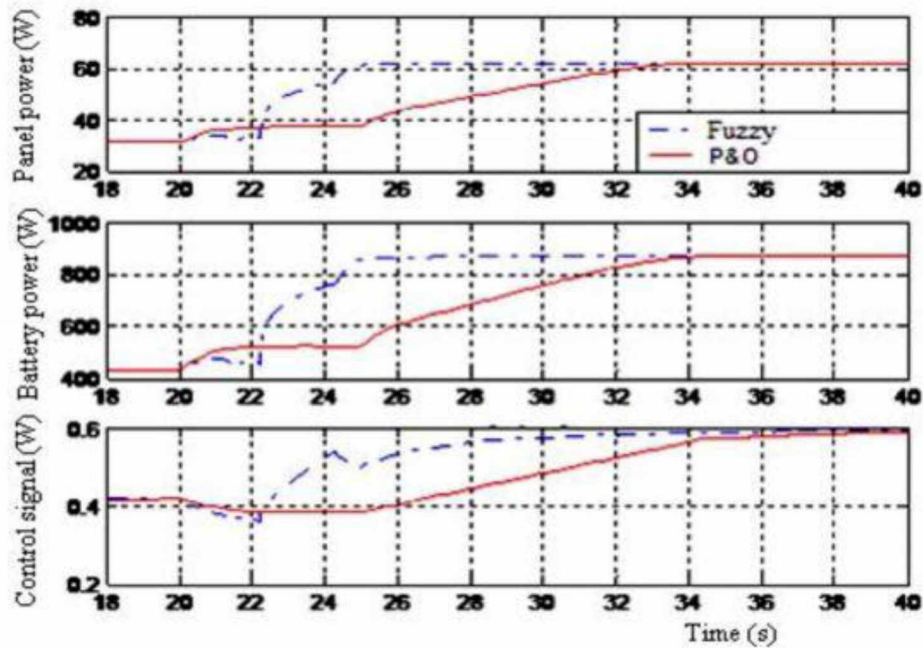
Η μεταβλητή εισόδου error δείχνει αν, την στιγμιαίο σημείο λειτουργίας του φορτίου βρίσκεται στην δεξιά ή την αριστερή μεριά της χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού. Η μεταβλητή εισόδου change of error δείχνει την μεριά εναλλαγής στην χαρακτηριστική.

Το ασαφές συμπέρασμα βγαίνει χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Madani. Η αποασαφοποίηση (defuzzification) χρησιμοποιεί το κέντρο της βαρύτητας του ελεγκτή ασαφής λογικής που υπολογίζεται από τη σχέση: [13]

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)}$$

Η παράμετρος D υποδεικνύει τον κύκλο λειτουργίας, που είναι ο χρόνος κλεισίματος του διακόπτη σε μία περίοδο. Το $\mu(D_j)$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου.

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής συγκρίθηκε με την μέθοδο Διαταραχής και Παρακολούθησης (Perturbation and observation method), και σε κάθε περίπτωση σύγκλινε πιο γρήγορα στο MPP και παρουσίαζε ένα σήμα πιο σταθερό (Σχήμα 19).



Σχήμα 19: Fuzzy and P&O controller responses, για γρήγορη αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (500 W/m^2 σε 5 δευτερόλεπτα στους 25 βαθμούς κελσίου). [13]

3.4 Drones για ευφυή παρακολούθηση φωτοβολταϊκού πάρκου

Η παρακολούθηση των ηλιακών φωτοβολταϊκών σταθμών είναι μία εργασία που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία και συντήρησή τους. Ο ενεργός έλεγχος και η συχνή συντήρηση, βελτιώνουν την απόδοση παραγωγής. Η διαδικασία παρακολούθησης, εξαιτίας των τεχνολογικών εξελίξεων αντικαταστάθηκε από ευφυή συστήματα παρακολούθησης όπως είναι τα ρομπότ και τα drones. Τα drones είναι ιδανικότερα για την ηλιακή βιομηχανία, διότι προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα παρακολούθησης, γρήγορο και εύκολο έλεγχο μεγάλης εμβέλειας, καθώς και αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση μπορούν να ενισχύσουν την λειτουργία των drones και να διευκολύνουν την παρακολούθηση μεγάλων ηλιακών πάρκων. Η λειτουργία των drones επομένως προσφέρει την ευκαιρία της απομακρυσμένης παρακολούθησης. [14]

Πλεονεκτήματα drones:

- Είναι ικανά να συλλάβουν οπτική και θερμική εικόνα υψηλής ανάλυσης των φωτοβολταϊκών μονάδων, που θα ερμηνευτεί από τους αναλυτές για την κατάσταση του πάρκου.
- Εξοικονόμηση χρόνου κατά τις επισκέψεις συντήρησης.
- Ακρίβεια στον εντοπισμό σφάλματος.
- Μακροχρόνια καταγραφή δεδομένων.
- Παρακολούθηση συσσώρευσης σκόνης και πιθανών σκιάσεων.
- Επίβλεψη κατά την εγκατάσταση του Φ/Β πάρκου.
- Γρήγορος εντοπισμός απειλών, όπως η κλοπή υλικού.

Τα drones με AI προσφέρουν ταχύτερη επεξεργασία δεδομένων. Η μηχανική μάθηση είναι τριών τύπων: Ο πρώτος είναι, η μη εποπτευόμενη μάθηση, δηλαδή η ικανότητα να βρεθούν διαφορετικά μοτίβα (ικανότητα εντοπισμού προτύπων). Ο δεύτερος τύπος είναι η εποπτευόμενη μάθηση στην οποία η μάθηση και η ταξινόμηση γίνονται με βάση τους προηγούμενους αλγορίθμους, και ο τρίτος και τελευταίος είναι η εκμάθηση ενίσχυσης με μπότάκια που ακολούθησαν εντολές για στρατηγική παρακολούθηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Με τη χρήση ML τα drones μπορούν να γίνουν ακόμα πιο αποτελεσματικά και αυτόνομα με τον προ-προγραμματισμό τους με αλγορίθμους και μαθηματικά εργαλεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τεχνητή νοημοσύνη και ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας

4.1 Τεχνητή νοημοσύνη για προγνωστική συντήρηση ανανεώσιμων συστημάτων ενέργειας

Η τεχνητή νοημοσύνη δεν περιορίζεται όμως μόνο στα φ/β συστήματα αλλά επεκτείνονται οι εφαρμογές της και στα υπόλοιπα ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας. Στον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η συντήρηση του πάρκου για την ομαλή και αποτελεσματική μακροχρόνια λειτουργία του είναι αρκετά δαπανηρή.

Για παράδειγμα σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, ο καθυστερημένος εντοπισμός μιας ζημιάς μπορεί να οδηγήσει στη διακοπή της παραγωγής της ανεμογεννήτριας για μήνες με αποτέλεσμα να χαθεί μεγάλο ποσό κερδών εκτός από τα απαιτούμενα χρήματα για τη συντήρηση και διόρθωση της ζημιάς. Επομένως είναι κρίσιμη η πρόβλεψη της βλάβης όταν αυτή είναι σε πρώιμο στάδιο για να γίνει και ο σωστός προγραμματισμός επισκευής της.

Για τη δημιουργία συστημάτων AI πρόβλεψης σφαλμάτων απαιτείται ένα σύνολο δεδομένων μεγάλης κλίμακας για την εκπαίδευση της λύσης, γεγονός που χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα. Η συλλογή δεδομένων μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη, αν όχι αδύνατη, για ορισμένα σφάλματα που συμβαίνουν πολύ σπάνια. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η παρουσία ενός έμπειρου επιθεωρητή για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων. Επειδή τα AI μέχρι πρότινος δεν είναι σε θέση να εκτελέσουν πλήρως αυτοματοποιημένη διάγνωση σφαλμάτων από μόνα τους, αναπτύχθηκαν οι AI-βοηθοί. Σε συνεργασία με τον επιθεωρητή, ο AI-βοηθός παρέχει διαγνωστικές προτάσεις για να τον βοηθήσει στη λήψη τελικής απόφασης. Μια τέτοια βοήθεια μπορεί να αναμένεται ότι θα οδηγήσει σε καλύτερη προγνωστική συντήρηση συγκριτικά με τους περιορισμούς της ανθρώπινης επιθεώρησης, όπως κόπωση και μεταβλητότητα μεταξύ επιθεωρητών. [15]

4.1.1 Wind και Fuzzy Logic

Η ασαφής προσέγγιση έχει εφαρμοστεί στην αιολική ενέργεια. Χρησιμοποιείται για οικονομικές αναλύσεις, βοηθάει στην καταγραφή δεδομένων, μπορεί να προβλέψει τον άνεμο και να αξιολογήσει την αιολική ενέργεια. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι η ταχύτητα του ανέμου και η συχνότητα εμφάνισης.

Η θεωρία του ασαφούς συνόλου έχει χρησιμοποιηθεί για να συνδυάσει τις οικονομικές και επενδυτικές επιλογές. Αναπτύχθηκε οικονομικό κριτήριο που βασίζεται σε ασαφή, για την αξιολόγηση των συστημάτων ενεργειακής μετατροπής του ανέμου. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ασαφής μοντελοποίηση για την εκτίμηση και τη βελτιστοποίηση της αιολικής ενέργειας. Υιοθετήθηκαν τεχνικές ασαφούς μοντελοποίησης και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για να εκτιμηθεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας. Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους ήταν υψηλότερη.

Επίσης, το τοπικό κλίμα του ανέμου μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας το περιφερειακό κλίμα του ανέμου που διαμορφώνεται από τοπικά τοπιογραφικά αποτελέσματα, τραχύτητα και εμπόδια στη γύρω περιοχή. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ασαφούς λογικής και γενετικού αλγορίθμου για τη δημιουργία των τοπικών συνθηκών ανέμου και για τη βελτιστοποίηση του ανέμου με τη βοήθεια μία εφαρμογής που ονομάζεται Windsim. Το Windsim είναι μία εφαρμογή στην οποία φορτώνονται τα αρχεία εδάφους που χρησιμοποιούνται ως προσομοίωση για την ανάλυση της ροής του ανέμου. Η γενετική ασαφής μάθηση μιμείται την ανθρώπινη νοημοσύνη και βρέθηκε να παρέχει την καλύτερη λύση σύμφωνα με τις μεταβλητές και τις συνθήκες που επιβάλλονται.

Εκτός από τους συμβατικούς ασαφείς ελεγκτές, οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές ασαφών νευρωνικών δικτύων προτείνονται και αναλύονται για συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας.

Παρουσιάστηκε ένας διαδικτυακός ελεγκτής ασαφών νευρωνικών δικτύων για μεγιστοποίηση της παραγωγής σε ένα σύστημα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Έχει χρησιμοποιηθεί ο παρατηρητής ολίσθησης που έχει μοναδικές ικανότητες. Ο παρατηρητής ολίσθησης είναι μία μη γραμμική μέθοδος ελέγχου που αλλάζει τη δυναμική

ενός μη γραμμικού συστήματος. Εφαρμόζει ένα ασυνεχές σήμα ελέγχου το οποίο δημιουργεί μία κίνηση «ολίσθησης» στο σφάλμα της μετρούμενης παραγωγής κι τις εξόδους του παρατηρητή έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη απόκλιση από την αρχική εκτίμηση. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα έχει μέγιστη ισχύ υψηλή απόδοση και υψηλή αξιοπιστία. Σχεδιάστηκε ένας έλεγχος ελαχιστοποίησης απώλειας (λειτουργίας και απόδοσης) ασαφούς λειτουργίας ολίσθησης για τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator) σε μία ανεμογεννήτρια. Περαιτέρω χρησιμοποιείται ο μηχανισμός ασαφών συμπερασμάτων με κεντρική προσαρμογή για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ορίου αβεβαιότητας. Παρουσιάστηκε επίσης ο σχεδιασμός ενός διαδικτυακού ελεγκτή αναδρομικού ασαφούς νευρικού δικτύου (Recurrent Fuzzy Neural Network) για την ανεμογεννήτρια με έναν παρατηρητή προσαρμοστικού συστήματος αναφοράς μοντέλου υψηλής απόδοσης (Model Reference Adaptive System) για τον έλεγχο χωρίς αισθητήρα μίας επαγωγικής γεννήτριας (Induction Generator). Η βελτιστοποίηση σωματιδίων χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των ποσοστών εκμάθησης στη διαδικασία οπίσθιας διάδοσης του RFNN και για τη βελτίωση της μαθησιακής ικανότητας. Διαπιστώνεται ότι όταν υιοθετούνται ασαφείς ολοκληρωμένες τεχνικές, τα μοντέλα έδωσαν καλύτερη ικανότητα πρόβλεψης.

Εκτεταμένες εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί στην αιολική ενέργεια σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ. Οι έρευνες διεξάγονται γενικά για την εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου, την παρακολούθηση της αιολικής ενέργειας, καθώς και για τον υπολογισμό της μέγιστης εξαγωγής αιολικής ενέργειας. Οι εφαρμογές της ασαφούς λογικής στα συστήματα αιολικής ενέργειας δείχνουν ότι οι ερευνητές έχουν εργαστεί κυρίως σε συστήματα νευρο-ασαφών, ασαφείς γενετικούς αλγόριθμους κλπ. Ακόμη, τα ασαφή ενσωματωμένα μοντέλα συμβάλλουν στην επίτευξη ρεαλιστικών τιμών για οποιαδήποτε επιλεγμένη παράμετρο, όπως αναγνώριση τοποθεσίας αιολικού πάρκου, επιλογή συστημάτων ισχύος, ελεγκτές ισχύος, βελτιστοποίηση ισχύος, ελαχιστοποίηση κόστους και εκπομπών κ.λ.π. Έτσι οι ρεαλιστικές εκτιμήσεις βοήθησαν στον πιο λεπτομερή σχεδιασμό και εκτέλεση έργων. [16]

4.1.2 Bio-Energy and Fuzzy logic

Αρκετές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί με την ασαφή λογική για τη βιομάζα. Το δυναμικό παραγωγής βιομάζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα γης και υδάτινων πόρων. Χρησιμοποιήθηκε από τον Tan [17] ένα ασαφές πολυπεριφερειακό μοντέλο βελτιστοποίησης εισόδου-εξόδου το οποίο αντικατοπτρίζει την παραγωγή και την κατανάλωση βιομάζας υπό περιορισμούς στη γη, το νερό και το αποτύπωμα άνθρακα. Το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού βοηθά στον προσδιορισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα και αιθανόλη με βάση τις εισροές βιομάζας σε περιφερειακό επίπεδο.

Η θεωρία ασαφών συνόλων χρησιμοποιείται επίσης ως εργαλείο αξιολόγησης για την εύρεση της απόδοσης των εγκαταστάσεων βιοαερίου και των τεχνολογιών που βασίζονται στη βιομάζα. Ο Djatkov [18] πρότεινε μια μεθοδολογία αξιολόγησης χρησιμοποιώντας τη θεωρία ασαφών συνόλων και τα ασαφή μαθηματικά για την αξιολόγηση της απόδοσης των γεωργικών μονάδων βιοαερίου στη Γερμανία. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την υιοθέτηση των νέων εξελίξεων στην τεχνολογία βιοαερίου ή της νέας εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή. Ο Ren και οι συνεργάτες του, [19] έχουν αναπτύξει ένα ασαφές μοντέλο πολλαπλών κριτηρίων και πολλαπλών παραγόντων για την αξιολόγηση της αειφορίας των τεχνολογιών που βασίζονται στη βιομάζα για την παραγωγή υδρογόνου. Μελετήθηκαν τέσσερις τεχνολογίες με βάση τη βιομάζα, συμπεριλαμβανομένης της πυρόλυσης, της συμβατικής αεριοποίησης και της ζυμωτικής παραγωγής υδρογόνου. Διαπιστώθηκε ότι η αεριοποίηση της βιομάζας αποτελεί την πιο βιώσιμη επιλογή.

Η ασαφής λογική έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των καλλιεργειών που μπορούν να καλλιεργηθούν αποδοτικά για παραγωγή βιοενέργειας, ενώ χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία ασαφούς βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση των οφελών σε ένα πάρκο βιοενέργειας. Ο Lewis [20] έχει χρησιμοποιήσει ένα ασαφές μοντέλο χωρικής καταλληλότητας, με φυσικές και οικονομικές μεταβλητές για να εντοπίσει μη γεωργικές περιοχές που μπορούν να καλλιεργηθούν χρήσιμα με βιοενέργειες που είναι πιο ανθεκτικές στην ξηρασία. Παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για τη δημιουργία συμβατικού πάρκου βιοενέργειας παρά την ξηρασία. Η ασαφής βελτιστοποίηση

υιοθετείται για να αντισταθμίσει το ατομικό οικονομικό συμφέρον (επένδυση έναντι οφέλους) και τη σταθερότητα κάθε μονάδας επεξεργασίας.

Οι εφαρμογές της ασαφούς λογικής στη βιοενέργεια είναι λιγότερες. Η έρευνα στον τομέα της βιοενέργειας αφορά κυρίως τον προσδιορισμό των καλλιεργειών βιοενέργειας, τη βιοπαραγωγή, τη βέλτιστη εξόρυξη βιομάζας. Έχει ήδη καθοριστεί τόσο στην ηλιακή ενέργεια όσο και στην αιολική, ότι η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρεαλιστική ενεργειακή μοντελοποίηση. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ευρεία εμβέλεια για έρευνα στον κλάδο της βιοενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω που μπορούν να υιοθετηθούν για βέλτιστο σχεδιασμό πόρων λαμβάνοντας υπόψη οικονομικές, περιβαλλοντικές, γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Τέτοια κριτήρια μπορούν να ενσωματωθούν στα μοντέλα και να μελετηθούν. Σε τροπικές χώρες όπου υπάρχει πλούσιος βιολογικός πόρος, μπορεί να διεξαχθεί έρευνα χρησιμοποιώντας μοντέλα με ασαφή λογική για τη βέλτιστη χρήση των βιολογικών πόρων για εθνικά και παγκόσμια οφέλη.

4.1.3 Hybrid Systems and Fuzzy logic

Ασαφείς λογικοί ελεγκτές χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή μέγιστης ισχύος είτε από ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες ή υβριδικά συστήματα. Οι Bilodeau και Agbossou [21] παρουσίασαν ένα μοντέλο για αυτόνομο σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου που ελέγχεται από έναν ελεγκτή δυναμικής ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Controller). Το μοντέλο παρουσιάζει έναν ηλεκτρολύτη που παράγει υδρογόνο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ, δηλαδή τον άνεμο και τα φωτοβολταϊκά. Αυτό χρησιμοποιείται στην κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύεται η απόδοση του ελεγκτή δυναμικής ασαφούς λογικής και βρέθηκε ότι το μοντέλο είναι χρήσιμο για αποτελεσματικό έλεγχο ισχύος. Έχει χρησιμοποιηθεί ελεγκτής ασαφούς λογικής για τη λήψη μέγιστης παρακολούθησης ισχύος για φωτοβολταϊκή και αιολική ενέργεια. Οι τροφοδοσίες περίσσειας ισχύος χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου για την τροφοδοσία των κυψελών καυσίμου. Ένας ασαφούς λογικής ελεγκτής χρησιμοποιήθηκε ακόμη σε αυτόνομο σύστημα ισχύος αέρα-υδρογόνου όπου το υποσύστημα υδρογόνου λειτουργεί τόσο για αποθήκευση ενέργειας όσο και ως ελεγκτής ενεργού φορτίου.

Ο Datta [22] έχει χρησιμοποιήσει έναν ασαφή μηχανισμό ελέγχου για την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων ισχύος εξόδου του υβριδικού συστήματος ισχύος φωτοβολταϊκών-ντίζελ. Αυτή η μέθοδος βοήθησε στην εξέταση του αντικρουόμενου στόχου της εξισορρόπησης ισχύος εξόδου και της μεγιστοποίησης της δέσμευσης ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι αποτελεσματικό στην εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της φωτοβολταϊκής ισχύος και στη μείωση των αποκλίσεων συχνότητας. Και οι δύο έρευνες δείχνουν την ακεραιότητα στους υπολογισμούς που πραγματοποιεί ο ελεγκτής λόγω της χρήσης ασαφούς λογικής.

Διευρευνήθηκε η διαχείριση της ενέργειας με ασαφή λογική, σε ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά πάνελ, κυψέλη καυσίμου για παροχή εφεδρικής ισχύος και μονάδα μπαταρίας για την αποθήκευση της πιθανής πλεονάζουσας παραγωγής ενέργειας και την παροχή του παροδικού φορτίου. Ο έξυπνος ελεγκτής ρυθμίζει τη συνολική ροή ενέργειας. Εκτός από τη χρήση της ασαφούς λογικής που χρησιμοποιείται ως ελεγκτής σε υβριδικά συστήματα ισχύος, χρησιμοποιείται επίσης για το μέγεθος των ενεργειακών συστημάτων. Οι συγγραφείς έχουν πραγματοποιήσει ανάλυση απόδοσης σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας ασαφή λογική, για να προσδιορίσουν το βέλτιστο μέγεθος ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας που αποτελείται από ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά πάνελ και κυψέλη καυσίμου. Διαπιστώνεται ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος βελτιώνεται για μικρότερα φορτία.

Οι τεχνικές που υιοθετήθηκαν έδωσαν καλές ρεαλιστικές εκτιμήσεις και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας ασαφείς βασισμένες έννοιες ήταν υψηλής ακρίβειας. Η έρευνα χρησιμοποιώντας ασαφή λογική έχει γίνει σε μια ποικιλία επιστημονικών κλάδων, όπως η μέγιστη απόδοση ισχύος από τους ελεγκτές, η επιλογή του καλύτερου ενεργειακού πόρου, η βελτιστοποίηση παραμέτρων. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη ευρύ πεδίο για περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα σε διάφορους τομείς προβλημάτων.

4.2 Μελλοντικές προτάσεις για εφαρμογές Artificial Intelligence

- Η πειραματική εφαρμογή, συμπεριλαμβανομένης της διαδικτυακής επαλήθευσης της μηχανικής μάθησης, της βαθιάς μάθησης είναι πολύ περιορισμένη και θα

πρέπει να εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο για να δείξουν την αποτελεσματικότητά τους.

- Υβριδικές τεχνικές βασιζόμενες σε AI είναι ικανές να βοηθήσουν στη βελτίωση της ταξινόμησης σφαλμάτων και της αναγνώρισης της φύσης των βλαβών. Επιπλέον, διαφορετικές διαμορφώσεις της βαθιάς μάθησης θα μπορούσαν επίσης να συμβάλουν στην πρόοδο της διάγνωσης σφαλμάτων με βάση τις εικόνες.
- Η AI θα συνεχίσει να παίζει σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της ποιότητας της παρακολούθησης και της διάγνωσης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που έχουν εγκατασταθεί σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Αυτό μπορεί να βοηθήσει τους χρήστες να ελέγξουν τα φωτοβολταϊκά τους συστήματα στο διαδίκτυο, να προβλέψουν πιθανά σφάλματα, να οπτικοποιήσουν την εξέλιξη διαφόρων παραμέτρων και να αναλύσουν τα δεδομένα.
- Με τη διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου δεδομένων που συλλέγονται, που ονομάζονται μεγάλα δεδομένα, και την ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων βαθιάς μάθησης, η πρόβλεψη σφαλμάτων θα είναι δυνατή και αυτό θα είναι πολύ ελπιδοφόρο στο εγγύς μέλλον. [23]

4.3 Το υδρογόνο σαν μελλοντική πηγή ενέργειας

Το υδρογόνο είναι ένας από τους πιο υποσχόμενους μελλοντικούς φορείς ενέργειας, και μία από τις πιο ελπιδοφόρες ιδέες είναι ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα που συνδυάζει την ηλιακή ακτινοβολία και το υδρογόνο. Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι είναι καθαρό χωρίς βλάβη για το περιβάλλον και είναι ανανεώσιμο [24]. Το υδρογόνο φημίζεται ότι είναι ένας ενεργειακός φορέας του μέλλοντος και μπορεί όχι μόνο να χρησιμοποιείται ως άμεση μορφή ενέργειας για καύσιμο για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Επί του παρόντος, παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, που απελευθερώνουν αέρια θερμοκηπίου και άλλους κλιματικούς ρύπους. Θερμοχημικοί κύκλοι, όπως κύκλος υβριδίου-θείου, ο κύκλος με βάση το οξειδίο του μετάλλου και η ηλεκτρόλυση του νερού είναι οι πιο υποσχόμενες διαδικασίες για περιβαλλοντικά καλοήθη παραγωγή υδρογόνου για το μέλλον. Μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια με διαφορετικούς τρόπους δηλαδή χρησιμοποιώντας ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια και ηλιακή θερμική

ενέργεια. Η ιδέα της χρήσης ηλιακής ενέργειας είναι η προστασία του περιβάλλοντος από τις ανεπιθύμητες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου με 4 τρόπους. Η ηλεκτρόλυση νερού χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκό είναι πιο ώριμη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Η φωτοηλεκτρόλυση είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και το υλικό κόστος, καθώς και άλλα πρακτικά ζητήματα δεν έχουν ακόμη λυθεί. Οι φωτοβιολογικές διαδικασίες είναι ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και μέχρι στιγμής μόνο χαμηλή αποτελεσματικότητα μετατροπής έχει επιτευχθεί. Οι διαδικασίες υψηλής θερμοκρασίας χρειάζονται περαιτέρω ανάπτυξη υλικών, η οποία επικεντρώνεται στις υψηλές μεμβράνες θερμοκρασίας και εναλλάκτες θερμότητας για ηλιακές θερμικές διαδικασίες. Επομένως, τα συστήματα αξιοποίησης ηλιακού υδρογόνου παγκοσμίως, αποτελούνται κυρίως από φωτοβολταϊκά συστήματα υδρογόνου για μεταφορά και σταθερές εφαρμογές. Η φιλική παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλιακής ενέργειας είναι πολύ απαραίτητη για τη διατήρηση και προστασία του περιβάλλοντος καθώς δεν εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου σε αυτό, κατά τη λειτουργία. Προς το παρόν είναι ένα δύσκολο έργο για τους ερευνητές και τους επιστήμονες καθώς η ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι χαμηλή επομένως και η συνολική ενεργειακή απόδοση ενός ηλιακού συστήματος υδρογόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Απόρροια λοιπόν, των μεγάλων και συνεχόμενων ρύπων που παράγονται από τα ορυκτά καύσιμα, ο πλανήτης μας καλείται να αντιμετωπίσει τις επιπτώσεις που προκαλούνται εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Η παραγωγή πράσινης ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές που προσφέρονται, πρέπει να αξιοποιηθεί άμεσα, πριν τα αποτελέσματα γίνουν μη αντιστρέψιμα. Απαιτείται λοιπόν βέλτιστη προσπάθεια παραγωγής πράσινης ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο έρχεται να παίξει καίριο ρόλο η αναπτυσσόμενη τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα η τεχνητή νοημοσύνη. Η τεχνητή νοημοσύνη πρέπει να ενσωματωθεί στους ήδη υπάρχοντες τρόπους παραγωγής ενέργειας. Προς το παρόν, συγκριτικά με τις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνητή νοημοσύνη, ένα μικρό ποσοστό της συμμετέχει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε βάθος χρόνου όμως υπάρχουν προδιαγραφές και ελπιδοφόρα δείγματα για να γίνει πιο αισθητή η παρουσία της στην αξιοποίηση της πράσινης ενέργειας. Με την εφαρμογή της, θα επιτευχθούν καλύτερες επιδόσεις στην παραγωγή και στην αποθήκευση της. Επιπλέον, κλάδοι της τεχνητής νοημοσύνης, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και η ασαφής λογική συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση και στην ταχύτερη αντιμετώπιση των λαθών που μπορούν να καθυστερήσουν την παραγωγή. Είναι σημαντικό να αναζητηθούν άλλες πηγές ενέργειας που μπορούν να αξιοποιηθούν χωρίς να είναι ζημιογόνες για το περιβάλλον, όπως είναι το υδρογόνο.

Τέλος αν και σε πρώιμο στάδιο, η ταχεία εξέλιξη και ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και των κλάδων της στην παραγωγή και την αποθήκευση πράσινης ενέργειας, είναι φέρελπις και υποσχόμενη, για την αντιμετώπιση, ήδη υπαρχουσών δυσκολιών και πιθανών αναδυόμενων προβλημάτων σε βάθος χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπανίκος Δ.-Κ., *ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ*, Αθήνα, 2017, p. 61.
- [2] Αναστασόπουλος Λ., *ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ - ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑΣ*, Βόλος, 2020, p. 58.
- [3] ΜΑΜΑΚΗΣ Χ. και ΣΚΛΗΒΑΣ Α., *ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Φ/Β ΠΑΡΚΟΥ*, ΠΑΤΡΑ, 2017, p. 93.
- [4] Δαμιανίδης Μ., Κατσαρός Γ., Τόλης Μ. και Στεργιόπουλος Φ., *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων*, Θεσσαλονίκη: ΤΕΕ/ΤΚΜ, 2011, p. 162.
- [5] Μακρή Β., *"Πράσινη Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά στον οικιακό τομέα"*, Αθήνα, 2011, p. 132.
- [6] Κυρίτσης Χ. Α., *Μελέτη εγκατάστασης Φωτοβολταϊκού πάρκου*, Αθήνα, 2014, p. 59.
- [7] Κομπούγιας Ι., Κυρίτσης Α., Νανάκος Α. και Τατάκης Ε., *Σύγχρονες εξελίξεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα για διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας*, Αθήνα: Διήμερο ΤΕΕ: Ηλεκτρονικά Ισχύος, Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης και Βιομηχανικές Εφαρμογές, 2006, p. 11.
- [8] U. U. Khan, M. Raheem, S. Ata και Z. H. Khan, «Design and implementation of a low-cost MPPT controller for solar PV system,» σε *2016 International Conference on Open Source Systems Technologies (ICOSST)*, 2016.
- [9] S. Messalti, A. G. Harrag και A. E. Loukriz, «A new neural networks MPPT controller for PV systems,» σε *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*, 2015.
- [10] Kulaksiz, . A. Afşin και R. Akkaya, *Training data optimization for ANNs using genetic algorithms to enhance MPPT efficiency of a stand-alone PV system*, *Sel,cuk*, 2011, pp. 241-254.
- [11] A. Mellit, M. Benghanem, A. H. Arab και A. Guessoum, «An adaptive artificial neural network model for sizing stand-alone photovoltaic systems: application for isolated sites in Algeria,» *Renewable Energy*, τόμ. 30, pp. 1501-1524, 2005.
- [12] S. Samara και E. Natsheh, «Intelligent Real-Time Photovoltaic Panel Monitoring System Using Artificial Neural Networks,» *IEEE Access*, τόμ. 7, pp. 50287-50299, 2019.
- [13] M. A. Cheikh, . C. Larbes, G. T. Kebir και . A. Zerguerras, *Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme*, *Revue des energies Renouvelables*, 2007, pp. 387-395.
- [14] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano και V. Jayaseelan, «On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants,» *Procedia Computer Science*, τόμ. 133, pp. 585-593, 2018.
- [15] W. Shin, J. Han και W. Rhee, «AI-assistance for predictive maintenance of renewable energy systems,» *Energy*, τόμ. 221, p. 119775, 2021.

- [16] L. Suganthi, S. Iniyar και A. A. Samuel, «Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 48, pp. 585-607, 2015.
- [17] R. R. Tan, K. B. Aviso, I. U. Barilea, A. B. Culaba και J. B. Cruz, «A fuzzy multi-regional input–output optimization model for biomass production and trade under resource and footprint constraints,» *Applied Energy*, τόμ. 90, pp. 154-160, 2012.
- [18] D. Djatkov, M. Effenberger, A. Lehner, M. Martinov, M. Tesic και A. Gronauer, «New method for assessing the performance of agricultural biogas plants,» *Renewable Energy*, τόμ. 40, pp. 104-112, 2012.
- [19] J. Ren, A. Fedele, M. Mason, A. Manzardo και A. Scipioni, «Fuzzy Multi-actor Multi-criteria Decision Making for sustainability assessment of biomass-based technologies for hydrogen production,» *International Journal of Hydrogen Energy*, τόμ. 38, pp. 9111-9120, 2013.
- [20] S. M. Lewis, G. Fitts, M. Kelly και L. Dale, «A fuzzy logic-based spatial suitability model for drought-tolerant switchgrass in the United States,» *Computers and Electronics in Agriculture*, τόμ. 103, pp. 39-47, 2014.
- [21] A. Bilodeau και K. Agbossou, «Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications,» *Journal of Power Sources*, τόμ. 162, pp. 757-764, 2006.
- [22] M. Datta, T. Senjyu, A. Yona και T. Funabashi, «A fuzzy based method for leveling output power fluctuations of photovoltaic-diesel hybrid power system,» *Renewable Energy*, τόμ. 36, pp. 1693-1703, 2011.
- [23] A. Mellit και S. Kalogirou, «Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 143, p. 110889, 2021.
- [24] E. Sacramento, L. Lima, C. Oliveira και T. Veziroglu, *A Hydrogen Energy System and Prospects for Reducing Emissions of Fossil Fuels Pollutants in the Ceará State—Brazil*, *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2019, pp. 28-35.
- [25] Ε. Ρ. Γκιρίτη, *ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ Φ/Β ΠΑΡΚΟΥ*, Αθήνα, 2015, p. 105.