



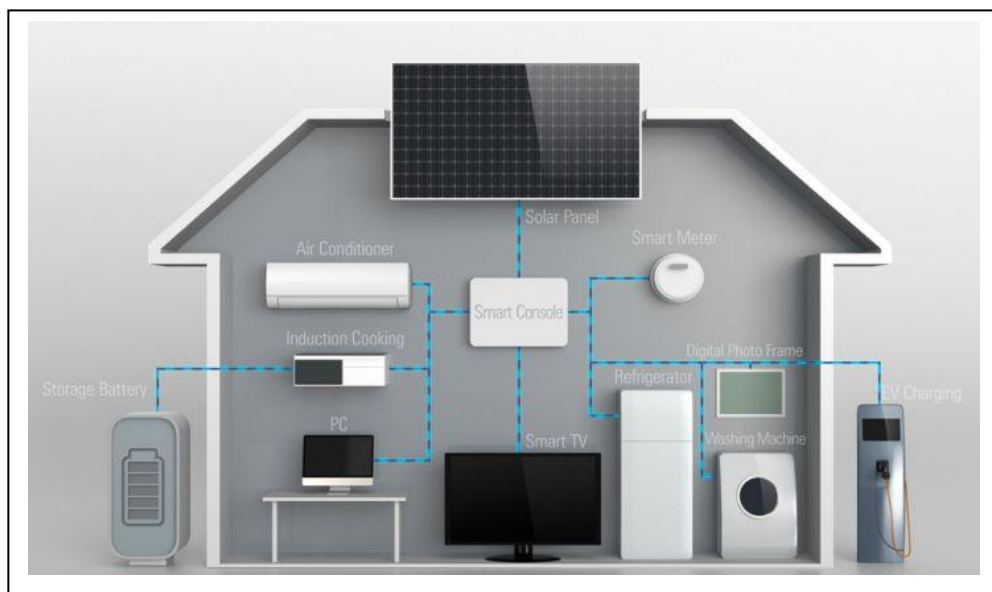
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



Φοιτητής: Απόστολος Κλής

ΑΜ: 50106680

Επιβλέπων Καθηγητής

Γρηγόριος Κουλούρας
Αναπληρωτής καθηγητής

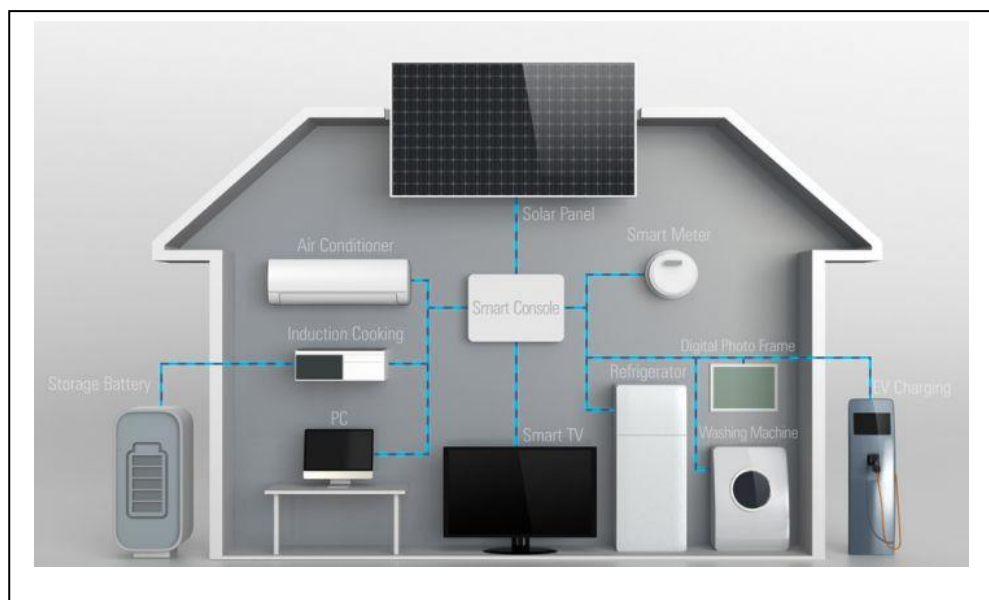
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Μάρτιος 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Smart energy monitoring and management based on Internet of Things technology in autonomous (off-grid) homes



Student: Apostolos Klis
Registration Number: 50106680

Supervisor

Grigorios Koulouras
Associate Professor

ATHENS-EGALEO, March 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Γρηγόριος Κουλούρας, Αναπληρωτής Καθηγητής	Σωτήριος Καραμπέτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Παναγιώτης Τσιάκας, Λέκτορας
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Απόστολος Κλής,
Μάρτιος, 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Απόστολος Κλής του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 50106680 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών
Απόστολος Κλής



Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου τον Δρ. Γρηγόριο Κουλούρα για την καθοδήγηση, την υπομονή του καθώς και για τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε του καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Περίληψη

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, τόσο σε οικιακό, όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς της σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα ηλιακά αυτά συστήματα εξοικονομούν ενέργεια η οποία παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές που είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον. Επιπλέον, τροφοδοτούν μια οικία ή μια επιχείρηση με την απαιτούμενη ενέργεια ώστε αυτές να λειτουργούν πλήρως ή μερικώς αυτονομημένα από το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Για την βέλτιστη απόδοση ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται η επιτήρηση της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας η οποία υλοποιείται με την χρήση έξυπνων μετρητών.

Οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, την καταναλισκόμενη ενέργεια της οικίας, καθώς και την στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας των μπαταριών. Η συλλογή των δεδομένων της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με την χρήση αισθητήρων που λειτουργούν με το φαινόμενο Hall. Έπειτα, πραγματοποιώντας την κατάλληλη επεξεργασία παρέχονται σε πραγματικό χρόνο τα απαραίτητα στοιχεία για την απεικόνιση και την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον χρήστη.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επικεντρώνεται στην διαστασιοποίηση και τεχνικοοικονομική μελέτη μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής οικίας. Επιπλέον, υλοποιείται ένα ευφύες σύστημα διαχείρισης και καταγραφής της παραγόμενης, καταναλισκόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας με την χρήση έξυπνων μετρητών ενέργειας και με την χρήση της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους έξυπνους μετρητές ενέργειας αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων χρονοσειρών (Time Series DataBase - TSDB). Έπειτα, πραγματοποιείται κατάλληλη επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Επίσης, υλοποιούνται γραφήματα τα οποία ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση του συστήματος. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν κατά την υλοποίηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

Λέξεις – κλειδιά

Αυτόνομα Συστήματα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Έξυπνοι μετρητές, Επεξεργασία Καταναλώσεων, Υπολογιστική Νέφος, Φωτοβολταϊκά Συστήματα.

Abstract

The utilization of solar energy as the primary source for electricity generation is steadily increasing, both in residential and industrial settings, owing to its superior efficiency compared to other renewable energy sources. These solar systems not only produce energy but also mitigate reliance on non-renewable sources that pose environmental hazards. Furthermore, they empower homes and businesses to operate autonomously or partially independent of the public electrical grid. To ensure optimal electricity management, monitoring the production and consumption of energy is imperative, a task efficiently accomplished through the integration of smart meters.

Smart energy meters offer real-time monitoring of energy generation from photovoltaic systems, household energy consumption, and battery storage levels. The collection of electricity consumption data relies on sensors employing the Hall effect. Subsequently, through appropriate processing, real-time data visualization and user electricity consumption optimization are facilitated.

This diploma thesis presents the dimensioning and technical-economic evaluation of an autonomous photovoltaic household. Moreover, it entails the implementation of an intelligent management and monitoring system for tracking produced, consumed, and stored energy. This is achieved by employing smart energy meters and using Internet of Things (IoT) technology. The data collected by these meters are stored in a Time Series DataBase (TSDB) and processed in real-time to enhance system performance. Additionally, dynamic graphs and dashboards are incorporated to provide real-time data insights into the system's status. Ultimately, conclusions are drawn based on the implementation and findings of this thesis.

Keywords

Off-grid systems, Renewable energy sources, Internet of Things, Smart energy metering, Processing of electrical loads, Cloud Computing, Photovoltaic systems.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	11
Κατάλογος Εικόνων	12
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	19
Σκοπός και Στόχοι.....	20
Μεθοδολογία.....	20
Καινοτομία	21
Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	21
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Αυτόνομα Οικιακά Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	23
1.1 Αυτόνομα Οικιακά Φωτοβολταϊκά Συστήματα	23
1.2 Κανονιστικό Πλαίσιο Σήμερα στην Ελλάδα	25
1.3 Τα μέρη ενός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος	26
1.3.1 Φωτοβολταϊκά Πάνελ.....	27
1.3.2 Ελεγκτές Φόρτισης.....	33
1.3.3 Μπαταρίες	44
1.3.4 Αντιστροφείς.....	55
1.4 Συνδεσμολογία Συστήματος	71
1.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	72
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Σχεδιασμός και Τεχνικοοικονομική Μελέτη	73
2.1 Υπολογισμός Καταναλώσεων Οικίας	73
2.2 Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Πάνελ	75
2.3 Υπολογισμός Ελεγκτή Φόρτισης	77
2.4 Υπολογισμός Αντιστροφήα.....	78
2.5 Υπολογισμός Χωρητικότητας Μπαταριών	79
2.6 Τεχνικοοικονομική Μελέτη	80
2.7 Επαλήθευση Υπολογισμών.....	82
2.7.1 Εργαλεία Υπολογισμών	84
2.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	86
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Τεχνολογίες Νεφοϋπολογιστικής και ΔτΠ	87
3.1 Νεφοϋπολογιστική και IaaS	87
3.1.1 VMs	90
3.1.2 Containers.....	92
3.1.3 Docker Compose.....	94
3.2 Βάσεις Δεδομένων	96
3.2.1 SQL	96
3.2.2 No-SQL	97
3.2.3 Time Series DataBases	98
3.3 Τεχνολογίες Επικοινωνιών και Ασφάλεια στο ΔτΠ	102
3.3.1 MQTT	104
3.3.2 BLE.....	113
3.3.3 SSH	117
3.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	120
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Σχεδιασμός Ευφυούς Συστήματος Εποπτείας και Διαχείρισης	122
4.1 Διάγραμμα Ευφυούς Συστήματος.....	122
4.2 Έξυπνοι Μετρητές Ενέργειας	124

4.2.1	Shelly Plus Plug S.....	125
4.2.2	Shelly EM.....	127
4.3	Υπηρεσίες Νεφοϋπολογιστικής	128
4.3.1	Nginx Proxy Manager.....	130
4.3.2	Δημιουργία DNS	131
4.3.3	Mosquitto MQTT Broker.....	132
4.3.4	Node-RED.....	133
4.3.5	InfluxDB.....	134
4.3.6	Grafana	137
4.4	Συμπεράσματα Κεφαλαίου	139
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Αποτελέσματα Λειτουργίας του Ευφυούς Συστήματος.....	140
5.1	Δημιουργία Ροών.....	140
5.2	Δημιουργία Απεικονίσεων	144
5.3	Δημιουργία και Αποστολή Ειδοποιήσεων	150
5.3.1	Telegram Bot.....	155
5.4	Αποτελέσματα Λειτουργίας.....	157
5.5	Συμπεράσματα Κεφαλαίου	159
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	160
	Βιβλιογραφία.....	161
	Παράρτημα Α - Shelly MQTT Scripts.....	164
	Παράρτημα Β - Συναρτήσεις για την Άντληση Δεδομένων από την Πρίζα ShellyPlusPlug S	166
	Παράρτημα Γ- Το Αρχείο docker-compose.yml.....	168

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1.1 Τυπικές Καταναλώσεις Οικίας	74
Πίνακας 2.6.1 Κόστος Υλικών Αυτόνομης Φωτοβολταϊκής Οικίας.....	80
Πίνακας 2.6.2 Υπολογισμός ROI και Net Benefit	81

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα	23
Εικόνα 1.2 Μοντέλο Ηλιακής Κυψέλης.....	27
Εικόνα 1.3 Απόδοση Πολυκρυσταλλικής Κυψέλης σε Συνάρτηση με την Θερμοκρασία	29
Εικόνα 1.4 Σχέση μεταξύ Θερμοκρασίας Φωτοβολταϊκής Μονάδας με την Θερμοκρασία της	31
Εικόνα 1.5 Διάγραμμα Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας ανά Μήνα στην Αθήνα	32
Εικόνα 1.6 Μπλοκ Διάγραμμα Συνδεσμολογίας PWM Ελεγκτή	34
Εικόνα 1.7 Παλμός Πλήρης Φόρτισης Μπαταριών	34
Εικόνα 1.8 Παλμός Φόρτισης στο 50% Χωρητικότητας των Μπαταριών	34
Εικόνα 1.9 Παλμός Φόρτισης κοντά στην Εκφόρτιση των Μπαταριών	35
Εικόνα 1.10 Εύρεση Μέγιστου Σημείου Ισχύος Φωτοβολταϊκού Πάνελ	36
Εικόνα 1.11 Εντοπισμός Μέγιστου Σημείου Ισχύος με την Ύπαρξη Φορτίου	37
Εικόνα 1.12 Καμπύλη I-V-P για τον Εντοπισμό των V_m , I_m και P_m	37
Εικόνα 1.13 Μείωση Ισχύος όταν η Τάση είναι Χαμηλή	38
Εικόνα 1.14 Μείωση Ισχύος όταν η Τάση είναι Υψηλή	38
Εικόνα 1.15 Μπλοκ Διάγραμμα MPPT ελεγκτή	38
Εικόνα 1.16 Μπλοκ Διάγραμμα Υλοποιήσεως της Μεθόδου βήτα.....	41
Εικόνα 1.17 Διάγραμμα Εντοπισμού MPP με Μεταβολή της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	41
Εικόνα 1.18 Μπλοκ Διάγραμμα Υλοποίησης P&O Αλγορίθμου	42
Εικόνα 1.19 Ο Αλγόριθμος P&O.....	42
Εικόνα 1.20 Μπλοκ Διάγραμμα Αλγορίθμου InCod	42
Εικόνα 1.21 Θέσεις Παραγώγου $\frac{dV}{dP}$ στο Διάγραμμα P-V ενός Φωτοβολταϊκού Πάνελ	43
Εικόνα 1.22 Ο Αλγόριθμος Υλοποίησης InCod.....	43
Εικόνα 1.23 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα με την Χρήση Μπαταριών	44
Εικόνα 1.24 Κόστη Συστήματος σε Συνάρτηση με Ζωή της Μπαταρίας	45
Εικόνα 1.25 Διάγραμμα Αρχής Λειτουργίας Ηλεκτροχημικών Μπαταριών.....	45
Εικόνα 1.26 Σύγκριση Αποτελεσματικότητας Διαφόρων Τύπων Μπαταριών	48

Εικόνα 1.27 Πίνακας Κατηγοριοποίησης Ανάλογα με τις Συνθήκες Λειτουργίας.....	49
Εικόνα 1.28 Κρίσιμα Σημεία κατά την Διάρκεια Φόρτισης Εκφόρτισης.....	51
Εικόνα 1.29 Διάγραμμα Σύγκρισης Χρόνου Φόρτισης των Μεθόδων Συνεχούς Τάσης και Ρεύματος	52
Εικόνα 1.30 Σύγκριση Χαρακτηριστικών Μπαταριών Μόλυβδου με Λιθίου	53
Εικόνα 1.31 Συσχετισμός Διάρκειας Φόρτισης με την Αποδοτικότητα μιας LiFePO ₄ μπαταρίας.....	54
Εικόνα 1.32 Διάγραμμα χωρητικότητας τάσης φόρτισης και κατάστασης φόρτισης.....	54
Εικόνα 1.33 Μπλοκ Διάγραμμα αντιστροφέα	55
Εικόνα 1.34 Δομή Αντιστροφέας Πρώτης Γενιάς.....	57
Εικόνα 1.35 Περίβλημα Αντιστροφέα Δεύτερης Γενιάς	57
Εικόνα 1.36 Δομή Ηλεκτρομηχανικών Μερών Αντιστροφέα Δεύτερης Γενιάς.....	58
Εικόνα 1.37 Δομή αντιστροφέα Ενισχυμένης Τάσης Εξόδου Δεύτερης Γενιάς.....	59
Εικόνα 1.38 Δομή Αντιστροφέα Τρίτης Γενιάς.....	59
Εικόνα 1.39 Δομή Αντιστροφέα Ενισχυμένης Τάσης Εξόδου Τρίτης Γενιάς.....	59
Εικόνα 1.40 Τοπολογίες MSPC και SSPC	61
Εικόνα 1.41 Υποκατηγορίες Τοπολογίας DC-AC-DC-AC.....	62
Εικόνα 1.42 Τοπολογία DC-DC-AC.....	63
Εικόνα 1.43 Τοπολογία TSPCS Συστημάτων	65
Εικόνα 1.44 Τεχνολογία DCMLI.....	66
Εικόνα 1.45 Συνδεσμολογία Φωτοβολταϊκών πάνελ με Αντιστροφείς	70
Εικόνα 2.1 Ενεργειακή ετικέτα συσκευής.....	73
Εικόνα 2.2 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πάνελ	75
Εικόνα 2.3 Μέσος Όρος Ωρών Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	75
Εικόνα 2.4 Χαρακτηριστικά MPPT	77
Εικόνα 2.5 Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα.....	78
Εικόνα 2.6 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μπαταρίας.....	79
Εικόνα 2.7 Έκθεση Επαλήθευσης Υπολογισμών από το Εργαλείο PVGIS	83
Εικόνα 2.8 Το Σύστημα PVGIS	85
Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική Νεφούπολογιστικής.....	88

Εικόνα 3.2 Λειτουργία IaaS	89
Εικόνα 3.3 Δομή Εικονικής Αρχιτεκτονικής.....	90
Εικόνα 3.4 Δομή Docker Container	92
Εικόνα 3.5 Παράδειγμα Docker compose αρχείου.....	94
Εικόνα 3.6 TICK stack	100
Εικόνα 3.7 Δομή InfluxDB.....	101
Εικόνα 3.8 Αρχιτεκτονική MQTT	104
Εικόνα 3.9 Αρχιτεκτονική Pub/Sub	105
Εικόνα 3.10 TCP/IP Stack.....	106
Εικόνα 3.11 Επικοινωνία MQTT over TCP.....	108
Εικόνα 3.12 Χειραψία TLS	110
Εικόνα 3.13 Αρχιτεκτονική BLE	114
Εικόνα 3.14 Το Πρωτόκολλο SSH	117
Εικόνα 3.15 Χειραψία SSH	118
Εικόνα 4.1 Μπλοκ Διάγραμμα Ευφυούς συστήματος.....	122
Εικόνα 4.2 Πρίζα Shelly Plus Plug S	125
Εικόνα 4.3 Περιβάλλον Ρύθμισης Shelly Plus Plug S.....	126
Εικόνα 4.4 Περιβάλλον Ρύθμισης Πρίζας Shelly.....	126
Εικόνα 4.5 Διάγραμμα Συνδεσμολογίας Shelly EM	127
Εικόνα 4.6 Πίνακας Ελέγχου Εικονικού Μηχανήματος	129
Εικόνα 4.7 Απομακρυσμένη Είσοδος στο Εικονικό μηχάνημα	129
Εικόνα 4.8 Περιβάλλον Εφαρμογής DuckDNS	131
Εικόνα 4.9 Ρύθμιση Mosquitto MQTT Broker.....	132
Εικόνα 4.10 Το Πρόγραμμα Node-RED	133
Εικόνα 4.11 Είσοδος στην InfluxDB.....	134
Εικόνα 4.12 Βάση Δεδομένων InfluxDB	134
Εικόνα 4.13 Δημιουργία Bucket στην InfluxDB.....	135
Εικόνα 4.14 Μενού Bucket InfluxDB	135

Εικόνα 4.15 Επιλογή Χρόνου Διατήρησης Δεδομένων και Όνομα Bucket InfluxDB	135
Εικόνα 4.16 Δομή Bucket InfluxDB.....	136
Εικόνα 4.17 Είσοδος στο Grafana	137
Εικόνα 4.18 Το Πρόγραμμα Grafana.....	138
Εικόνα 5.1 Εγγραφή στο θέμα της έξυπνης πρίζας.....	140
Εικόνα 5.2 Διαχωρισμός δεδομένων στο Node-RED	141
Εικόνα 5.3 Δεδομένα θέματος έξυπνης πρίζας	141
Εικόνα 5.4 Απεικόνιση Node-RED	142
Εικόνα 5.5 Επεξεργασία δεδομένων με την χρήση Function στο Node-RED	142
Εικόνα 5.6 Ρύθμιση InfluxDB out κόμβου.....	143
Εικόνα 5.7 Αποστολή δεδομένων στην InfluxDB μέσω Node-RED.....	143
Εικόνα 5.8 Μενού Grafana Datasource	144
Εικόνα 5.9 Δημιουργία Grafana Data Source	144
Εικόνα 5.10 Εισαγωγή Data Source InfluxDB στο Grafana	145
Εικόνα 5.11 Μήνυμα επιτυχούς εγκατάστασης Grafana Data Source	145
Εικόνα 5.12 Δημιουργία dashboard στο Grafana	146
Εικόνα 5.13 Εισαγωγή Νέου Grafana Dashboard	146
Εικόνα 5.14 Προσθήκη Απεικόνισης στο Grafana	146
Εικόνα 5.15 Grafana Dashboard	147
Εικόνα 5.16 Grafana Dashboard ShellyInfo.....	148
Εικόνα 5.17 Grafana Dashboard ShellyPlusPlug Alerts.....	148
Εικόνα 5.18 Grafana Dashboard Solar Panel.....	149
Εικόνα 5.19 Δημιουργία Query.....	150
Εικόνα 5.20 Δημιουργία Πολιτικής Ειδοποίησης στο Grafana	150
Εικόνα 5.21 Χρονικό Όριο Πολιτικής Ειδοποιήσεων Grafana	151
Εικόνα 5.22 Δημιουργία Grafana Contact Point	151
Εικόνα 5.23 Ρύθμιση Grafana Telegram Contact Point	152
Εικόνα 5.24 Επαλήθευση Grafana Contact point	152

Εικόνα 5.25 Μήνυμα Επαλήθευσης Telegram.....	152
Εικόνα 5.26 Δημιουργία Κανόνα Ειδοποίησης στο Grafana.....	153
Εικόνα 5.27 Εισαγωγή Query για την Δημιουργία Ειδοποίησης στο Grafana.....	153
Εικόνα 5.28 Ρύθμιση Κανόνα Ειδοποίησης στο Grafana.....	154
Εικόνα 5.29 Grafana Dashboard Ειδοποιήσεων	154
Εικόνα 5.30 Διαδρομή Ειδοποίησης στο Grafana.....	154
Εικόνα 5.31 Δημιουργία Bot από την Εφαρμογή Bot Father.....	155
Εικόνα 5.32 Εκκίνηση Bot.....	155
Εικόνα 5.33 Ταυτότητα Bot.....	156
Εικόνα 5.34 Μήνυμα Ειδοποίησης	156
Εικόνα 5.35 Μήνυμα Λήξης Ειδοποίησης.....	156
Εικόνα 5.36 Ημερήσια Μέση Καταναλισκόμενη Ενέργεια.....	157
Εικόνα 5.37 Κόστος Ημερήσιας Καταναλισκόμενης Ενέργειας.....	157
Εικόνα 5.38 Ειδοποίηση Υπέρβασης Κόστους Ενέργειας	158

Αλφαβητικό Ευρετήριο

AC: Alternating Current
Ah: Ampere-hours
ARV: Array Reconnect Voltage
BLE: Bluetooth Low Energy
BMS: Battery Management System
CA: Certificate Authority
CapEx: Capital Expenditures
CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization
CIGS: Copper indium gallium selenide
DC: Direct Current
DCMLI: Diode Clamp Multilevel Inverter
DNS: Domain Name System
DoD: Depth of Discharge
EaaS: Everything as a Service
ECV: End Cell Voltage
FBI: Full Bridge Inverter
GAP: Generic Access Profile
GATT: Generic Attribute Profile
HBI: Half Bridge Inverter
HFT: High Frequency Transformer
IaaS: Infrastructure as a Service
IEC: International Electrotechnical Commission
InCod: Incremental Conductance
JRC: European Commission's Joint Research Centre
L2CAP: Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol
LC: Inductor Capacitor Circuit
LFP: LiFePO₄ Λιθίου Φωσφορικού Σιδήρου
LMO: Lithium Manganese Oxide
LRV: Low Reconnect Voltage
LSM: Log-structured merge
LTS: Long Term Support
LVD: Low Voltage Disconnect
MAC: Message Authentication Codes
MPP: Maximum Power Point
MPPT: Maximum Power Point Tracking
MQTT: Message Queuing Telemetry Transport
MSPC: Multi-Stage Power Converters
mTLS: mutual Transport Layer Security
MTU: Maximum Transmission Unit
NCA: Lithium Nickel cobalt Aluminum oxide
NMC: Lithium nikel Manganese Cobalt oxide
NOCT: Nominal Operating Cell Temperature

OpEx: Operational Expenditures
P&O: Perturbation Observation
PaaS: Platform as a Service
PWM: Pulse Width Modulation
QoS: Quality of Service
RAM: Random Access Memory
ROI: Return On Investment
SaaS: Software as a Service
SIG: Bluetooth Special Interest Group
SMP: Security Manager Protocol
SoC: State of Charge
SQL: Structured Query Language
SSPC: Single Stage Power Converters
STC: Standard Test Conditions
TDMA: Time Division Multiple Access
TICK: Telegraf InfluxDB Chronograf Kapacitor
TLS: Transport Layer Security
TSDB: Time Series Database
TSM: Time-Structured Merge Tree
TSPC: Two-Stage Power Conversion
UI: User Interface
VM: Virtual Machine
VR: Voltage Regulator
Wh: Watt-hours
Wi-Fi: Wireless Fidelity
Wp: Watt-peak
YAML: Yaml Ain't Markup Language
ΔΕ: Διπλωματική Εργασία
ΚΕΗΕ: Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων
ΡΑΑΕΥ: Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη αυξάνονται ολοένα και περισσότερο λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού και της εντατικής χρήσης της τεχνολογίας για την εξυπηρέτηση των καθημερινών αναγκών τους. Τα αποτελέσματα αυτού είναι η εξάντληση των πεπερασμένων φυσικών πόρων όπως είναι οι υδρογονάνθρακες, που αποτελούν σήμερα την κύρια πηγή ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό οδηγεί στην αύξηση των τιμών τους όπως και στην καταστροφή του περιβάλλοντος. Για να επιβραδυνθεί το φαινόμενο αυτό, καθώς και των βλαβερών συνεπειών του, όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη, η κλιματική αλλαγή και η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες μελέτες, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ίσως την κορυφαία βιώσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [1]. Το πλεονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών είναι ότι βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και παρέχουν δωρεάν την ενέργεια τους σε αυτούς που μπορούν να την αξιοποιήσουν. Ειδικότερα ο Ήλιος από την ακτινοβολία του παράγει ενέργεια η οποία μπορεί με τα φωτοβολταϊκά πάνελ που έχουν αναπτυχθεί από την σύγχρονη βιομηχανία να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια ώστε να τροφοδοτηθεί μια μικρή οικία ή ακόμα και ένα μικρό εργοστάσιο. Για αυτό όλο και περισσότεροι άνθρωποι στον πλανήτη προσπαθούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά συστήματα ώστε να παράξουν φτηνή ηλεκτρική ενέργεια από τον Ήλιο, να μην επιβαρύνουν το περιβάλλον γύρω τους και να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο το ενεργειακό αποτύπωμά τους. Επειδή σήμερα, η μέγιστη απόδοση των συστημάτων είναι περίπου 20%, απαιτείται η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειάς τους [2]. Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιούνται έξυπνα συστήματα παρακολούθησης της καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας για τον έλεγχο της κατανάλωσης και της παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, μέσω του έξυπνου συστήματος ο χρήστης έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί και να διαχειρίζεται εξ αποστάσεως την ενέργεια του συστήματος. Με αφορμή την στροφή του κόσμου στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, σκοπός αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η υλοποίηση ενός πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο θα εξυπηρετεί όλες τις καταναλώσεις μίας οικίας για τουλάχιστον μια μέρα, επιτηρούμενες από ένα έξυπνο σύστημα, με σκοπό την αυτονομισή της από το σταθερό δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την δημιουργία μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής οικίας, καθώς και την δημιουργία ενός ευφυούς συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας. Το ευφύες σύστημα έχει την δυνατότητα να ενημερώνει τους διαχειριστές για την ομαλή ή όχι λειτουργία του. Έπειτα πραγματοποιείται η τεχνοοικονομική μελέτη της αυτόνομης φωτοβολταϊκής οικίας και αναλύονται η τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ευφυούς συστήματος εποπτείας και διαχείρισης. Με την δημιουργία του παραπάνω συστήματος βελτιστοποιείται η διαχείριση της καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας. Τέλος, η δημιουργία απεικονίσεων, ειδοποιήσεων και της απομακρυσμένης παρακολούθησης επιτυγχάνεται με την χρήση εργαλείων και τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔτΠ) και της Υπολογιστικής Νέφους (Cloud Computing).

Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός αυτής της ΔΕ είναι η πραγματοποίηση διαστασιολόγησης αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και σε μεθόδους βελτίωσης της χρήσης της παραγόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας. Για να επιτευχθεί ο στόχος της έξυπνης διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητη η επιτήρηση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας με την χρήση έξυπνων μετρητών ενέργειας. Η συλλογή των δεδομένων της παραγόμενης, της αποθηκευμένης και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε βάσεις δεδομένων χρονοσειρών. Παράλληλα, πραγματοποιείται κατάλληλη επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, υλοποιούνται γραφήματα που απεικονίζουν σε πραγματικό χρόνο και ειδοποιούν τον χρήστη για την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια της οικίας του. Όλα αυτά πραγματοποιούνται με την χρήση εργαλείων και τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων και της Υπολογιστικής Νέφους.

Μεθοδολογία

Σε αυτή την Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά, ορίζεται η έννοια του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και το κανονιστικό πλαίσιο από το οποίο διέπεται. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται βιβλιογραφική έρευνα στα επιμέρους τμήματα που το αποτελούν, τα οποία είναι: (α) τα φωτοβολταϊκά πάνελ, (β) ο ελεγκτής φόρτισης, (γ) οι μπαταρίες, (δ) ο αντιστροφέας και καθώς και ο τρόπος της συνέργειάς τους. Μετά πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μέγιστης καταναλισκόμενης ενέργειας της οικίας, ώστε να διαστασιοποιηθεί ένα μονοφασικό αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με αυτονομία τουλάχιστον μιας ημέρας με ελάχιστη ηλιοφάνεια. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψιν την τοποθεσία της οικίας, τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών και τις μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας [3], πραγματοποιείται η διαστασιοποίηση των μερών για την κατασκευή. Στην συνέχεια γίνεται η επαλήθευση των υπολογισμών αυτών με την χρήση του προγράμματος PVGIS. Επιπλέον, πραγματοποιείται η μελέτη με την οποία διασφαλίζεται η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος.

Για την επιτήρηση και εποπτεία της καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιούνται έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται η βιβλιογραφική έρευνα στην τεχνολογία της Υπολογιστική Νέφους καθώς και στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της εικονικής μηχανής και των containers. Έπειτα, αναλύονται οι τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των μετρήσεων και οι τεχνολογίες επικοινωνιών και παροχής ασφάλειας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

Ακόμη, πραγματοποιείται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που υλοποιείται σε αυτή την ΔΕ. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται όλες οι εφαρμογές που αποτελούν το ευφές σύστημα εποπτείας και διαχείρισης. Έπειτα, αναλύονται τα τμήματα του συστήματος αυτού τα οποία είναι: (α) το εικονικό μηχάνημα, (β) η λειτουργία των έξυπνων μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας, (γ) ο Proxy Server και η δημιουργία DNS για τις εφαρμογές, (δ) το πρόγραμμα γέφυρας δεδομένων Node-RED, (ε) η InfluxDB στην οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα χρονοσειρών που στέλνονται από τους έξυπνους μετρητές και τέλος (ζ) το πρόγραμμα απεικονίσεων και ειδοποιήσεων Grafana.

Έπειτα, καταγράφεται η λειτουργία του συστήματος αυτού. Περιγράφονται οι ροές που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα γέφυρα και οι απεικονίσεις που δημιουργήθηκαν στο Grafana για την εποπτεία του ευφυούς συστήματος. Δημιουργούνται ειδοποιήσεις ώστε ο χρήστης να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο για την καταναλισκόμενη και παραγόμενη ενέργεια του συστήματος. Για την αποστολή των ειδοποιήσεων δημιουργείται ένα Telegram bot το οποίο στέλνει σε πραγματικό χρόνο σε ένα κανάλι επικοινωνίας τις ειδοποιήσεις που έχουν δημιουργηθεί.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την εφαρμογή μέσω των απεικονίσεων των αποθηκευμένων δεδομένων και των αντίστοιχων ειδοποιήσεων, συζητούνται οι δυσκολίες κατά την υλοποίηση του συστήματος και αναφέρονται πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Καινοτομία

Τα στοιχεία τα οποία καθιστούν πρωτότυπη αυτή την Διπλωματική Εργασία είναι:

- Η δημιουργία ενός καινοτόμου ενσωματωμένου συστήματος εποπτείας και παρακολούθησης της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας μιας οικίας, το οποίο έχει την δυνατότητα προσαρμογής σε οποιοδήποτε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων και της Νεφοϋπολογιστικής.
- Δημιουργία και αποστολή ειδοποιήσεων που αφορούν την παραγόμενη, την καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος καθώς και την κατάσταση των μπαταριών του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με την χρήση έξυπνων ενεργειακών μετρητών οι οποίοι συνδέονται σε οικιακούς βοηθούς που ενεργοποιούνται με την φωνή, είτε με την χρήση των ειδοποιήσεων .
- Ο σχεδιασμός του συστήματος πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την επεκτασιμότητα και την αντοχή του στο χρόνο για την εφαρμογή νέων αναδυόμενων τεχνολογιών όπως η χρήση ψηφιακών βοηθών και της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelingence - AI)

Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται τα μέρη που αποτελείται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, το κανονιστικό πλαίσιο που το διέπει στην Ελλάδα καθώς και ο τρόπος συνδεσμολογίας του συστήματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός, η οικονομοτεχνική μελέτη και η επαλήθευση των υπολογισμών με την χρήση του προγράμματος PVGIS του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Στο τρίτο κεφαλαίο περιγράφονται οι βασικές τεχνολογίες της Νεφοϋπολογιστικής και του Διαδικτύου των Πραγμάτων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του συστήματος εποπτείας και διαχείρισης του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπρόσθετα, περιγράφονται η βάση δεδομένων InfluxDB και οι επιμέρους τεχνολογίες επικοινωνιών και ασφάλειας του συστήματος όπως είναι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας MQTT, BLE και SSH. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία του ευφυούς συστήματος εποπτείας και διαχείρισης. Αρχικά δημιουργείται η εικονική μηχανή στην οποία υλοποιούνται: ο MQTT Broker (Mosquitto), η βάση δεδομένων (InfluxDB), το πρόγραμμα οπτικοποιήσεων και ειδοποιήσεων (Grafana), η γέφυρα δεδομένων (Node-RED), η δημιουργία δυναμικού ονόματος DNS (DuckDNS) και ο διακομιστής μεσολάβησης (Nginx Proxy Manager). Επίσης, περιγράφεται η λειτουργία των έξυπνων μετρητών και το φαινόμενο Hall. Στο πέμπτο κεφάλαιο δημιουργούνται οι απεικονίσεις, οι ειδοποιήσεις στο πρόγραμμα Grafana καθώς και η αποστολή τους με την χρήση του προγράμματος

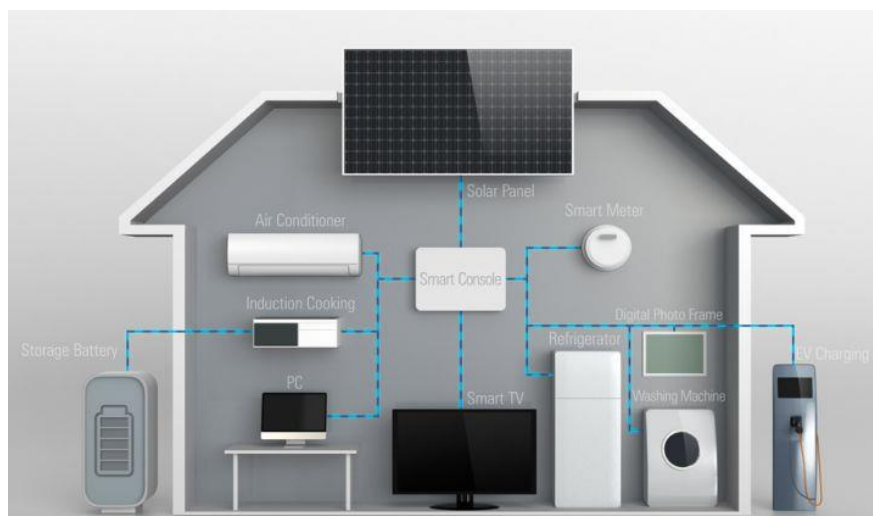
Telegram. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την χρήση των εφαρμογών, οι οπτικοποιήσεις που δημιουργούνται στο πρόγραμμα Grafana και η αποστολή των ειδοποιήσεων με την χρήση του Telegram. Επιπλέον, αναφέρονται τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την υλοποίηση των εφαρμογών καθώς και οι μελλοντικές προσθήκες οι οποίες ενδέχεται να βελτιώσουν τους αυτοματισμούς και την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Αυτόνομα Οικιακά Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και το ρυθμιστικό πλαίσιο στο οποίο υπάγεται. Επιπλέον αναλύονται τα μέρη τα οποία αποτελούν ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα: τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ελεγκτές φόρτισης, οι μπαταρίες και οι αντιστροφείς. Τέλος, περιγράφεται η συνδεσμολογία των μερών του συστήματος καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από το κεφάλαιο αυτό.

1.1 Αυτόνομα Οικιακά Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια νέα προσέγγιση στην βιώσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας. Εκμεταλλεύονται την ενέργεια των ακτίνων του Ήλιου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται με την χρήση ενός συστήματος μπαταριών και χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση της οικίας χωρίς να απαιτείται η διασύνδεση σε οποιοδήποτε άλλο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η ύπαρξη μπαταριών στο σύστημα το καθιστά μια εξαιρετική επιλογή για την πλήρη αυτονομία της οικίας ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα και τα μέρη που το αποτελούν.



Εικόνα 1.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Η χρήση αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον χρήστη. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι:

- i) Ανεξαρτησία από το Δίκτυο
- ii) Οικονομικά οφέλη
- iii) Περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Το δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης δεν προσφέρει προστασία στις οικίες από διακοπές ρεύματος ούτε αυτονομία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως προσφέρει ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Στο οικονομικό σκέλος, ο χρήστης παρά την μεγάλη αρχική επένδυση που απαιτείται για την κατασκευή και την μελέτη του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, η απόσβεσή της

πραγματοποιείται σχετικά γρήγορα λαμβάνοντας υπόψιν τις τωρινές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζεται στο επόμενο κεφάλαιο η απόδοση της επένδυσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπρόσθετα, τα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρονται από την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά σημαντικά διότι χρησιμοποιείται μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, συμβάλλουν στην διατήρηση και την βιωσιμότητα του περιβάλλοντος επειδή χρησιμοποιείται μια μορφή ενέργειας η οποία υπάρχει σε τεράστια αφθονία. Η σχεδίαση ενός συστήματος που παρέχει αυτόνομη παραγωγή και στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προαπαιτεί την αναλυτική καταγραφή και προσαρμογή των ενεργειακών συνηθειών των καταναλωτών. Με την γνώση των ενεργειακών συνηθειών του χρήστη του συστήματος βελτιστοποιούνται η απόδοση, η αποτελεσματικότητα και η οικονομική απόδοση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο χρήστης πρέπει να κατανοήσει το ενεργειακό του προφίλ για την ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας. Για αυτό χρειάζεται να προσαρμόσει την κατανάλωσή του με βάση τη διαθεσιμότητα ενέργειας του συστήματος του, για την επίτευξη του συγχρονισμού της παραγόμενης με την καταναλισκόμενη ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ταυτοχρονισμός και περιλαμβάνει την κατανάλωση της πλεονάζουσας ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής της παραγωγής, όπως για παράδειγμα τις μεσημεριανές ώρες, και την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής παραγωγής. Τέλος, κάθε χρήστης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να είναι ενήμερος και να κατανοήσει την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος ώστε η παραγόμενη ενέργεια να χρησιμοποιείται με την βέλτιστη αποτελεσματικότητα.

1.2 Κανονιστικό Πλαίσιο Σήμερα στην Ελλάδα

Μετά από έρευνα στους νόμους που έχουν συνταχθεί για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν υπάρχει μέχρι στιγμής η ειδική νομοθετική πρόβλεψη που απαιτείται για την σχεδίαση και ανάπτυξη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Παρόλο την μη ύπαρξη της ειδικής νομοθετικής ρύθμισης για την κατασκευή και την σχεδίαση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος ακολουθούνται οι κανόνες που αναγράφονται στην Υπουργική απόφαση του Υπουργείου Ενέργειας και περιβάλλοντος: ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/18393/686 στην οποία αναφέρεται ότι:

- Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ του φωτοβολταϊκού σταθμού δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 10.8kW
- Για τις τριφασικές παροχές ορίζεται ανώτερο όριο παραγόμενης ισχύος τα 10kW και για τις μονοφασικές παροχές τα 5 kW

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι υφιστάμενες εγκαταστάσεις που μετατρέπονται σε αυτόνομες οφείλουν να δηλωθούν στον τρέχοντα πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας από τον ιδιοκτήτη. Επιπλέον, ο τελευταίος οφείλει να ενημερώσει την Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ) καταθέτοντας Υπεύθυνη Δήλωση Εγκαταστάτη (ΥΔΕ) η οποία απαιτείται από την Υπουργική Απόφαση με αριθμό Φ.50/503/168/19.4.2011 όπου αναφέρεται ο τρόπος ρευματοδότησης της εγκατάστασης. Πιο αναλυτικά, τα έντυπα που κατατίθενται στην ΡΑΑΕΥ είναι τα παρακάτω:

- Μονογραμμικά σχέδια της εγκατάστασης κατά CENELEC
- Μονογραμμικά σχέδια Ηλεκτρικών Πινάκων κατά CENELEC
- Έκθεση παράδοσης Ηλεκτρικής Εγκατάστασης
- Πρωτόκολλο ελέγχου κατά ΕΛΟΤ HD 384 ή κατά ΚΕΗΕ

Επιπρόσθετα, ο χρήστης του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ενημερώσει τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας ότι η παροχή του δεν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο του για την αποφυγή της νησιδοποίησης. Ως νησιδοποίηση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ενώ οι τεχνικοί έχουν απομονώσει ένα τμήμα για διενέργεια επισκευών, το φωτοβολταϊκό λειτουργεί ως νησίδα παρέχοντας ισχύ και καθιστώντας επικίνδυνη την εργασία. Συνεπώς, δεν πρέπει να υπάρχει συνύπαρξη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο χωρίς την γνώση από το πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή. Επιλογικά, ο εγκαταστάτης του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να τηρήσει τους κανόνες ασφαλείας που διέπουν την ελληνική αλλά και ευρωπαϊκή νομοθεσία κατά την διάρκεια της εγκατάστασης καθώς και να ακολουθήσει το νομοθετικό πλαίσιο για την εγκατάσταση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων που υπάρχει στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.3 Τα μέρη ενός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

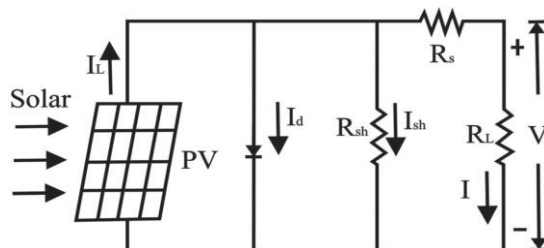
Όπως αναφέρεται και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελεί ένα εξελιγμένο τεχνολογικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα από το κεντρικό δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτή την υποενότητα αναλύονται τα μέρη που συνθέτουν ένα τέτοιο σύστημα και παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1 τα οποία είναι:

- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- Οι ελεγκτές φόρτισης
- Το σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας
- Οι αντιστροφείς

Τα παραπάνω μέρη συνδεσμολογούνται όπως φαίνεται στην παράγραφο 1.4 της ΔΕ. Στις υποενότητες που ακολουθούν πραγματοποιείται αναλυτική μελέτη του κάθε μέρους του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

1.3.1 Φωτοβολταϊκά Πάνελ

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πάνελ ανακαλύφθηκε από τον Alexandre-Edmond Becquerel το 1839. Έπειτα το 1946, ο Russel Ohl ανακάλυψε την τεχνολογία των ηλιακών κυψελών που είναι κατασκευασμένα με χρήση ημιαγωγών όπως το Πυρίτιο (Si). Σε αυτό το πρότυπο είναι βασισμένα και τα σύγχρονα ηλιακά πάνελ με την δομή των ηλιακών κυψελών. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούνται για να την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς έντασης DC. Οι ηλιακές κυψέλες κατασκευάζονται από στρώσεις ημιαγωγικών υλικών, όπου η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο στα διάφορα στρώματα των ημιαγωγών που απαρτίζουν την κυψέλη. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται στις κυψέλες εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται την συγκεκριμένη χρονική στιγμή [3]. Η ισχύ που προσφέρει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ο Ήλιος, η τοποθεσία εγκατάστασης και ο προσανατολισμός του. Για την δίκαιη σύγκριση δύο φωτοβολταϊκών πάνελ, εισάγεται μια νέα μονάδα μέτρησης τα Watt-peak (Wp) που αποτελεί την μέγιστη ισχύ την οποία παράγεται από αυτά με την επικράτηση ιδανικών συνθηκών. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται με δυο διαφορετικές τοπολογίες σε σειρά και παράλληλα. Η σύνθεση τους σε σειρά αυξάνει την τάση και διατηρεί σταθερό το ρεύμα κάνοντας την πιο δημοφιλής επειδή με την αύξηση του ρεύματος αυξάνεται η διατομή του καλωδίου που χρειάζεται για την σύνθεση μεταξύ τους άλλα και ο φορτιστής των μπαταριών το οποίο συνεπάγεται αύξηση κόστους. Για την κατασκευή των ηλιακών κύψελων των ηλιακών πάνελ χρησιμοποιείται ο οποίο συνηθισμένος ημιαγωγός το πυρίτιο. Εισάγοντας, ατέλειες στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου η αγωγιμότητα του αλλάζει κάνοντας το εύχρηστο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές έχοντας τέσσερα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να συνδεθούν εύκολα με άλλα στοιχεία. Ένας n-type δωρητής με 5 ελεύθερα ηλεκτρόνια εμπλουτίζει τη μία πλευρά της κυψέλης, δημιουργώντας δεσμούς με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πυριτίου, προκαλώντας αρνητικά φορτία. Στην άλλη πλευρά, ένα στοιχείο με τρία ελεύθερα ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε p-type δωρητή, ενισχύοντας την έλξη προς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πυριτίου προς αυτό. Η εξουδετέρωση των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται για την δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ p-type και n-type, η οποία ονομάζεται σύνδεση p-n. Κατά τη διάρκεια αυτής της σύνδεσης, οι οπές και τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο που ενθαρρύνει τη ροή του ρεύματος προς κάθε κατεύθυνση. Οι n-type και p-type επαφές των ηλιακών κυψελών είναι συνδεδεμένες στο εξωτερικό κύκλωμα μέσω ενός μεταλλικού ημιαγωγού. Κατά την επίδραση φωτονίων στην κυψέλη, η ενέργεια μεταφέρεται στα φέροντα φορτία της. Οι οπές και τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο της κυψέλης. Το ρεύμα εξάγεται με την δημιουργία ενός κλειστού κυκλώματος με την χρήση ενός εξωτερικού φορτίου. Οι κυψέλες αναπαρίσταται με το μοντέλο της διόδου όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 [4].



Εικόνα 1.2 Μοντέλο Ηλιακής Κυψέλης

Σύμφωνα με την Εικόνα 1.2 υπάρχει ένα ρεύμα I_L , μια δίοδο, μια αντίσταση R_s συνδεδεμένη σε σειρά που αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση της κυψέλης και μία εσωτερική αντίσταση μέτρησης ρεύματος. Η διαφορά μεταξύ του φωτορεύματος I_L και του ρεύματος της διόδου ισούται με την ροή ρεύματος που δίνεται από την εξίσωση 1.3.1 :

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{q(V+I R_s)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_{SH}} \quad (1.3.1)$$

Όπου το I_d είναι ρεύμα σύνδεσης p-n δίνεται από την εξίσωση 1.3.2 :

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{q(V+I R_s)}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (1.3.2)$$

Όπου I το ρεύμα φορτίου I_L η ροή ρεύματος του φωτοβολταϊκού, I_o είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού, Q το ηλεκτρικό φορτίο, K σταθερά Boltzmann, T απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος, A ο παράγοντας ποιότητας της διόδου, R_s η αντίσταση σε σειρά και R_{sh} η παράλληλη αντίσταση [4]. Η αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίζεται με την χάραξη των γραφικών παραστάσεων I-V και P-V. Μέσα από αυτές τις γραφικές παραστάσεις εξάγεται το σημείο της μέγιστης ισχύος ή Maximum Power Point (MPP). Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται: Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} και την τάση ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} . Η τάση ανοιχτοκυκλώματος δίνεται από την εξίσωση 1.3.3:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} + 1\right) \approx \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o}\right) \quad (1.3.3)$$

Οι καμπύλες σχεδιάζονται με την προϋπόθεση ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Το μέγιστο ηλεκτρικό ρεύμα I_{mpp} που λαμβάνει η ηλιακή κυψέλη είναι όταν είναι βραχυκλωμένη δηλαδή το κύκλωμα είναι κλειστό και η μέγιστη τάση V_{mpp} όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό δηλαδή υπάρχει ανοιχτοκύκλωμα. Τέλος, υπάρχει ένα μοναδικό ζευγάρι τιμών I_{mpp} και V_{mpp} το οποίο προκύπτει από τις σχέσεις 1.3.5 και 1.3.6 και μας δίνει την μέγιστη δυνατή ισχύ του πάνελ η οποία είναι:

$$P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad (1.3.4)$$

Όπου το μέγιστο ρεύμα και η μέγιστη τάση προσεγγίζονται η τιμές τους με την χρήση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και την τάση ανοιχτοκυκλώματος αντίστοιχα:

$$I_{mpp} \cong (0,85 - 0,95)I_{sc} \quad (1.3.5)$$

$$V_{mpp} \cong (0,8 - 0,9)V_{oc} \quad (1.3.6)$$

Υπάρχουν διαφορετικά είδη κύψελών αλλά η πλειοψηφία αυτών κατασκευάζονται με την τεχνική δισκίων πυριτίου (wafer-based) με το πάχος τους να κυμαίνεται από 180 έως 200 μm . Απαιτούνται διάφοροι τύποι πυριτίου για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πάνελ όπως Μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφο, Τελλουριούχο Κάδμιο (Cd-Te), Χαλκού Ίνδιου Γαλλίου Σεληνίου (CIGS) και Χαλκού Ίνδιου Γαλλίου Σουλφιδίου (CIGS2). Έτσι με βάση το υλικό κατασκευής και την εμπορική ωρίμανση, οι τεχνολογίες κατασκευής χωρίζονται σε τρεις γενιές: Την πρώτη γενιά, η οποία αναπτύχθηκε με δισκία πυριτίου και στην οποία ανήκουν τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά. Στην δεύτερη γενιά η οποία ονομάζεται λεπτού φιλμ στην οποία ανήκουν τα: Άμορφα, Cd-Te και CIGS. Τέλος, στην τρίτη γενιά η οποία είναι η αναπτυσσόμενες τεχνολογίες και ανήκουν τα: Νανοκρυσταλλικά, πολυμερή, ευαισθητοποιημένα με χρωστική ουσία, συγκεντρωμένα και με περοβοσκίτη. Η πρώτη γενιά ηλιακών κυψελών κατασκευάστηκε από ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Απόστολος Κλής

δισκία πυριτίου τα οποία έχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, είναι η δημοφιλέστερη τεχνολογία και είναι πιο παλαιά από τις υπόλοιπες. Η γενιά αυτή χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες: Τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά.

Οι μονοκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες παράγονται με την μέθοδο Czochralski. Κατά την διάρκεια αυτής της τεχνικής η κρύσταλλοι του πυριτίου κόβονται σε μεγάλα καλούπια. Για αυτό το λόγο χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια ώστε να κατασκευαστούν μεγάλοι μονοί κρύσταλλοι κάνοντας έτσι την διαδικασία της ανακρυσταλλοποίησης ακριβή. Η απόδοση αυτού του τύπου κυψελών κυμαίνεται από 14% έως 18% αλλά αυτή την στιγμή υπάρχει εταιρία που έχει φτάσει σε 20.4% αποτελεσματικότητα.

Στις πολυκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες όπως φανερώνεται από την ονομασία τους υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικά κρύσταλλα τα οποία συνδυάζονται μαζί ώστε να δημιουργήσουν ένα πολυκρύσταλλο πυριτίου. Η διαδικασία παραγωγής αυτού του κρυστάλλου πραγματοποιείται με την χρήση ενός ψυχρού καλουπιού γραφίτη κάνοντας την πιο οικονομική από την μονοκρυσταλλική. Παρόλο, το μικρό κόστος κατασκευής έχουν μικρότερη απόδοση από τα ακριβότερα μονοκρυσταλλικά η οποία κυμαίνεται στο 12% με 14%. Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 1.3, επηρεάζεται σημαντικά η απόδοση τους από την θερμοκρασία [4].

Temperature (°C)	Efficiency (%)
81	14
83	19
85	27
87	21
89	15

Εικόνα 1.3 Απόδοση Πολυκρυσταλλικής Κυψέλης σε Συνάρτηση με την Θερμοκρασία

Η δεύτερη γενιά βασίζεται στην κατασκευή ηλιακών κυψελών λεπτού φιλμ και χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες: Τα άμορφα, τα Cd-Te και CIGS. Οι κυψέλες αυτές είναι πιο οικονομικές από αυτές της πρώτης γενιάς, το στρώμα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας έχει πάχος 1μm ενώ στην πρώτη γενιά πάχος 350μm. Επίσης, το ενεργειακό χάσμα είναι 1.45eV φτάνοντας έτσι την απόδοση τους να είναι πάνω από 19%.

Οι άμορφες κυψέλες κατασκευάζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες με την χρήση υλικών χαμηλού κόστους όπως τα πολυμερή μαζί με την χρήση άλλων ευλύγιστων υποστρωμάτων. Κατά την διάρκεια της κατασκευής το πίσω μέρος του υποστρώματος επικαλύπτεται με εμπλουτισμένο πυρίτιο. Έτσι αυτές οι κυψέλες έχουν σκούρο καφέ χρώμα στην πλευρά ανάκλασης και ασημένιο στην πλευρά αγωγιμότητας. Η απόδοση τους δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται από 5.9% έως και 9.9%.

Οι κυψέλες τελλουριούχου καδμίου είναι οι πιο οικονομικές σε αυτή την κατηγορία. Η σύνδεση p-n σχηματίζεται στα στρώματα του καδμίου. Η διαδικασία παραγωγής είναι η παρακάτω: Πρώτα, οι ηλιακές κυψέλες Cd-Te συντίθενται από πολυκρυσταλλικά υλικά πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα. Έπειτα, πραγματοποιείται η απόθεση του Cd-Te στα πολλαπλά υποστρώματα που υπάρχουν. Η αποδοτικότητα αυτού του είδους κυμαίνεται στο 9% με 11% αλλά λόγω της τοξικότητας του καδμίου που μπορεί να συσσωρευτεί στο ανθρώπινο σώμα, στα ζώα και στα φυτά καθιστά την χρήση του απαγορευτική.

Οι CIGS κυψέλες περιέχουν 4 υλικά κατασκευής: Τον χαλκό, το ίνδιο, το γάλλιο και το σελήνιο. Κατασκευάζονται με τις παρακάτω τεχνικές: Της απόπτωσης, της εκτύπωσης, της εξάτμισης, της ηλεκτροχημικής επικάλυψης και ηλεκτρικής ακτίνας καθιστώντας την τεχνολογία αυτή την πιο

αποτελεσματική. Η απόδοση της κυμαίνεται από 10% έως 12% και επηρεάζεται αρνητικά από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η τρίτη γενιά είναι η πιο πρόσφατη από τις προαναφερθείσες και βρίσκεται ακόμα υπό έρευνα. Οι πιο αναπτυγμένες τεχνικές είναι: Τα νανοκρυσταλλικά, τα πολυμερή, τα συμπυκνωμένα, τα ευαισθητοποιημένα με χρωστική ουσία και περβοσκίτη.

Το μέγεθος των νανοκρυσταλλικών κυψελών μετρείται με την χρήση μιας νανοκρυσταλλικής σειράς. Ο σημαντικότερος παράγοντας που αποτελεί αυτή την νανοκυψέλη είναι ότι κατασκευάζεται από ημιαγωγό ο οποίος ανήκει στην ομάδα των μεταβατικών ημιαγωγών, το μέγεθος τους διαφέρει μερικά νανόμετρα και έχουν αρκετά γρήγορη περιστροφή λόγω της παρουσίας κεντρομόλων δυνάμεων.

Οι πολυμερείς κυψέλες αποτελούνται από διαδοχικά συνδεδεμένα λεπτά στρώματα επικαλυμμένα με μια λεπτή κορδέλα όπου περιτυλίγονται από διάφορα πολυμερή όπου αυτό τους προσδίδει μεγάλη ευλυσία. Έχουν μικρή αποδοτικότητα 3% την οποία την επιτυγχάνουν έχοντας βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

Οι ευαισθητοποιημένες επικαλυμμένες με χρωστική ουσία κυψέλες ανακαλύφθηκαν από Ελβετούς επιστήμονες οι οποίοι τοποθέτησαν βαμμένα μόρια μέσα στα ηλεκτρόδια. Αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία: Ημιαγωγικό ηλεκτρόδιο, ευαίσθητα βαμμένο μόριο, redox mediator και αντί-ηλεκτρόδιο. Η διαδικασία κατασκευή τους είναι απλή έτσι μειώνεται το κόστος τους και γίνονται ελκυστικά και έχουν απόδοση 10%.

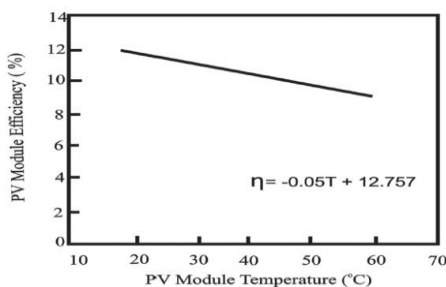
Οι συγκεντρωμένες ηλιακές κυψέλες είναι ένα νέο είδος τεχνολογίας. Η συλλογή ηλιακής ενέργειας γίνεται σε μια μικρή περιοχή ώστε ταυτόχρονα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ακτινών πραγματοποιείται και παραγωγή ενέργειας μέσω της θερμότητας που εκλύεται από την συγκέντρωσή τους. Επιτυγχάνεται με την χρήση τεράστιων καθρεπτών που συγκεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες σε ένα συγκεκριμένο μέρος.

Τέλος, ο περβοσκίτης είναι η πιο νέα αναπτυσσόμενη τεχνολογία στις ηλιακές κυψέλες και παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα από ότι η τεχνολογία λεπτού φιλμ και του συμβατικού πυριτίου. Οι περβοσκίτες είναι μια κατηγορία υλικών που ορίζονται από τον τύπο ABX_3 όπου το X υποδηλώνει ένα αλογόνο όπως τα: I^- , Br^- , Cl^- και τα A, B είναι θετικά φορτία με διαφορετικά μεγέθη το καθένα. Η μέγιστη απόδοση που μπορεί να έχει το πάνελ από περβοσκίτη φτάνει το 31%. Η σταθερότητα και η ανθεκτικότητα είναι θέματα που απασχολούν τις ηλιακές κυψέλες κατασκευασμένες από περβοσκίτη. Η απόδοση των υλικών μειώνεται με το χρόνο, καθώς υπάρχει αρνητική επίδραση της θερμοκρασίας [3]. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ όπως: η περιβάλλουσα θερμοκρασία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η ταχύτητα του ανέμου, η σκόνη, η τοποθεσία τοποθέτησης, η συννεφιά, και ο γεωγραφικός προσανατολισμός τους. Η αποδοτικότητα και η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζεται από την οποιαδήποτε αλλαγή στην θερμοκρασία. Είναι γνωστό ότι με την αύξησή της η αποδοτικότητα του πάνελ μειώνεται δραματικά. Αυτό συμβαίνει επειδή η υψηλότερη θερμοκρασία επηρεάζει το ενεργειακό χάσμα των κυψελών, αυξάνοντας το μειώνεται η τάση ανοιχτοκυκλώματος επειδή η θερμοκρασία είναι αντίστροφος ανάλογη της τάσης σύμφωνα με τον τύπο 1.3.3, το ρεύμα βραχυκυκλώματος κατά συνέπεια θα αυξηθεί. Όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία, διεγείρονται τα περισσότερα φορτία στην στιβάδα του ενεργειακού χάσματος και φεύγουν από αυτήν για να μεταβούν στην στοιβάδα ενεργειακής αγωγιμότητας. Έτσι, αλλάζει η ισχύς που παράγεται λόγω της ακτινοβολίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει περισσότερο τα μονοκρυσταλλικά πάνελ από ότι αυτά του λεπτού φιλμ με το ποσοστό να είναι 15% και 5%

αντίστοιχα. Στα φωτοβολταϊκά υπάρχουν δύο διεθνή πρωτόκολλα: Το Standard Test Conditions (STC) και το Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) τα οποία μετρούν την μέγιστη ισχύ, το μέγιστο ρεύμα, την μέγιστη τάση, την τάση ανοιχτοκυκλώματος, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και την αποδοτικότητα του πάνελ. Το STC πρωτόκολλο χρησιμοποιείται κυρίως για την ισχύ W_p του πάνελ σε συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες είναι: Θερμοκρασία κυψέλης: $25^{\circ}C$, ηλιακή ακτινοβολία $1000W/m^2$ και συντελεστής αέρας μάζας: A.M1.5. Το θετικό του πρωτοκόλλου είναι χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους της ισχύος των πάνελ καθώς και τον αριθμό τους. Τα αρνητικά του δεν χρησιμοποιείται για την σύγκριση δύο πάνελ διότι διαθέτουν διαφορετική ποιότητα, διαφορά στην απόδοση υπό σκιά και να έχουν διαφορετικούς θερμοκρασιακούς συντελεστές. Για την κάλυψη αυτού του κενού δημιουργήθηκε το πρότυπο NOCT στο οποίο οι τιμές βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματική λειτουργία της ηλιακής κυψέλης του πάνελ και αυτές οι συνθήκες είναι η παρακάτω: Θερμοκρασία κυψέλης: $20^{\circ}C$, ηλιακή ακτινοβολία $800W/m^2$, συντελεστής αέρας μάζας: A.M1.5 και ταχύτητα ανέμου: $1m/s$. Με αυτό το πρωτόκολλο συγκρίνονται δυο ηλιακά πάνελ όταν έχουν όμοιες STC τιμές και να αποφανθεί πιο από αυτά τα δύο αποδίδει καλύτερα. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της μονάδας T_m και της περιβάλλουσας θερμοκρασίας T_{amb} είναι ανεξάρτητη από την περιβαλλοντική θερμοκρασία και έχει γραμμική σχέση με την ακτινοβολία μέχρι την τιμή $400W/m^2$ με αυτό μπορεί να υπολογιστεί η NOCT του πάνελ. Ο μέσος ρυθμός μείωσης που προκαλεί η θερμοκρασία είναι υπολογισμένη στο $0.031W/m^2$. Ο τύπος υπολογισμού της θερμοκρασίας της μονάδας T_m δίνεται από την σχέση:

$$T_m = T_{amb} + (NOCT - 20) \frac{E}{200} \quad (1.3.7)$$

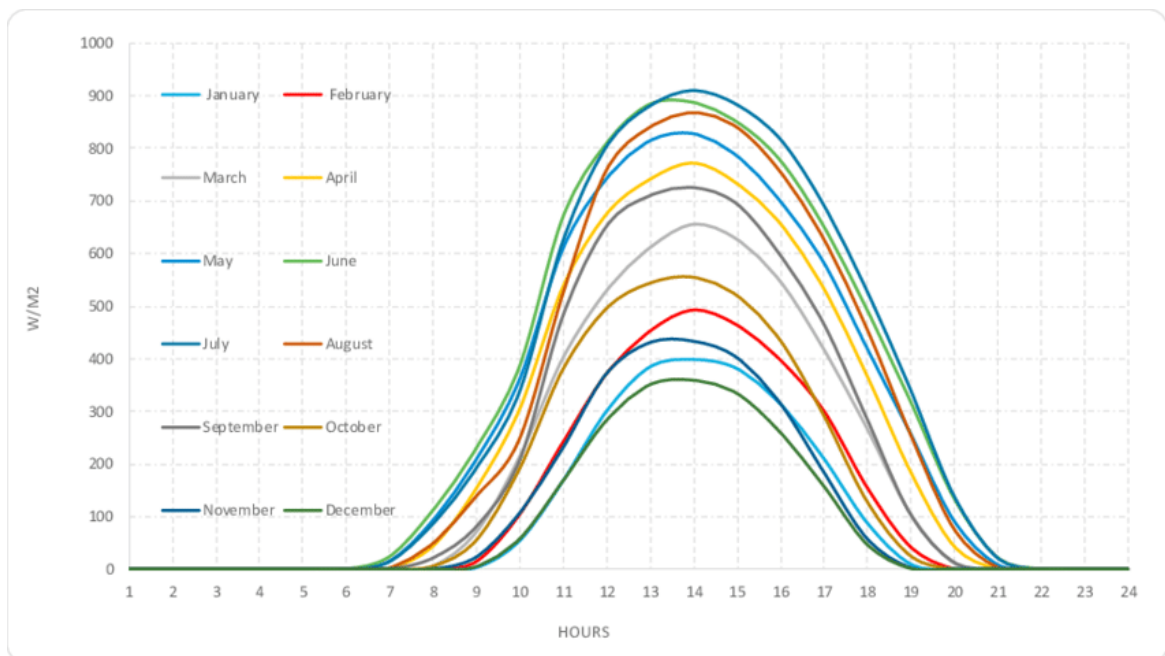
Όπου στην σχέση 1.3.7 το E είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι μειώνοντας την θερμοκρασία μειώνεται ο θερμικός ρυθμός αλλοίωσης των πάνελ. Η μείωση της επιτυγχάνεται απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια που υπάρχει στα πάνελ ή απλώς ψύχοντας τα. Οι Sighn και Ravindra εξέτασαν την εξάρτηση της απόδοσης των πάνελ σε σχέση με την θερμοκρασία θέτοντας ως εύρος θερμοκρασιών από το $0-70^{\circ}C$ και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος, μείωση της παραγόμενης ισχύς ενώ παράλληλα αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Στην Εικόνα 1.4 αποτυπώνεται την γραμμική σχέση μεταξύ της αύξησης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού και την μείωση της απόδοσης του [4].



Εικόνα 1.4 Σχέση μεταξύ Θερμοκρασίας Φωτοβολταϊκής Μονάδας με την Θερμοκρασία της

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του πάνελ είναι η σκόνη διότι συσσωρεύεται πάνω στο πάνελ μειώνοντας έτσι την επιφάνεια την οποία πέφτει η ηλιακή ακτινοβολία. Σε κάθε σύστημα που σχεδιάζεται λαμβάνεται υπ' όψη η σκόνη ή ακόμα και το χώμα που μπορεί να συσσωρευτεί στην επιφάνεια του λόγω της βροχής ή του αέρα. Η επιρροή της σκόνης σε συνδυασμό με το αέρα έχει μελετηθεί από τον Gossens και τον Kerchaever οι οποίοι κατέληξαν στο

συμπέρασμα ότι μειώνεται η αποδοτικότητα του πάνελ [4]. Ακόμη, οι Lu και Sun μελέτησαν κατά πόσο επηρεάζει την αποδοτικότητα η αερομεταφερόμενη σκόνη και κατέληξαν ότι μειώνει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως με γραμμικό τρόπο. Τέλος, έδειξαν όταν μειώνεται η πυκνότητα της σκόνης κατά 22 g/m^2 η αποδοτικότητα αυξάνεται κατά 20%. Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει την απόδοση του ηλιακού πάνελ επειδή αποτελεί την πηγή ενέργειας του συστήματος. Όπως γνωρίζουμε η ένταση των ηλιακών ακτινών δεν είναι ίδια όλη την διάρκεια της διάρκειας ενός έτους και η μέγιστη τιμή της υπάρχει μόνο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ως εκ τούτου, για να σχεδιαστεί σωστά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να είναι γνωστά η μέγιστη ώρα στην οποία εκπέμπεται η μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας του Ήλιου καθώς και η μεταβολή της ανάλογα με τον μήνα. Στην Εικόνα 1.5 καταγράφεται η ακτινοβολία του Ήλιου σε W/m^2 συνάρτηση με τις ώρες που επιτυγχάνεται για κάθε μήνα του χρόνου. Το εσωτερικό εμβαδόν των καμπυλών είναι η ενέργεια που θα παραχθεί από το φωτοβολταϊκό σύστημα και πως αυτή κατανέμεται μέσα στο εικοσιτετράωρο. Οι δώδεκα καμπύλες αντιστοιχούν στην μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για όλους τους μήνες του έτους στην Αθήνα. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί κοντά στην τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος [5].



Εικόνα 1.5 Διάγραμμα Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας ανά Μήνα στην Αθήνα

Τέλος, λαμβάνεται υπόψιν κατά την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών η τοποθεσία για την ύπαρξη εμπόδιων η κλίση των πάνελ για την απορρόφησή της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρώτο βήμα που πραγματοποιείται είναι ο προσανατολισμός των πάνελ προς τον νότο όσο είναι αυτό δυνατό, διότι από εκεί ανατέλλει ο Ήλιος στο βόρειο ημισφαίριο. Για κάθε εποχή υπάρχει μια διαφορετική βέλτιστη γωνία η οποία απορροφά την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία και ορίζεται για κάθε εποχή από τις σχέσεις.

$$90^\circ - \text{γεωγραφικό πλάτος} \quad (1.3.8)$$

$$90^\circ - \text{γεωγραφικό πλάτος} + 15^\circ \quad (1.3.9)$$

$$90^\circ - \text{γεωγραφικό πλάτος} - 15^\circ \quad (1.3.10)$$

Όπου η σχέση 1.3.8 είναι ο υπολογισμός της βέλτιστης κλίσης για όλες τις εποχές, η σχέση 1.3.9 είναι η βέλτιστη κλίση για το καλοκαίρι και η σχέση 1.3.10 είναι η βέλτιστη κλίση για τον χειμώνα.

1.3.2 Ελεγκτές Φόρτισης

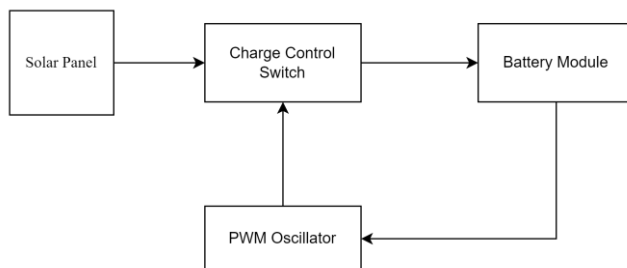
Σκοπός αυτών των συστημάτων είναι ο έλεγχος της ισχύος που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά και κατευθύνεται προς τις μπαταρίες του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, δηλαδή να μην υπερφορτιστούν ή να μην εκφορτιστούν πέρα από το όριο που επιτρέπει ο κατασκευαστής τους. Η κύρια λειτουργία των ηλιακών ελεγκτών φόρτισης είναι ο έλεγχος της ροής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τις μπαταρίες διασφαλίζοντας την εύρυθμη λειτουργία τους και μακροζωία τους. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος εξαρτάται από τον τύπο των μπαταριών που χρησιμοποιούνται. Αυτό επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- Περιορισμός και έλεγχος της τάσης των φωτοβολταϊκών πάνελ για την αποφυγή υπερφόρτωσης των μπαταριών
- Ύπαρξη DC φορτίων τα οποία διαχειρίζονται χωρίς την χρήση κάποιου άλλου συστήματος όπως ο αντιστροφέας
- Ύπαρξη άλλων φορτίων τύπου AC

Οι σύγχρονοι ηλιακοί ελεγκτές φόρτισης χρησιμοποιούν κυρίως τις τεχνολογίες PWM (Pulse Width Modulation) και MPPT (Maximum Power Point Tracking) για να φορτίσουν αποτελεσματικά ένα σύστημα μπαταριών απλά ελέγχοντας την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος.

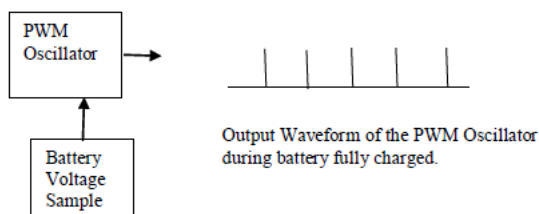
1.3.2.1 PWM (Pulse Width Modulation)

Ένα από τα πιο εφαρμοσμένα μοντέλα αποθήκευσης ενέργειας που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα προς τις μπαταρίες είναι η διαμόρφωση PWM. Σε αυτά η ενέργεια περνά από ένα διακοπτικό κύκλωμα προς την μπαταρία. Το κύκλωμα αυτό ελέγχεται από έναν ταλαντωτή όπου το μήκος του παλμού επηρεάζεται από την ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα μπαταριών. Στην Εικόνα 1.6 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα της συνδεσμολογίας ενός PWM ελεγκτή [6].

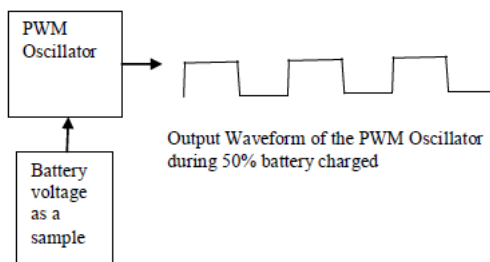


Εικόνα 1.6 Μπλοκ Διάγραμμα Συνδεσμολογίας PWM Ελεγκτή

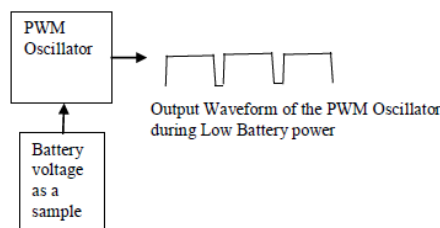
Η έξοδος του ταλαντωτή συνδέεται με ένα διακοπτικό κύκλωμα. Σε έναν ολόκληρο κύκλο παλμού το σύστημα μένει ανοιχτό και η ισχύς που παράγεται φορτίζει το σύστημα των μπαταριών. Καθώς το σύστημα μπαταριών οδεύει προς πλήρη φόρτιση το Duty Cycle μειώνεται μέχρι η μορφή του να μοιάζει με αυτή την ενός παλμού Dirac. Με την αποφόρτιση των μπαταριών αυξάνεται το Duty Cycle. Η περιγραφή των καταστάσεων του παλμού κατά την διάρκεια πλήρους φόρτισης, φόρτισης στο 50% της χωρητικότητας του συστήματος και κοντά στο σημείο εκφόρτισης απεικονίζονται στην Εικόνα 1.7, Εικόνα 1.8 και Εικόνα 1.9 αντίστοιχα [6].



Εικόνα 1.7 Παλμός Πλήρους Φόρτισης Μπαταριών



Εικόνα 1.8 Παλμός Φόρτισης στο 50% Χωρητικότητας των Μπαταριών



Εικόνα 1.9 Παλμός Φόρτισης κοντά στην Εκφόρτιση των Μπαταριών

Τέλος, ο κύριος στόχος του PWM είναι η τροφοδότηση του συστήματος ασκώντας παράλληλα μια συνεχή τάση στις μπαταρίες με σκοπό την φόρτιση τους. Στους σύγχρονους ελεγκτές η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή χαμηλής ισχύς όταν το σύστημα των μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένο. Έτσι, οι μπαταρίες φορτίζουν με λιγότερο ρεύμα και επεκτείνεται η διάρκεια ζωής τους. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο ελεγκτής αυτός είναι ο παρακάτω: Οι κυψέλες του φωτοβολταϊκού συστήματος παράγουν την τάση αυτή που απεικονίζεται σε ένα βολτόμετρο. Στην συνέχεια ο ελεγκτής καθορίζει τον ρυθμό φόρτισης των μπαταριών¹.

Τα πλεονεκτήματα που έχει η μέθοδος PWM είναι τα παρακάτω:

- Ικανότητα αναγνώρισης της χαμένης χωρητικότητας και αποθειοποίηση (sulfurization) των μπαταριών τύπου Lead Acid
- Βελτίωση του χρόνου φόρτισης του συστήματος μπαταριών
- Μεγιστοποίηση της μέσης χωρητικότητας του συστήματος μπαταριών
- Ισορροπία στις κυψέλες των μπαταριών
- Μείωση των αερίων και της θερμοκρασίας της μπαταρίας
- Εξισορρόπηση στην γήρανση της μπαταρίας
- Αυτοέλεγχος στην πτώση τάσης, της θερμοκρασίας και λειτουργία του ως διακόπτης
- Δοκιμασμένη τεχνολογία με αντοχή στον χρόνο
- Φτηνότερη σε σχέση με τους MPPT
- Μέγιστο μέγεθος ανοχής ρεύματος τα 60A
- Ανθεκτική και διαθέτουν παθητική ψύξη
- Έλεγχος υψηλών τιμών τάσεων και ρεύματος
- Ανθεκτικοί στον χρόνο

Όμως, αυτού του είδους οι ελεγκτές έχουν σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία είναι:

- Η τάση των φωτοβολταϊκών πάνελ πρέπει να είναι όμοια με την τάση των μπαταριών του συστήματος
- Δεν αντέχουν ένταση ηλεκτρικού ρεύματος άνω των 60A
- Η επεκτασιμότητα τους είναι περιορισμένη και
- Η χρήση τους δεν είναι αποδοτική σε συστήματα άνω των 60A

Αυτά τα μειονεκτήματα τους καθιστούν απαρχαιωμένους και πλέον αντί των αυτών γίνεται χρήση των MPPT εκλεκτών.

¹ "Technical information," Victron Energy. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com/support-and-downloads/technical-information>

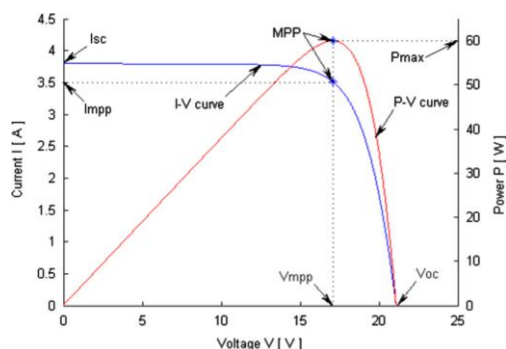
1.3.2.2 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Οι Snyman και Enslin πρότειναν μια καινούργια τεχνική για την βελτίωση της αποδοτικότητας στην μετατροπή ενέργειας στα φωτοβολταϊκά συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες. Αυτή η τεχνική ονομάζεται εντοπισμός και παρακολούθηση του μέγιστου σημείου ισχύος ή αλλιώς MPPT (Maximum Power Point Tracking). Στον MPPT συνδέονται τα φωτοβολταϊκά πάνελ και το σύστημα των μπαταριών και η δουλειά του είναι η ρύθμιση του ρεύματος φόρτισής τους [7]. Η μέγιστη ανοχή της τιμής της εντάσεως του ρεύματος είναι το λιγότερο ίση με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και η τάση το λιγότερο ίση με την τάση ανοιχτοκυκλώματος. Με αυτή την τεχνική διασφαλίζεται η χρήση πολλαπλών φωτοβολταϊκών πάνελ και η ελαχιστοποίηση των μπαταριών το οποίο σημαίνει μείωση στο κόστος αγοράς του συστήματος.

Ο ρόλος του MPPT ελεγκτή είναι να ρυθμίζει την ισχύ των φωτοβολταϊκών πάνελ με στόχο την λήψη της μέγιστης τιμής της οποιαδήποτε στιγμή. Το μέγιστο σημείο ισχύος είναι μοναδικό και αλλάζει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και το κλίμα. Είναι γνωστό ότι τα χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι μη γραμμικά και εξαρτώνται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ηλιακή ακτινοβολία μαζί με την ύπαρξη των διάφορων φορτίων κάνοντας έτσι περίπλοκη την εξαγωγή του MPP σημείου. Στην Εικόνα 1.10 απεικονίζεται η εύρεση Μέγιστου σημείου ισχύος φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί ουσιαστικά ως ένας μετατροπέας DC σε DC όπου λαμβάνει μια μεγάλη τάση από το φωτοβολταϊκό πάνελ υποβιβάζεται σε μια μικρότερη τάση. Αν η έξοδος είναι μικρότερη από την είσοδο τότε ρεύμα εξόδου είναι μεγαλύτερο επειδή η σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος στον τύπο της ισχύος πρέπει να είναι ανάλογες μεταξύ τους ώστε να διατηρηθεί σταθερό το γινόμενο της σχέσης 1.3.11 [8].

$$P = V * I \quad (1.3.11)$$

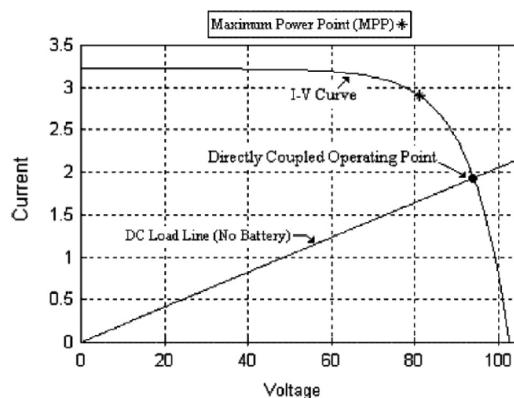
Στην μη γραμμική I-V καμπύλη του φωτοβολταϊκού πάνελ υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στο οποίο το πάνελ λειτουργεί με την μέγιστη ισχύ. Όταν το πάνελ συνδέεται με κάποιο φορτίο τότε το σημείο αυτό βρίσκεται στην διασταύρωση της καμπύλης I-V και της γραμμής φορτίου η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 1.11 [9].



Εικόνα 1.10 Εύρεση Μέγιστου Σημείου Ισχύος Φωτοβολταϊκού Πάνελ

Αυτό το σημείο όμως δεν είναι στο MPP του φωτοβολταϊκού πάνελ οπότε για να την λύση αυτού του προβλήματος πραγματοποιείται υπερεκτίμηση στον αριθμό των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιούνται ως εκ τούτου το κόστος του συστήματος ανεβαίνει. Το MPPT είναι ένας ηλιακός ελεγκτής ο οποίος διαθέτει έναν μικροελεγκτή που σκοπός του είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου με την χρήση των μεθόδων δειγματοληψίας και εντοπισμού της ισχύος του φωτοβολταϊκού ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Απόστολος Κλής

σε ένα διάστημα με βήμα 30ms. Έπειτα, πραγματοποιείται σύγκριση των παλαιών τιμών με των νέων. Αν η ισχύς αυξάνεται τότε η τάση του πάνελ ανεβαίνει προς την ίδια κατεύθυνση αλλιώς παραμένει σταθερή. Ο ελεγκτής αυτός που ελέγχει την τάση ή το ρεύμα των πάνελ ανεξάρτητα από το φορτίο που υπάρχει με την σωστή χρήση του εκάστοτε αλγορίθμου θα εντοπιστεί το MPP. Αυτό σημείο όμως δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων και εντοπίζεται με την χρήση ευρετικών αλγορίθμων ή με διάφορων υπολογιστικών μοντέλων. Η διαδικασία αυτή περιπλέκεται με την πρόσθεση της μη γραμμικότητας της I-V χαρακτηριστικής, της εξάρτησης από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας [9].

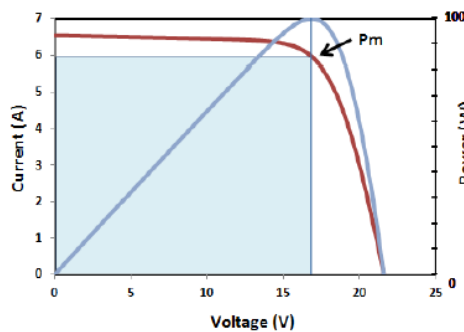


Εικόνα 1.11 Εντοπισμός Μέγιστου Σημείου Ισχύος με την Ύπαρξη Φορτίου

Για την εύρεση της μέγιστη ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πάνελ πρέπει να είναι γνωστά τα δυο σημεία μηδενισμού της ισχύς. Το μέγιστο ρεύμα που διαπέρνει τα φωτοβολταϊκά πάνελ εμφανίζεται όταν αυτά είναι βραχυκυκλωμένα και η μέγιστη τάση εμφανίζεται με την μη ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας. Τότε ανάμεσα σε αυτά τα δύο σημεία το γινόμενο της ισχύος, σχέση 1.3.11, μεγιστοποιείται και δίνεται από την σχέση 1.3.12:

$$P_m = I_m \times V_m \quad (1.3.12)$$

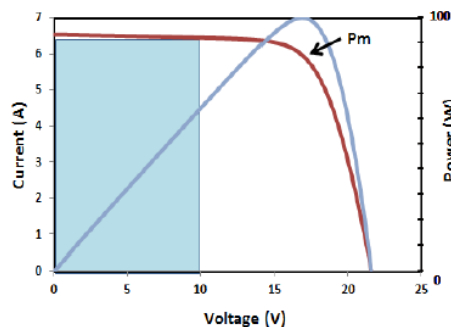
Όπως έχει προαναφερθεί για την λήψη της μέγιστης ισχύος του ηλιακού πάνελ (W_p) πρέπει ο ελεγκτής κάθε φορά να επιλέγει το βέλτιστο μοναδικό ζευγάρι της καμπύλης I-V του πάνελ. Έπειτα, για τον εντοπισμό του MPP που βρίσκεται στην καμπύλη I-V-P στην Εικόνα 1.11 πρέπει να βρεθεί η μέγιστη τάση V_m φέροντας μια κάθετη γραμμή από την κορυφή της καμπύλης ισχύος-τάσης και το μέγιστο ρεύμα I_m που εντοπίζεται φέροντας μια οριζόντια γραμμή που ξεκινά από το σημείο συνάντησης της μέγιστης τάσης στην καμπύλη ισχύος-τάσης¹.



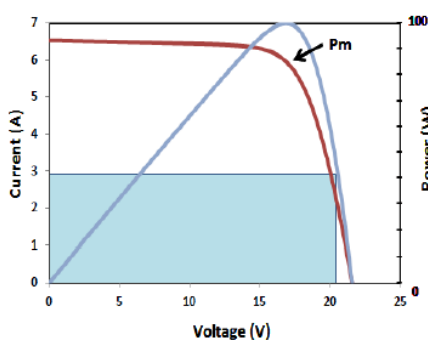
Εικόνα 1.12 Καμπύλη I-V-P για τον Εντοπισμό των V_m , I_m και P_m

Επιπλέον, στην μπλε περιοχή της Εικόνα 1.12 αναδεικνύεται η μέγιστη ωφέλιμη ισχύ που δίνεται από την σχέση 1.3.12. Με την μείωση ή την αύξηση, η τάση και δεν είναι η V_m τότε η μέγιστη

ισχύς P_m η οποία απεικονίζεται στην μπλε περιοχή, μειώνεται όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.13 και Εικόνα 1.14 αντίστοιχα².

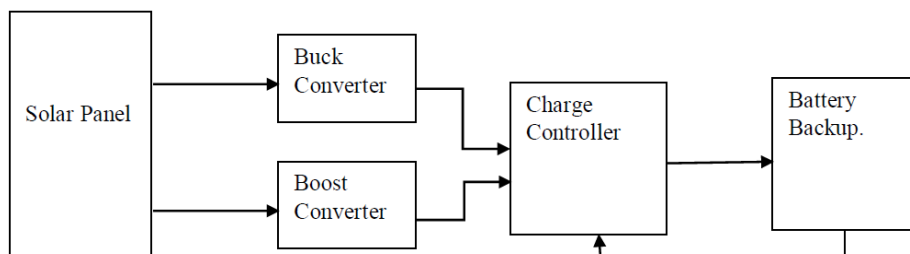


Εικόνα 1.13 Μείωση Ισχύος όταν η Τάση είναι Χαμηλή



Εικόνα 1.14 Μείωση Ισχύος όταν η Τάση είναι Υψηλή

Το μπλοκ διάγραμμα του MPPT ελεγκτή αποτελείται από buck και boost ελεγκτές οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την διατήρηση και την αύξηση της τάσης που μεταφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ στον ελεγκτή μπαταριών. Με τον buck ελεγκτή μειώνεται η τάση που έρχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όταν εκείνη υπερβαίνει την τιμή που έχει τεθεί από το ελεγκτή των μπαταριών ενώ παράλληλα αυξάνεται η τιμή του ρεύματος. Με τον boost ελεγκτή ενισχύεται η τάση που έρχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μέχρι εκείνη να φτάσει την απαιτούμενη τάση που χρειάζεται ο ελεγκτής μπαταριών ενώ παράλληλα μειώνει την ένταση του ρεύματος. Το μπλοκ διάγραμμα ενός MPPT ελεγκτή παρατηρείται στην Εικόνα 1.15.



Εικόνα 1.15 Μπλοκ Διάγραμμα MPPT ελεγκτή

Τα πλεονεκτήματα του MPPT είναι τα παρακάτω:

- Αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος κατά 30%
- Διαχειρίζεται φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία έχουν μεγαλύτερη τάση λειτουργίας από ότι το σύστημα μπαταριών του συστήματος

- Εντοπισμός και διόρθωση των αυξομειώσεων που παρουσιάζονται στην I-V χαρακτηριστική του πάνελ
- Το φωτοβολταϊκό πάνελ να λειτουργεί στην τάση που βρίσκεται κοντά το μέγιστο σημείο ισχύος ώστε να παράξει την μέγιστη ισχύ και
- Μειώνεται την πολυπλοκότητα του συστήματος ενώ παραμένει αποδοτικό
- Καλύτερη απόδοση από το PWM σε συνθήκες μερικής σκίασης
- Καλύτερη απόδοση από το PWM σε συνθήκες μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας και
- Μειώνονται οι απώλειες ενέργειας του συστήματος με την χρήση λεπτότερου καλωδίου σύνδεσης.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει ο εν λόγω ελεγκτής έχει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως:

- Το κόστος αγοράς του είναι υψηλότερο από του PWM
- Το μέγεθος του αυξάνεται όσο αυξάνεται η τάση και το ρεύμα που διαχειρίζεται
- Χωρισμός των φωτοβολταϊκών πάνελ του συστήματος σε strings και
- Πραγματοποίηση μελέτης διαστασιοποίησης η οποία για να πραγματοποιηθεί χρειάζεται την γνώση των χαρακτηριστικών από τον κατασκευαστή

Παρόλο των μειονεκτημάτων του η απόδοση του είναι καλύτερη από αυτή του PWM και στην συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει προτιμείται για την υλοποίηση του συστήματος ελέγχου φόρτισης των μπαταριών [6].

1.3.2.3 Κύριοι αλγόριθμοι υλοποίησης MPPT

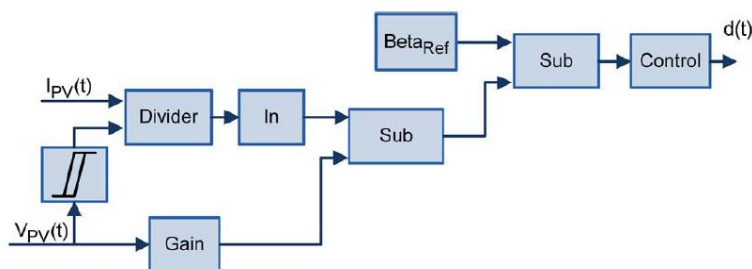
Για την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης του μέγιστου σημείου ισχύος στην μη γραμμική I-V χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού πάνελ πρώτα πρέπει να βρεθεί το μέγιστο σημείο τάσης που δίνει την μέγιστη ισχύ V_{mpp} ή το μέγιστο σημείο ρεύματος τάσης που δίνει την μέγιστη ισχύ I_{mpp} λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο εντοπισμός αυτού του σημείου γίνεται με την χρήση του αλγορίθμου trial and error λόγω της απότομης μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς δύο ο Ήλιος ή παρουσιάζεται συννεφιά. Ειδικότερα, με την ύπαρξη σκιάς παρουσιάζονται παραπάνω από ένα μέγιστο σημείο το οποίο όμως δεν είναι το επιθυμητό για όλη την διάρκεια της λειτουργίας παρά μόνο για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι λαμβάνουν τις αλλαγές σε θερμοκρασία και ακτινοβολία οι οποίοι είναι χρήσιμοι όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Κάποιοι άλλοι λαμβάνουν υπ' όψιν την ηλικία του φωτοβολταϊκού πάνελ, με τεχνικές ανοιχτού βρόχου οι οποίες χρειάζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και tuning. Υπάρχουν πολλές τεχνικές με τις οποίες μπορεί να υλοποιηθεί ένας ελεγκτής MPPT οι οποίες είναι: Fixed duty cycle, Βήτα μέθοδος, Hill climb-perturb and observe, incremental conductance, constant voltage/current, fractional open circuit, modified open circuit voltage/current, pilot cell, fractional short-circuit, modified short circuit, parasitic capacitance, $\frac{dP}{dI}$ ή $\frac{dP}{dV}$ feedback control, fuzzy logic controller, load current or load voltage maximization και neural network [9]. Επιπλέον, αυτοί οι αλγόριθμοι χωρίζονται σε έμμεσου και άμεσου υπολογισμού. Στον έμμεσο τρόπο ανήκουν οι αλγόριθμοι όπου χρησιμοποιείται ανοιχτοκύκλωμα, βραχυκύκλωμα και θα πρέπει να είναι γνωστά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του πάνελ ή να μπορούν να βρεθούν με την χρήση μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τις μετεωρολογικές συνθήκες του που επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Από την άλλη πλευρά οι άμεσες μέθοδοι λειτουργούν αποτελεσματικά κάτω από οποιοσδήποτε μετεωρολογικές συνθήκες. Οι πιο αποτελεσματικοί και διαδεδομένοι αλγόριθμοι είναι: Η μέθοδος βήτα, Hill climb-perturb and observation ή αλλιώς P&O και Incremental conductance (IncCod). Παρακάτω θα παρουσιαστούν και αναλυθούν οι δυο τελευταίοι αλγόριθμοι λόγω της διαδεδομένης εμπορικής χρήσης τους. Τέλος, οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς να είναι γνωστές συγκεκριμένες πληροφορίες του φωτοβολταϊκού πάνελ και εφαρμόζονται εύκολα λόγω της ενσωμάτωσής τους σε εμπορικούς ψηφιακούς ελεγκτές [10].

Η μέθοδος βήτα είναι η προσέγγιση του σημείου της μέγιστης ισχύς μέσα από την χρήση της εξίσωσης που περιέχει μια μεταβλητή β η οποία δίνεται από την εξίσωση 1.3.13:

$$\beta = \ln\left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right) - c x V_{PV} \quad (1.3.13)$$

Όπου το η μεταβλητή c ισούται με $c = \left(\frac{q}{nK_B T N_s}\right)$ όπου είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την φόρτιση των ηλεκτρονίων q , την ποιότητα της σύνδεσης p-n του φωτοβολταϊκού πάνελ n , την σταθερά Boltzmann K_B , την θερμοκρασία T και το πλήθος των ηλιακών κυψελών των φωτοβολταϊκών πάνελ N_s . Επιπλέον, όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας το β παραμένει σταθερό επειδή όπως έχει προαναφερθεί ο αλγόριθμος αυτός δεν επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Όποτε το β υπολογίζεται συνεχώς χρησιμοποιώντας την τάση και το ρεύμα του πάνελ μαζί με την προσθήκη ενός συμβατικού κλειστού βρόχου με μια σταθερό σημείο αναφοράς. Τέλος, για την βέλτιστη απόδοση είναι βασικό να είναι γνώστες οι ηλεκτρικές

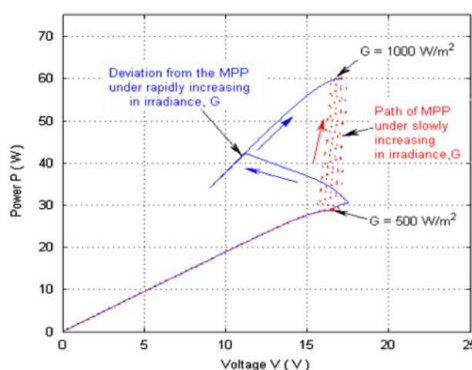
παράμετροι του φωτοβολταϊκού πάνελ. Το μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης της μεθόδου βήτα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.16 [10]:



Εικόνα 1.16 Μπλοκ Διάγραμμα Υλοποίησης της Μεθόδου βήτα

Ο αλγόριθμος Perturbation and Observation δηλαδή της πάρελξης και παρατήρησης είναι η πιο συνηθισμένη εμπορική μέθοδος υλοποίησης MPPT ελεγκτών λόγω του χαμηλού κόστους της και της εύκολης εφαρμογής της. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ταραζώντας περιοδικά την λειτουργική και παρακολουθώντας την διαφοροποίηση της ισχύος με σκοπό να υπολογίσει την διαφορά ανάμεσα στην αλλαγή τάσης και την τάση αναφοράς V_{ref} . Με την επίτευξη της επιθυμητής τιμής τάσης που ανεβάζει την παραγόμενη ισχύ ο αλγόριθμος μετατοπίζει την τάση προς το ίδιο μέρος με πριν αλλιώς ισχύει και το αντίστροφο δηλαδή όσο η τάση δεν αυξάνει την ισχύ τότε ο αλγόριθμος κατευθύνεται η τιμή της τάσης στην αντίθετη κατεύθυνσή από αυτή που κινούνταν. Με αυτό τον αλγόριθμο η τάση λειτουργίας μεταβάλλεται σε κάθε κύκλο του MPPT. Τελικά, καταλήγοντας στην επιθυμητή τάση, ο αλγόριθμος θα ταλαντεύεται γύρω από την V_{mpp} . Αυτό έχει ως συνέπεια στην δημιουργία διαφόρων μειονεκτημάτων όπως [10]:

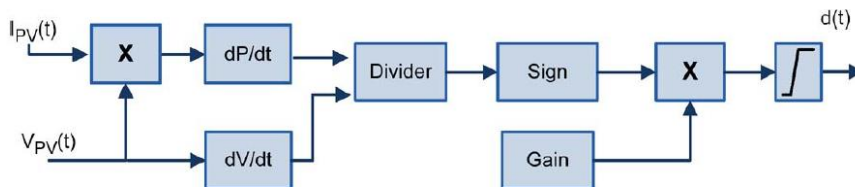
- Την μη σύγκλιση του αλγόριθμου στο V_{mpp} σημείο αλλά στην προσέγγιση αυτού
- Με την ύπαρξη απότομων μετεωρολογικών αλλαγών παραδείγματος χάριν συνεφιά υπάρχει αργή προσαρμογή του αλγόριθμου σε αυτό το φαινόμενο
- Πραγματοποίηση σωστού υπολογισμού του βήματος της πάρελξης ώστε να υπάρχει η βέλτιστη απόδοση τόσο στα δυναμικά όσο και στα στατικά φωτοβολταϊκά συστήματα
- Όταν αυξάνεται ραγδαία η ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να εντοπιστεί γρήγορα το βέλτιστο σημείο που βρίσκεται κοντά στο V_{mpp}



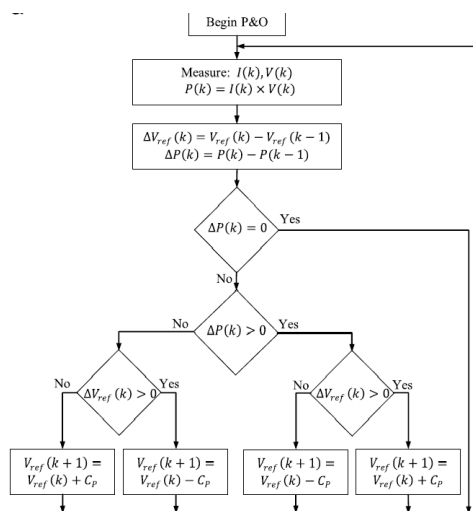
Εικόνα 1.17 Διάγραμμα Εντοπισμού MPP με Μεταβολή της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Για την εξάλειψη αυτών των μειονεκτημάτων που απεικονίζονται στην Εικόνα 1.17 έχουν κατασκευαστεί ειδικοί αλγόριθμοι P&O οι οποίοι λειτουργούν αποτυπώνοντας την ραγδαία αύξηση της ακτινοβολίας αυξάνοντας την ισχύ κατά δύο φορές στον κύκλο του αλγορίθμου ή ότι η διεύθυνση του παρέμεινε σταθερή στα δύο τελευταία βήματα του αλγορίθμου. Για την υλοποίηση αυτού του μοντέλου γίνεται η εισαγωγή δυο παραγόντων του ΔV και ΔP σε διαδοχικά βήματα

$k - 1$ και k αντίστοιχα. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος περιλαμβάνει 4 μεταβλητές $\Delta V(k)$, $\Delta V(k - 1)$, $\Delta P(k)$ και $\Delta P(k - 1)$ τα οποία δίνουν δεκαέξι πιθανές καταστάσεις. Αν η αύξηση της ισχύος οφείλεται από την διαδικασία του αλγορίθμου και όχι από την ακτινοβολία τότε ο αλγόριθμος θα μειώσει την ισχύ του για έναν κύκλο του και έπειτα θα γίνει επαναφορά της ισχύος στον αμέσως επόμενο. Τέλος, στην Εικόνα 1.18 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα του P&O αλγορίθμου και στην Εικόνα 1.19 ο αλγόριθμος P&O:

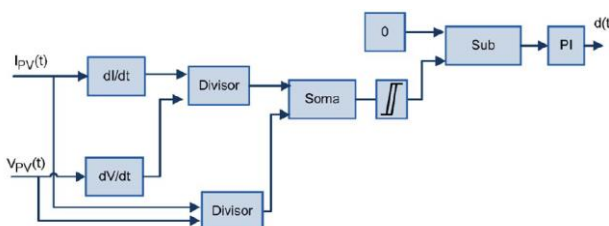


Εικόνα 1.18 Μπλοκ Διάγραμμα Υλοποίησης P&O Αλγορίθμου



Εικόνα 1.19 Ο Αλγόριθμος P&O

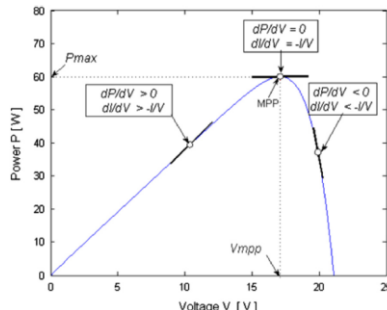
Ο αλγόριθμος Incremental Conductance ή αλλιώς InCod βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση στο διάγραμμα P-V ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι μηδενική στο μέγιστο σημείο ισχύος όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 1.19. Ο αλγόριθμος προτάθηκε για την βελτίωση του εντοπισμού, την ακρίβεια και την δυναμική απόδοση του MPPT ελεγκτή υπό ευμετάβλητες συνθήκες. Η τάση εξόδου και το ρεύμα εξόδου παρακολουθούνται και ο ελεγκτής υπολογίζει την αγωγιμότητα με ακρίβεια. Είναι γνωστό ότι η ισχύς υπολογίζεται από την σχέση $P = V * I$. Τέλος, ο σκοπός του αλγορίθμου είναι να εντοπίσει την λειτουργική τάση όπου το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει στιγμιαία αγωγιμότητα I/V όπου ισούται με την παράγωγο dI/dV ανιχνεύεται με την εφαρμογή δυο αισθητήρων που μετρούν την τάση και το ρεύμα λειτουργίας. Το μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης του InCod αλγορίθμου απεικονίζεται στην Εικόνα 1.20 [9].



Εικόνα 1.20 Μπλοκ Διάγραμμα Αλγορίθμου InCod

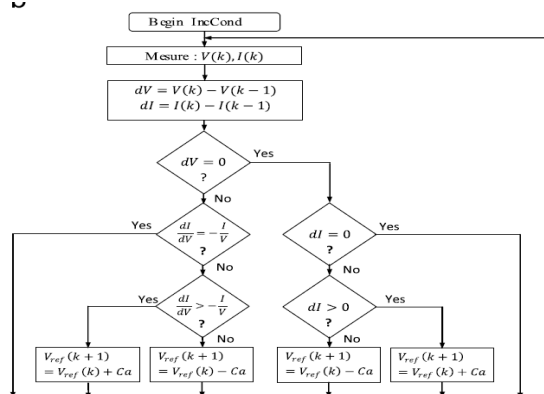
Η παράγωγος dV/dP έχει τις παρακάτω καταστάσεις όπου απεικονίζονται στην Εικόνα 1.21 :

- $\frac{dV}{dP} = 0$ τότε $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ Μέγιστο σημείο MPP
- $\frac{dV}{dP} > 0$ τότε $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ βρίσκεται αριστερότερα από το MPP
- $\frac{dV}{dP} < 0$ τότε $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ βρίσκεται δεξιότερα από το MPP



Εικόνα 1.21 Θέσεις Παραγώγου $\frac{dV}{dP}$ στο Διάγραμμα P-V ενός Φωτοβολταϊκού Πάνελ

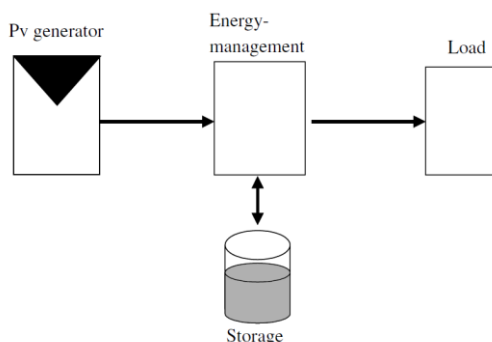
Οι αλλαγές υπολογίζονται δειγματοληπτώντας τα σημεία στην I-V χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού πάνελ σε συνεχή διαστήματα κ και $\kappa - 1$ ως εξής : $dV(k) = V(k) - V(k - 1)$ και $dI(k) = I(k) - I(k - 1)$. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 1.3.16 η V_{ref} είναι η τάση που εφαρμόζεται ώστε να λειτουργήσει το πάνελ. Στο MPP $V_{ref} = V_{mpp}$ εφόσον προσεγγιστεί θα παραμένει εκεί μέχρις ότου υπάρξει κάποια μεταβολή dI οι οποία οφείλεται σε μεταβολή των καιρικών συνθηκών άρα μεταβάλλεται ταυτόχρονα το MPP. Υπάρχει μια σταθερά βήματος Ca η οποία χρησιμοποιείται ώστε να μειώνεται το V_{ref} μέχρις ότου βρεθεί το νέο μέγιστο σημείο ισχύος. Με αυτό τον τρόπο το απαλείφεται το μειονέκτημα του αλγορίθμου P&O το οποίο δεν μπορεί να εντοπίσει το σημείο αυτό σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας. Η αποτελεσματικότητα του κυμαίνεται από 95 έως 98.2% χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν ο θόρυβος των εξαρτημάτων. Επιπλέον, δεν μπορεί πάντα να επιτευχθεί $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ όποτε τοποθετείται ένας παράγοντας σφάλματος ϵ και η σχέση αυτή αλλάζει και γίνεται $\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| \leq \epsilon$ και προσδιορίζει την ευαισθησία του συστήματος. Τέλος, επιλέγεται με προσοχή ανάμεσα στις ταλαντώσεις των σταθερών καταστάσεων ώστε να αποφευχθεί η ταλάντωση στο ίδιο σημείο. Ο αλγόριθμος υλοποίησης InCod αναλύεται στην Εικόνα 1.22 [9].



Εικόνα 1.22 Ο Αλγόριθμος Υλοποίησης InCod

1.3.3 Μπαταρίες

Για την συνεχή ροή ενέργειας σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απαραίτητη η αποθήκευση της ενέργειας σε κάποιο μέσο. Το πιο συνηθισμένο μέσο για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας είναι τα ηλεκτροχημικά συστήματα μπαταριών τύπου μόλυβδού Lead Acid, Νικελίου NiNH και ιόντων λιθίου Li-on. Η χρήση αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη για την ύπαρξη όσο το δυνατό λιγότερων ασταθειών στο σύστημα που δημιουργούνται από την έλλειψη ηλιοφάνειας και την ύπαρξη συννεφιάς. Για την συνεχή και σταθερή τροφοδοσία του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματός πρέπει η ελάχιστη χωρητικότητα των μπαταριών που χρησιμοποιούνται να αρκεί για την ηλεκτροδότηση του συστήματος τουλάχιστον για μία μέρα. Επιπλέον, κατά την διαστασιοποίηση του λαμβάνεται υπ' όψιν οι εποχικές διαφορές και στην εξισορρόπηση αυτών, οι διάφορες στην παραγωγή ενέργειας κατά την χειμερινή και την καλοκαιρινή περίοδο. Τέλος, η διαστασιοποίηση του συστήματος μπαταριών βελτιώνονται περαιτέρω λαμβάνοντας υπ' όψιν την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, διάφορους άλλους παράγοντες του συστήματος και την χωρητικότητα αυτού. Ένας εμπειρικός κανόνας για την χωρητικότητα των μπαταριών είναι να είναι τριπλάσιες έως δεκαπλάσιες σε χωρητικότητα από ότι το καταναλισκόμενο φορτίο της οικίας. Συνήθως στα αυτόνομα συστήματα όπως το παρόν χρησιμοποιούνται και γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν ως εφεδρικό σύστημα όταν υπάρχει κάποια κρίσιμη κατάσταση όπως της χαμηλής ηλιοφάνειας και μπορούν να βελτιώσουν τον χρόνο ζωής των μπαταριών. Ένα τέτοιο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα περιγράφεται στην Εικόνα 1.23 [11].

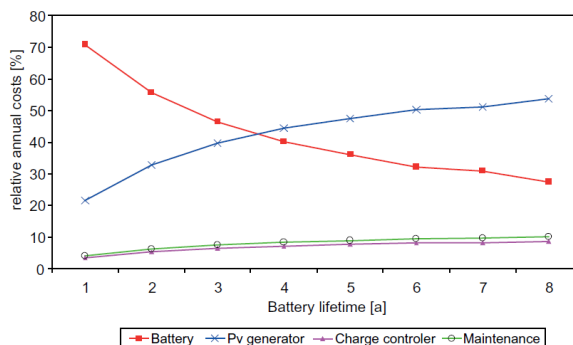


Εικόνα 1.23 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα με την Χρήση Μπαταριών

Οι απαιτήσεις του συστήματος μπαταριών είναι:

- Χαμηλό κόστος
- Υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα
- Χαμηλή αυτό-εκφόρτιση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Ελάχιστη συντήρηση
- Απλή λειτουργία του συστήματος

Σε ένα μέσο φωτοβολταϊκό σύστημα με την χρήση Lead Acid μπαταριών έχει συνολική διάρκεια ζωής τα δώδεκα έτη το σύστημα μπαταριών αποτελεί ίσως το πιο κοστοβόρο μέρος του συστήματος [11].

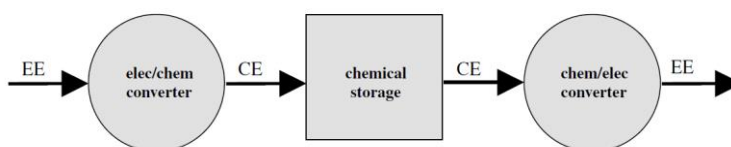


Εικόνα 1.24 Κόστη Συστήματος σε Συνάρτηση με Ζωή της Μπαταρίας

Από την Εικόνα 1.24 γίνεται κατανοητό πως η ζωή της μπαταρίας επηρεάζει περισσότερο το κόστος από οποιοδήποτε άλλο μέρος του συστήματος ειδικότερα δε αν ο κύκλος ζωής της είναι κάτω από το όριο των τριεισήμισι ετών τότε με σιγουριά είναι το πιο ακριβό μέρος του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος που μαζί με τον υπολογισμό της συντήρησης τους ανεβάσουν ακόμα περισσότερο το κόστος. Όπως είναι γνωστό τα περισσότερα συστήματα δεν είναι ιδανικά και έχουν διάφορες απώλειες. Στις μπαταρίες αυτές οι απώλειες εμφανίζονται κατά την διάρκεια φόρτισης, εκφόρτισης και αποθήκευσης ενέργειας. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται από την ενεργειακή αποδοτικότητα και την αυτό-εκφόρτιση του συστήματος. Η ενεργειακή αποδοτικότητα ορίζεται ως το κλάσμα της ενέργειας που έχει η μπαταρία όταν είναι πλήρως φορτισμένη προς την ενέργεια που έχει η μπαταρία κατά την εκφόρτιση και ορίζεται από την σχέση 1.3.14:

$$n_{wh} = \frac{K_{whout}}{K_{whin}} \quad (1.3.14)$$

Η αυτό-εκφόρτιση επηρεάζεται από τις εσωτερικές απώλειες του συστήματος όπως μια διαρροή υγρών και από τις εξωτερικές απώλειες που προκαλούνται από την καταναλισκόμενη ενέργεια των φορτίων που τροφοδοτεί. Καθώς, η ενεργειακή διακίνηση είναι μικρή σε σύγκριση με το μέγεθος της εκφόρτισης τότε δεν επηρεάζεται τόσο το σύστημα. Ακόμη, η εκφόρτιση του συστήματος μπαταριών επηρεάζει περισσότερο την εποχική αποθήκευση λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών που υπάρχουν ανάλογα με την εκάστοτε εποχή. Τέλος, δεν μπορούν να παραλειφθούν τα κόστη συντήρησης από ένα σύστημα. Όσο πιο χαμηλά είναι τόσο ωφελείται ο ιδιοκτήτης ειδικά αν βρίσκεται σε μια περιοχή απομονωμένη και το μέγεθος του συστήματος είναι μικρό. Το διάγραμμα αρχών λειτουργίας μίας μπαταρίας περιγράφεται στην Εικόνα 1.25 [12].



Εικόνα 1.25 Διάγραμμα Αρχής Λειτουργίας Ηλεκτροχημικών Μπαταριών

Αρχικά, οι συλλέκτες της μπαταρίας μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική με την χρήση ενός ηλεκτροχημικού μετατροπέα. Όταν χρειαστεί η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε χημική μορφή μπορεί να μετατραπεί ξανά μέσω του ίδιου μηχανισμού σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μετατροπείς σε αυτές τις δυο περιπτώσεις είναι οι ηλιακές κυψέλες οι οποίες καθορίζουν την χωρητικότητα και την ισχύ του συστήματος μπαταριών [11]. Επιπλέον, οι μπαταρίες έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία είναι η χωρητικότητα τους η οποία μετράτε σε Ah. Αν V η

τάση της μπαταρίας τότε η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία δίνεται από την σχέση $Ah \times V = Watt - hour$. Συνήθως η χωρητικότητα μιας μπαταρίας είναι γνωστή για ένα συγκεκριμένο διάστημα φόρτισης εκφόρτισης ή C βαθμονόμησης. Η πραγματική της χωρητικότητα εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας όπως το πλήθος των φορτίων και η θερμοκρασία. Η τάση πλήρης φόρτισης κατά τις συνθήκες λειτουργίας είναι γνωστή ως ονομαστική τάση ή τάση λειτουργίας της μπαταρίας η οποία δίνεται από τους κατασκευαστές και παίρνει τις τιμές 12, 24, 48V. Το βάθος της αποφόρτισης ή αλλιώς Depth of Discharge (DoD) μετρά την ενέργεια που αντλείται από μια μπαταρία σε συνάρτηση με την πλήρη χωρητικότητά της. Η κατάσταση φόρτισης μιας μπαταρίας είναι η διαφορά ανάμεσα σε μια πλήρη φόρτιση και το βάθος εκφόρτισης εκφρασμένο σε ποσοστό. Αν το DoD μιας μπαταρίας είναι 25% τότε η κατάσταση φόρτισης είναι $100-25=75\%$ άρα από αυτή την συγκεκριμένη μπαταρία χρησιμοποιείται το 75% της χωρητικότητάς της. Ο κύκλος ζωής της μπαταρίας είναι ο αριθμός ενός πλήρους κύκλου φόρτισης εκφόρτισης. Η μπαταρία λειτουργεί μέχρι η ονομαστική της τάση φτάσει μέχρι το 80% της χωρητικότητάς της. Μετά από τον συγκεκριμένο κύκλο ζωής η μπαταρία θα λειτουργεί αλλά με μειωμένη χωρητικότητά. Ο ρυθμός φόρτισης εκφόρτισης ή αλλιώς μέτρηση C είναι μια αναλογία μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας προς τον αριθμό των ωρών που χρειάζεται για φορτιστεί ή εκφορτιστεί αντίστοιχα και αναπαρίσταται ως C/X. Το X είναι οι ώρες της φόρτισης ή εκφόρτισης. Αν το X=10h τότε στην μέτρηση C γράφεται ως 0.1C ή C/10. Το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης μπορεί να βρεθεί διαιρώντας την χωρητικότητά της μπαταρίας σε Ah δια τις συνολικές ώρες φόρτισης ή εκφόρτισης. Από το εγχειρίδιο της μπαταρίας RES 2 SOPzS 215² παρατηρείται ότι η ονομαστική ισχύ της είναι τα 215 Ah στο 120C στους 20 °C όποτε το ρεύμα εκφόρτισης υπολογίζεται 1,80A. Επιπλέον, η μέτρηση αυτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία και την διάρκεια της φόρτισης ή εκφόρτισης. Στο εγχειρίδιο της μπαταρίας οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μετρήσεις με διαφορετική τιμή C αλλά σε με σταθερή θερμοκρασία. Τέλος, η αυτό-εκφόρτιση είναι η ηλεκτρική χωρητικότητά που χάνεται όταν η μπαταρία δεν χρησιμοποιείται και οι απώλειες αυτές προκύπτουν λόγω των εσωτερικών ηλεκτροχημικών διαδικασιών της. Η αυτό-εκφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και για αυτό θα ήταν καλό για να διατηρηθεί ο κύκλος ζωής της να αποθηκεύονται σε χώρους που έχουν χαμηλή θερμοκρασία [12].

² “Sunlight RES SOPzS,” The-sunlight-group.com, Sep. 20, 2022. <https://www.the-sunlight-group.com/el/greece/proionta/res-sopzs/> (accessed March 21, 2024).

1.3.3.1 Τύποι και Γήρανση Μπαταριών

Τα συστήματα μπαταριών χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την χωρητικότητα τους χωρίζονται σε δύο: Στα εσωτερικά συστήματα και στα εξωτερικά. Τα εσωτερικά συστήματα αποθηκεύουν την παραγόμενη ενέργεια στην ενεργή μάζα των ηλεκτροδίων των ηλεκτροχημικών κυψελών. Σε αυτή την περίπτωση η χωρητικότητα και ισχύς είναι ανάλογες του βάρους της εκάστοτε μπαταρίας. Το μέσο αποθήκευσης στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκεται σε στερεή κατάσταση, η κατασκευή τους είναι αρκετά απλή και ο πιο συνηθισμένος τύπος μπαταριών είναι οι Lead Acid. Τα συστήματα εξωτερικής αποθήκευσης έχουν χωριστά τις ηλεκτροχημικές κυψέλες σε δυο διαφορετικές περιοχές. Η χωρητικότητά τους μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες τις εκάστοτε μελέτης σε οποιοδήποτε επιθυμητό μέγεθος. Επίσης, είναι εφικτό να διαχωριστούν οι κυψέλες από τον χώρο αποθήκευσης και να μεταφερθούν ξεχωριστά και η κατάσταση του μέσο αποθήκευσης είναι είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή ώστε να επιτευχθεί αυτός ο διαχωρισμός. Τέλος, λόγω αυτών των χαρακτηριστικών η κατασκευή τους γίνεται πολύπλοκη και ακριβή. Ένας συνηθισμένος τύπος τέτοιας μπαταρίας είναι οι τύπου συλλεκτών αερίου. Όπως έχει προαναφερθεί υπάρχουν διάφοροι τύποι μπαταριών ανάλογα με το υλικό κατασκευή τους. Οι πιο δημοφιλής είναι:

(α) Οι μπαταρίες τύπου μόλυβδού οι οποίες έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Η αποθηκευμένη χωρητικότητά τους είναι 25 Wh/kg, η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς κυμαίνεται από 70 ως 100 W/kg και η διάρκεια ζωής τους είναι 250 έως 750 κύκλοι φόρτισης. Τα πλεονεκτήματα τους είναι: το χαμηλό κόστος τους, είναι σχετικά ασφαλείς, αποτελεσματικές και διαθέσιμες καθιστώντας αυτές μια από τις πιο δημοφιλής επιλογές. Από την άλλη τα μειονεκτήματα τους είναι η μικρή παραγωγή ενέργειας και μικρή διάρκεια ζωής τους. Τέλος, υπάρχουν μπαταρίες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή και έχουν εξαλείψει κάποια από τα μειονεκτήματα τους και είναι οι vented pasted, tubular και VRLA wasted.

(β) Οι μπαταρίες νικελίου μετάλλου (Ni-MH) έχουν βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα (Gravimetric Energy Density) που κυμαίνεται από 65 έως 75 Wh/kg, πυκνότητα ισχύος (Power Density) από 120 έως 150 W/kg. Τα πλεονεκτήματα που έχουν είναι η υψηλή ισχύ που διαθέτουν, η συμπεριφορά φόρτισης εκφόρτισης και είναι αρκετά φιλικές προς το περιβάλλον. Τα μειονεκτήματα τους είναι το υψηλό κόστος, την χαμηλή ασφάλεια, έχουν μεγάλο ποσοστό αυτό-εκφόρτισης και χαμηλή αποδοτικότητα.

(γ) Οι μπαταρίες με βάση το λίθιο οι οποίες παρότι κατασκευαστικά δεν εμφανίζουν καμία διαφορά με τους άλλους δύο τύπους έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά όπως η βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα (Gravimetric Energy Density) η οποία κυμαίνεται από 100 έως 150 Wh/kg, η πυκνότητα ισχύος (Power Density) τους κυμαίνεται από 150 έως 250 W/kg και ο κύκλος ζωής τους είναι πάνω από 1000 κύκλους. Τα πλεονεκτήματα τους είναι η υψηλή συγκεκριμένη ενέργεια και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Τα μειονεκτήματα τους είναι το υψηλό κόστος, σχετικά μικρή ασφάλεια και καμία ιδιαίτερη αντίδραση στην υπερφόρτιση κάνοντας αυτό το φαινόμενο μη αισθητό στον χειριστή του συστήματος [12]. Υπάρχουν διαφορετικά είδη μπαταριών λιθίου οι πιο δημοφιλής είναι:

- LFP ή LiFePO₄
- NMC (Lithium nikel Manganese Cobalt oxide)

- LMO (Lithium Manganese Oxide)
- NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminum oxide)

Οι NMC μπαταρίες διαθέτουν διαφορετική δομή καθόδου από ότι η οι μπαταρίες LFP. Με αυτή την δομή οι μπαταρίες αυτές διαθέτουν καλύτερο κύκλο ζωής, μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και καλύτερη θερμική σταθερότητα σε σύγκριση με τις LFP. Η τάση λειτουργίας της βρίσκεται στα 3,6 V. Ο πρώτος τύπος μπαταριών λιθίου που έγινε διαθέσιμος από την εταιρία Sanyo το 1975 είναι ο LMO. Οι μπαταρίες αυτές διαθέτουν τρισδιάστατη δομή στα μόρια του λιθίου με την οποία μειώνεται το κόστος παραγωγής, βελτιώνεται η σταθερότητα τους και η κατασκευή τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον όσο αυτή μιας συμβατικής μπαταρίας. Η τάση λειτουργίας αυτών των μπαταριών βρίσκεται στα 3,7V. Τα μειονεκτήματα που διαθέτει είναι η αύξηση της φθοράς όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ξεπέρα τους 60°C. Οι μπαταρίες NCA διαθέτουν αρκετές ομοιότητες με τις NMC διότι διαθέτουν ίδια δομή στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Σε αυτό το τύπο μπαταριών χρησιμοποιείται το αλουμινίου έναντι του μαγγανίου που χρησιμοποιούν οι υπόλοιπες. Με την χρήση του αλουμινίου βελτιώνεται ο χρόνος ζωής σε σχέση με τις NMC και η χωρητικότητα σε σχέση με τις LFP και LMO. Το μοναδικό μειονέκτημα που διαθέτουν είναι στο μέρος της ασφάλειας, όπου χρειάζονται ειδικές μετρήσεις σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους μπαταριών [13].

Σημαντικός τύπος μπαταρίας τύπου λιθίου είναι η LiFePO_4 ή LFP οποία θα αναλυθεί σε ξεχωριστή ενότητα. Κοντολογίς, στην Εικόνα 1.26 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του εκάστοτε τύπου μπαταριών στις κατηγορίες της ασφάλειας, της συγκεκριμένης ενέργειας, της συγκεκριμένης ισχύς, του κόστους και του ποσοστού ανακύκλωσης αυτών. Τα ++ σημαίνουν ότι είναι αρκετά καλή, + σημαίνει ότι είναι καλή, 0 σημαίνει ότι είναι ικανοποιητική, το – σημαίνει ότι είναι κακή και τα – σημαίνει ότι είναι αρκετά κακή [12].

	Lead-acid	Ni-MH	Li
Safety	+	0	– for large batteries 0 for small cells
Specific energy	–	+	++
Specific power	+	++	+
Specific costs	+	–	0
Recycling	++	0	0

Εικόνα 1.26 Σύγκριση Αποτελεσματικότητας Διαφόρων Τύπων Μπαταριών

Για την κατανόηση των απαιτήσεων του συστήματος αποθήκευσης ειδικά για ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό αναλύονται οι συνθήκες λειτουργίας καθώς και οι ιδιότητες του συστήματος αποθήκευσης. Οι συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία, την χρήση του συστήματος, την κατανάλωση των φορτίων της οικίας που τροφοδοτείται από το σύστημα, από την ύπαρξη γεννητριών στο σύστημα και με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Οι πιο σημαντικοί παράμετροι που κατηγοριοποιούν το σύστημα ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας είναι το ρεύμα φόρτισης εκφόρτισης, το προφίλ της κατάστασης της φόρτισης και η θερμοκρασία. Για την κατηγοριοποίηση αυτή ο Borpp et al και Sauer διενήργησαν ένα πείραμα πάνω στις μπαταρίες των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων χωρίς την ύπαρξη γεννήτριας. Το συμπέρασμα από αυτό το πείραμα ήταν η κατηγοριοποίηση των μπαταριών σε 4 κατηγορίες. Η κατηγορία I είναι τα συστήματα στα οποία δεν υπάρχει καμία εφεδρική γεννήτρια και το σύστημα είναι πλήρως αυτόνομο. Οι κατηγορίες 2, 3 και 4 είναι υβριδικά συστήματα, τα οποία βασίζονται αρκετά σε γεννήτριες τύπου diesel και έχουν σχετικά μικρές μπαταρίες και μικρής ισχύος φωτοβολταϊκά ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Απόστολος Κλής

συστήματα. Στην Εικόνα 1.27 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατηγορίας μαζί με τους επιμέρους παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι μέρες αυτονομίας του συστήματος, η διακίνηση της χωρητικότητας του συστήματος, τα βασικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας και το εκάστοτε είδος μπαταρίας. Επιπλέον, με βάση αυτή την κατηγοριοποίηση εκτιμώνται οι ιδιότητες των μπαταριών ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Το κλάσμα της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας με της καταναλισκόμενης ενέργειας μαζί με τις μέρες αυτονομίας χωρητικότητας του συστήματος προκύπτουν από την σχεδίαση των συστημάτων σε σχεδιαστικά συστήματα. Επομένως, η κατηγοριοποίηση επιτρέπει στον σχεδιαστή να ζητήσει από τους έμπορους τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει η μπαταρία που πρέπει να χρησιμοποιήσει δείχνοντας τους απλά αυτό τον πίνακα. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι κάθε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα έχει διαφορετικές ανάγκες, οπότε κάθε μελέτης έχει διαφορετική προσέγγιση στην επιλογή του τύπου των μπαταριών [11].

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
<i>System indicators</i>				
Solar fraction	100%	70-90%	About 50%	<50%
Storage size/days of autonomy	3->10 days	3-5 days	1-3 days	About 1 day
Capacity throughput*	10-25	30-80	100-150	150-200
<i>Necessary battery features</i>				
Number of lifetime cycles*	Low (<300) → high (>1200)			
Capability to withstand long periods in deep discharged states	Important ← less important			
Low self-discharge rate	Important (<1% per month) → less important (5% per month)			
Measures against acid stratification	Important Very important Important			
Resistance against corrosion	Important ← less important			
<i>Type of battery</i>				
SLI	-	-	-	-
Stationary	•	•	•	•
Traction	-	-	•	•
Electric vehicle	-	-	•	•
"Solar battery" (from SLI)	•	•	•	•
VRLA	•	•	•	•
Flooded	•	•	•	•

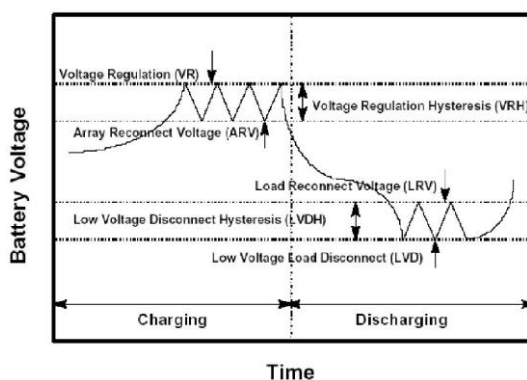
Εικόνα 1.27 Πίνακας Κατηγοριοποίησης Ανάλογα με τις Συνθήκες Λειτουργίας

Η σύγκριση των Lead Acid μπαταριών με άλλα είδη αποκαλύπτει μια μεγάλη αδυναμία τους η οποία είναι η μικρή διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι οι μπαταρίες ήδη επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας κάνοντας της έτσι να γερνούν πιο γρήγορα όποτε είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι καταστάσεις αυτές για να αποφευχθούν και να παραταθεί περισσότερο η ζωή του συστήματος. Ο πρώτος παράγοντας γήρανσης είναι η χημική στρωμάτωση η οποία εμφανίζεται από στα ηλεκτρόδια της μπαταρίας και δημιουργείται από τους ηλεκτροχημικούς παράγοντες. Ουσιαστικά δημιουργείται ένα στρώμα οξέος με μειωμένη πυκνότητα στο άνω μέρος και με μεγαλύτερη πυκνότητα στο κάτω μέρος της. Η διαδικασία αυτή δεν αποτελεί από μόνη της παράγοντα γήρανσης της μπαταρίας αλλά επηρεάζει την λειτουργία της και επιταχύνει το γήρας της. Μειώνει την διαθέσιμη χωρητικότητα και αλλάζει την χαρακτηριστική I-V. Η διαφορά αυτή είναι συνδεδεμένη με την συγκέντρωση διαφορετικών ακρών και την δημιουργία ανομοιογενούς ρεύματος στα ηλεκτρόδια το οποίο μπορεί να προκαλέσει υπερ-φόρτιση στην μπαταρία. Η θείωση της μπαταρίας δημιουργείται από την εκφόρτιση των ηλεκτροδίων όπου η ενεργή μάζα οξειδίων του μόλυβδου και μόλυβδου μετατρέπονται σε θεικό μόλυβδο. Αν δεν φορτιστεί σύντομα η μπαταρία μετά την εκφόρτιση της σχηματίζονται θεικοί κρύσταλλοι ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της επανακρυσταλλοποίησης. Ο ρυθμός της είναι γραμμικός και συνδέεται με την διαλυτότητα του θεικών ιόντων και την θερμοκρασία. Δυστυχώς, η διάλυση των ιόντων θείου αυξάνεται με την μείωση της συγκέντρωσης των οξέων. Όσο τα ιόντα θείου χρησιμοποιούνται κατά την εκφόρτιση η μείωση της συγκέντρωσης οξέων είναι γραμμική και συνδέεται με την μείωση του φορτίου της μπαταρίας. Όποτε οι περίοδοι όπου η μπαταρία βρίσκεται σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης μπορούν να την βλάψουν επιταχύνοντας την διαδικασία ανάπτυξης μεγάλων θεικών κρυστάλλων. Κατά την διάρκεια της φόρτισης αυτοί οι μεγάλοι κρύσταλλοι με την μικρή ενεργή επιφάνεια μεγαλώνουν και καταστρέφουν τους μικρότερους. Σε αυτή την διαδικασία οι εναπομείναντες κρύσταλλοι συγκεντρώνονται μειώνοντας έτσι την ενεργή μάζα δηλαδή ελαχιστοποιούν την χωρητικότητα της μπαταρίας. Η θείωση μειώνει την χωρητικότητα και την

τάση κατά την διάρκεια της αποφόρτισης και αλλάζει τις τιμές κατωφλίου της. Η διάβρωση στις μπαταρίες είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει όταν ένα ή περισσότερα μέρη της μπαταρίας υποστούν φθορά ή διάβρωση λόγω χημικών αντιδράσεων ή άλλων διεργασιών. Γίνεται αντιληπτό κατά την διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης εφόσον αυξάνεται η ωμική πτώση τάσης. Ο ρυθμός της διάβρωσης εξαρτάται από την πυκνότητα του οξέος, την προοπτική του ηλεκτροδίου, την θερμοκρασία, το υλικό κατασκευής, την κάλυψη που έχει το ενεργό υλικό της μπαταρίας ενώ ο πιο σημαντικός παράγοντας από όλους είναι η ποιότητα κατασκευής του πλέγματος. Η διάβρωση είναι αισθητή στο διάστημα κάτω των 2,0V και άνω των 2,4V. Η διάβρωση είναι ελάχιστη στις κυψέλες που έχουν τάση που κυμαίνεται κοντά στα 2,23V. Στις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές χρησιμοποιούνται πιο πυκνά πλέγματα ώστε να μειωθεί το φαινόμενο αυτό και να επεκταθεί η ζωή της μπαταρίας [12]. Όταν ασκούνται στα ηλεκτρόδια μεγάλες μηχανικές δυνάμεις κατά την διάρκεια ζωής του λόγω της μετατροπής του ενεργού υλικού σε θεϊκό μόλυβδο κατά την εκφόρτιση τότε η μπαταρία διαβρώνεται. Ο θεϊκός μόλυβδος έχει κατά 1.94 φορές επιπλέον όγκο από τα οξείδια του μόλυβδου κατά όγκο κατά mol. Εξαιτίας, αυτής της αλλαγής σε όγκο το ενεργό υλικό χαλαρώνει και διαχωρίζεται από το ηλεκτρόδιο σχηματίζοντας έτσι μια πάστα στην βάση της μπαταρίας. Αν αυτός ο όγκος μεγαλώσει μπορεί να δημιουργήσει βραχυκύκλωμα μεταξύ των ηλεκτροδίων [11]. Το βραχυκύκλωμα δημιουργείται όταν οι πλάκες που βρίσκονται στο θετικό ηλεκτρόδιο πάνω από το ενεργό υλικό έχουν διαβρωθεί. Αυτό οδηγεί στην αποσύνδεση μεγάλων οξειδωμένων κομματιών που μπορεί να πέσουν στα ηλεκτρόδια και να δημιουργήσουν βραχυκυκλώματα. Αυτό μπορεί να αποτραπεί με την χρήση ειδικών διαχωριστικών που μπορούν να επεκταθούν πάνω από τα ηλεκτρόδια. Επιπλέον, για τις Lead Acid μπαταρίες υπάρχει ο κίνδυνος δημιουργίας μικροσκοπικών βραχυκυκλωμάτων από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας. Η ανάπτυξη τους επιταχύνεται με μακρές περιόδους χαμηλής κατάστασης φόρτισης που δημιουργούν χαμηλές συγκεντρώσεις οξέων. Τέλος, τα βραχυκυκλώματα μαζί με τα φαινόμενα διάβρωσης είναι τα μόνα που μπορούν να τερματίσουν ξαφνικά την λειτουργία της μπαταρίας. Ένας ακόμα παράγοντας γήρανσης αποτελεί η ανάστροφη φόρτισης της μπαταρίας. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί σε ατομικές κυψέλες που βρίσκονται μέσα σε μια σειρά κύψελων. Η τάση της μπαταρίας και η ασφάλεια βαθιάς εκφόρτισης της ελέγχονται από την σειρά κύψελων. Κάποιες μεμονωμένες κυψέλες της σειράς μπορεί να έχουν χαμηλότερη χωρητικότητα λόγω των κατασκευαστικών αποκλίσεων που υπάρχουν ή σε πιο γρήγορη γήρανση από ότι οι άλλες κυψέλες. Αυτό έχει ως συνέπεια την υπερφόρτιση τους που μπορεί να δημιουργήσει ανάστροφη φόρτιση. Η γρήγορη γήρανση που γίνεται από την οξείδωση των προσθέτων ουσιών του μολύβδινου στρώματος του αρνητικού πόλου του ηλεκτροδίου τα οποία είναι αρκετά πορώδη. Αν καταστραφούν τα πρόσθετα αυτά θα δημιουργηθούν στο αρνητικό ηλεκτρόδιο κρύσταλλοι μόλυβδου που έχουν ως συνέπεια την καταστροφή της εσωτερικής περιοχής και απώλεια της χωρητικότητας. Τελευταίος παράγοντας γήρανσης είναι η χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία. Η χαμηλή θερμοκρασία δεν επιταχύνει την γήρανση της μπαταρίας αλλά πρέπει να βρίσκεται σε ένα σημείο το οποίο δεν μπορεί να παγώσει την μπαταρία. Αν παγώσει η μπαταρία καθίσταται άχρηστη διότι δεν μπορεί να λειτουργήσει και αν καταφέρει να λειτουργήσει υπάρχει κίνδυνος να σκάσει. Στις υψηλές θερμοκρασίες είναι γνωστό ότι επιταχύνονται κάθε χημική ή ηλεκτροχημική διαδικασία. Το ίδιο λοιπόν ισχύει και για τις μπαταρίες. Η θερμοκρασία της μπορεί να αυξηθεί από την υψηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος και αυτή που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης της. Αν υπάρξει αύξηση της κατά 10 βαθμούς Κέλβιν η χωρητικότητα της μειώνεται περίπου κατά 50%. Τέλος, η ιδανική θερμοκρασία λειτουργίας των μπαταριών κυμαίνεται από 10 έως 20 βαθμούς Κελσίου.

1.3.3.2 Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών

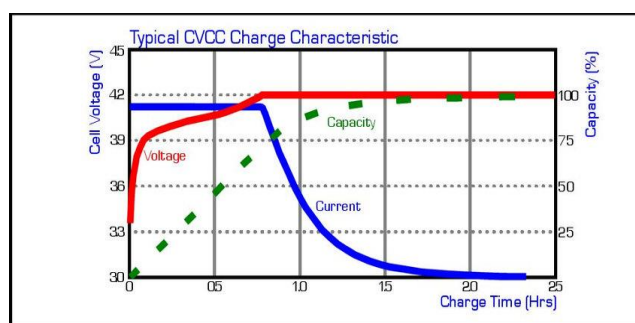
Όπως έχει προαναφερθεί οι μπαταρίες αντιμετωπίζουν διάφορα πλεονεκτήματα τα οποία μειώνουν τον κύκλο ζωής τους και πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι ο μη καθορισμός ενός βέλτιστου κύκλου στον οποίο οι μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν και εκφορτιστούν όπου αυτό επιταχύνει όλους τους παράγοντες γήρανσης που έχουν προαναφερθεί άρα και μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρήση ενός συστήματος διαχείρισης μπαταριών ή Battery Management System (BMS) το οποίο ελέγχει την μπαταρία να μην υπερφορτωθεί ή εκφορτιστεί πλήρως. Αυτή η συσκευή αποτελείται από ένα DC σε DC μετατροπέα, έναν περιοριστή και ένα σύστημα ελέγχου παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ο μετατροπέας DC ελέγχεται από σύστημα και ταυτοχρονίζει την αντίσταση μεταξύ τους. Ο περιοριστής φορτίου οριοθετεί το DoD της μπαταρίας και περιορίζει την ροή ρεύματος που την τροφοδοτεί. Επιπλέον, περιορίζει την υπερφόρτιση ενώ παράλληλα εκμεταλλεύεται την διαθέσιμη ηλιακή με την χρήση ενός MPPT. Η διαδικασία της φόρτισης των μπαταριών είναι από τις πιο σημαντικές διαδικασίες του συστήματος επειδή μπορεί να επεκτείνει την ζωή τους αν γίνει σωστά. Η φόρτιση του συστήματος μπαταριών σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι καθημερινή και διεξάγεται όταν υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια. Για την φόρτιση υπάρχουν διάφορα σημεία τα οποία περιγράφονται στην Εικόνα 1.28 [14].



Εικόνα 1.28 Κρίσιμα Σημεία κατά την Διάρκεια Φόρτισης Εκφόρτισης

Τα σημεία της εικόνας 1.28 αποτρέπουν την μπαταρία από το φαινόμενο της φόρτισης και της εκφόρτισης. Το σημείο του περιορισμού τάσης (VR) είναι το σημείο της μέγιστης τάσης της μπαταρίας την οποία επιτυγχάνει όταν αποσυνδέεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η τάση σύνδεσης (ARV) είναι το σημείο της τάσης της μπαταρίας στο οποίο η μπαταρία και τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι σε σύνδεση μεταξύ τους. Η χαμηλή τάση αποσύνδεσης (LVD) είναι το σημείο στο οποίο η μπαταρία πρέπει να αποσυνδεθεί από την φορτίο ώστε να προστατευτεί η μπαταρία από πιθανή υπερφόρτιση. Η τάση επανασύνδεσης φορτίου (LRV) είναι το σημείο της τάσης στο οποίο επιτρέπεται το φορτίο να επανασυνδεθεί με τις μπαταρίες του συστήματος. Για να γίνει πλήρης φόρτιση της μπαταρίας ακολουθούνται τρία διαφορετικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο η μπαταρία φορτίζεται σε ποσοστό που κυμαίνεται από 80 έως 90%. Κατά το δεύτερο στάδιο φόρτισης η μπαταρία φορτίζει τα μεσαία και χαμηλά στρώματα τάσης της. Τέλος, στο τρίτο στάδιο και πιο καθοριστικό γίνεται η εξισορρόπηση των κυψελών. Αυτό το στάδιο γίνεται περιοδικά ώστε να διατηρήσουν την ίδια φόρτιση και την ίδια τάση όλες οι κυψέλες της μπαταρίας. Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε μία με δύο εβδομάδες. Υπάρχουν δυο κύριες μέθοδοι για την φόρτιση του συστήματος των μπαταριών η άσκηση συνεχής

τάσης και η άσκηση συνεχούς ρεύματος. Το σύστημα διαχείρισης είναι υπεύθυνο για να εφαρμόσει την εκάστοτε μέθοδο φόρτισης και να διατηρήσει τα προαναφερθέντα σημεία λειτουργίας της μπαταρίας ώστε να βελτιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής της. Η μέθοδος της συνεχούς τάσης είναι η εφαρμογή μιας συνεχούς τάσης κατά την διάρκεια της φόρτισης. Αρχικά, υπάρχει ένα μεγάλο ρεύμα το οποίο οφείλεται στην διαφορά τάσης φόρτισης με την τάση της μπαταρίας. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας το ρεύμα μειώνεται ενώ η τάση αυξάνεται. Όταν η ροή του ρεύματος μηδενιστεί τότε η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως. Τέλος, ο μηδενισμός του ρεύματος είναι αργός διότι όταν προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή φόρτισης της μπαταρίας το ρεύμα μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό. Από την άλλη πλευρά, στην μέθοδο συνεχούς ρεύματος η τάση αλλάζει ώστε να διατηρηθεί σταθερό το ρεύμα. Ένας ελεγκτής σταθερού ρεύματος μπορεί να φορτίσει την μπαταρία σε μικρότερο χρόνο από ότι ο σταθερής τάσης με ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα την μη ύπαρξη προστασίας από το φαινόμενο της υπερφόρτισης το οποίο συνεπάγεται με την μείωση της χωρητικότητας και μείωσης του χρόνου λειτουργίας της μπαταρίας. Στην Εικόνα 1.29 παρατηρείται η διαφορά στον χρόνο φόρτισης μιας μπαταρίας λιθίου με τους δύο τρόπους [14].



Εικόνα 1.29 Διάγραμμα Σύγκρισης Χρόνου Φόρτισης των Μεθόδων Συνεχούς Τάσης και Ρεύματος

Συμπερασματικά, το σύστημα διαχείρισης μπαταριών ελέγχει την φόρτιση της μπαταρίας ενώ αποτρέπει την εκφόρτιση της για μεγάλα χρονικά διαστήματα και παράλληλα την προστατεύει και από το φαινόμενο της υπερφόρτισης. Τα τελευταία έτη παρατηρείται η τάση αλλαγής τύπου μπαταριών στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι επικρατούσες μπαταρίες τύπου Lead Acid αντικαθίστανται από τις μπαταρίες λιθίου και συγκεκριμένα με τον τύπο LFP επειδή:

- Φιλικότερες στο περιβάλλον
- Διαθέτουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Μικρότερο κόστος συντήρησης και υψηλότερη ασφάλεια σε σύγκριση με τις Lead Acid
- Διαθέτουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα λόγω των πολλών κύκλων φορτίσεων
- Μεγαλύτερη αντοχή σε περίοδοι βαθιάς αποφόρτισης όταν συνοδεύονται με το κατάλληλο σύστημα επιτήρησης

1.3.3.3 Τεχνολογία LiFePO_4

Είναι γνωστό ότι με την ύπαρξη των Lead Acid μπαταριών πρέπει να υπάρχει και μια γεννήτρια η οποία ενισχύει την απόδοση του συστήματος. Με τις λιθίου σιδήρου φώσφορου λύνεται αυτό το πρόβλημα. Ειδικότερα στα μικρά συστήματα που υπάρχουν σε αναπτυσσόμενες χώρες οι χρόνοι φόρτισης εκφόρτισης είναι μικροί περίπου στις δέκα με δώδεκα ώρες. Με αυτή την τάση σε συνδυασμό με την πτώση των τιμών στα ηλιακά πάνελ το κόστος των μπαταριών έρχεται στο προσκήνιο. Όπως έχει προαναφερθεί στην προηγούμενη υπό-υποενότητα οι μπαταρίες μολύβδου που χρησιμοποιούνταν για τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα εμφανίζουν μειονεκτήματα όπως η διαρροή οξέων λόγω βλάβης και η πρόωρη γήρανση τους όταν παραμένουν σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης. Από την άλλη η LiFePO_4 λόγω της καλύτερης χημικής και θερμικής σταθερότητας που εμφανίζουν η οποία συνεπάγεται καλύτερη ασφάλεια από της άλλου τύπου ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές όπως η ηλεκτροκίνηση. Λόγω των ισχυρότερων δεσμών μεταξύ των ατόμων του φωσφόρου με το οξυγόνο δεν απελευθερώνεται τόσο εύκολα το οξυγόνο κάνοντας το έτσι πρακτικά αδύνατο να εκραγεί η μπαταρία ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η λειτουργία της μέχρι και τους 85°C . Επιπρόσθετα, ο όγκος της μπαταρίας είναι κατά 65% μικρότερος και κατά 1/3 πιο ελαφρύς από μια μολύβδου κάνοντας την έτσι πιο φορητή. Ο κύκλος λειτουργίας της κυμαίνεται στους 2000 κύκλους με την χωρητικότητα της να φτάνει το 80% που είναι 6 με 7 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των μολύβδου. Στην Εικόνα 1.30 παρατίθενται διάφορα είδη μπαταριών μολύβδου και συγκρίνονται με την λιθίου φωσφορικού σιδήρου ως προς την ονομαστική τάση, τους κύκλους ζωής, την ενεργειακή απόδοση, την χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα, τον ρυθμό εκφόρτισης, το κόστος, την φιλικότητα τους προς το περιβάλλον και την τελική αξιολόγηση τους. Όπως είναι αναμενόμενο η LiFePO_4 κυριαρχεί στις προαναφερθείσες κατηγορίες με μοναδικό μειονέκτημα το μεγαλύτερο αρχικό κόστος αγοράς από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Επιλογικά, είναι η καλύτερη επιλογή για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει σε σχέση με τους άλλους τύπους μπαταριών [15].

Battery type	Lead acid Flooded	Lead Acid AGM	Lead Acid GEL	Li-Mg/Co	LiFePO_4
Nominal voltage	2.12	2.12	2.12	3.7	3.3
Lifespan [cycles]	300	300	300	300	2000
Energy efficiency [%]	80	80	80	90	>90
Usable capacity [%]	70	70	70	90	>90
Self-discharge rate [% p. month]	3	3	3	1	1
Cost [US\$/kWh]	0.1	0.15	0.15	0.3	0.3
Sizing rule [module]	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1
Sizing rule [days]	3	3	3	2	2
Lifecycle storage cost [US\$/kWh]	0.33	0.5	0.5	1	0.15
Environmental friendliness	Low	Low	Medium	High	High
Overall evaluation	-	0	+	++(+)	++(+)

Εικόνα 1.30 Σύγκριση Χαρακτηριστικών Μπαταριών Μόλυβδου με Λιθίου

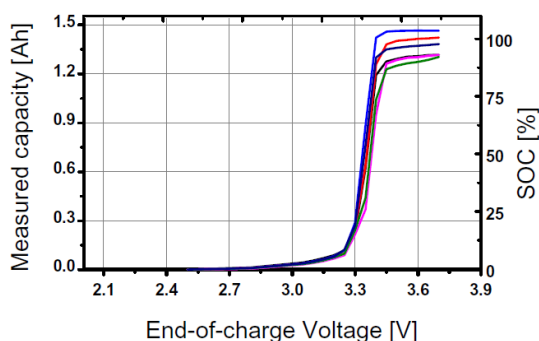
Για να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά των LiFePO_4 μπαταριών διεξάχθηκαν πειράματα πάνω σε ένα πλήθος παρόμοιων μπαταριών με ονομαστική χωρητικότητα 1.4Ah και ονομαστική τάση 3.2V. Οι ιδιότητες που ερευνώνται είναι η σχέση μεταξύ τελικής τάσης ή End Cell Voltage (ECV) και η κατάσταση φόρτισης ή State of Charge (SoC). Σε βιομηχανική χρήση οι κυψέλες των μπαταριών συνδέονται σε σειρά με το κεντρικό μπλοκ της μπαταρίας. Λόγω της επίβλεψης μη ομοιόμορφων μοναδικών κυψελών υπάρχει πιθανότητα να μην φορτιστούν ομοιόμορφα οι κυψέλες και ως εκ τούτου κάποιες εξ αυτών να υπερφορτιστούν. Όταν υπερφορτίζονται συχνά οι κυψέλες δημιουργείται ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο το οποίο οδηγεί στον σχηματισμό δενδριτών. Αυτοί

μπορούν να τρυπήσουν το διαχωριστικό του στοιχείου με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά η χωρητικότητα της μπαταρίας. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως υποβάθμιση της χωρητικότητας της μπαταρίας (degradation). Όποτε, είναι απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας για να προστατευτούν πρώτα η ζωή των κυψελών της μπαταρίας και κατά επέκταση η ίδια η μπαταρία. Για την μέτρηση της αποδοτικότητας (efficiency) των μπαταριών θα πρέπει να μετρηθεί σε ένα πλήρη κύκλο φόρτισης τόσο η ενέργεια που καταναλώθηκε για την φόρτιση όσο και η ενέργεια που πραγματικά αποθηκεύτηκε. Το πείραμα αυτό μπορεί να γίνει με διαφορετικές ταχύτητες φόρτισης και να μετρηθεί η αποδοτικότητα της συστοιχίας μπαταριών. Ένα τέτοιο πείραμα πραγματοποιήθηκε από τους ερευνητές Wang et al και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.31 [15].

Charge duration	Manufacturer A
2 h	92%
10 h	97%
100 h	99%

Εικόνα 1.31 Συσχετισμός Διάρκειας Φόρτισης με την Αποδοτικότητα μιας LiFePO₄ μπαταρίας

Συμπερασματικά, οι μπαταρίες τύπου LiFePO₄ εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία την κάνουν ιδανική για την χρήση της σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα από ότι οι μπαταρίες τύπου Lead Acid. Οι σχέσεις της χωρητικότητας, της κατάστασης φόρτισης και της τελικής τάσης όπως και η αποδοτικότητα των μπαταριών αποδεικνύει ακόμη περισσότερο την υπεροχή τους. Επιπλέον, η πιο κρίσιμη τάση όπως φαίνεται από την Εικόνα 1.32 είναι τα 3.3V με 3.4V [15].

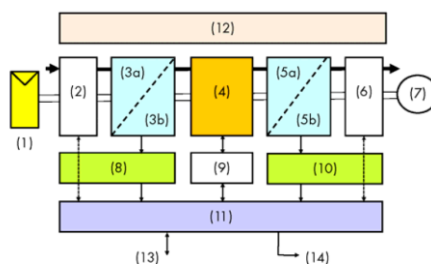


Εικόνα 1.32 Διάγραμμα χωρητικότητας τάσης φόρτισης και κατάστασης φόρτισης

Στην Εικόνα 1.32 γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να αναπτυχθούν αλγόριθμοι οι οποίοι λαμβάνουν υπ' όψιν αυτή την τάση ώστε να υπάρχουν χαμηλοί χρόνοι φόρτισης εκφόρτισης των μπαταριών στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα κοντά στις 10 με 100 ώρες. Τέλος, σε αυτές τις καταστάσεις οι μπαταρίες αυτές έφτασαν την αποδοτικότητα ως 99% το οποίο της καθιστά ιδανικές για αυτές τις εφαρμογές.

1.3.4 Αντιστροφείς

Η σωστή επιλογή των μετατροπέων ενέργειας που μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις ενός φωτοβολταϊκού συστήματος έχει τεράστια επιρροή στην βέλτιστη απόδοση του. Οι ηλιακοί αντιστροφείς που έχουν αναπτυχθεί την τελευταία εικοσαετία σε μεγάλο βαθμό λόγω των αλλαγών που συντελούνται στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις ανάγκες του συστήματος, στα φορτία του, στην μη γραμμικότητα των ηλιακών πάνελ και στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος [16]. Η κύρια λειτουργία του αντιστροφέα σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η μετατροπή της DC τάσης που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε ημίτονη AC τάση η οποία είναι συμβατή με το δίκτυο ρεύματος η οποία κυμαίνεται στα 240V και με συχνότητα 50Hz η οποία είναι η τάση και η συχνότητα λειτουργίας των οικιακών συσκευών αντίστοιχα. Εκτός από την μετατροπή της παραγόμενης DC τάσης σε AC οι αντιστροφείς μπορούν να ελέγξουν την γεννήτρια της ηλιακής ενέργειας, την διεξαγωγή μετρήσεων στο DC και στο AC μέρος του δικτύου, την επιτήρηση και προστασία όλου του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και την επικοινωνία του χρήστη με το δίκτυο ή τα φορτία του συστήματος. Στην Εικόνα 1.33 παρατίθεται το μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας του αντιστροφέα καθώς και τα μέρη που τον απαρτίζουν [17].



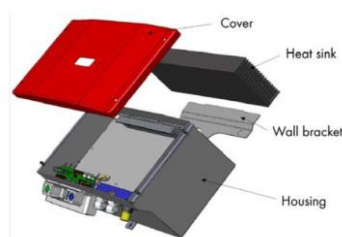
Εικόνα 1.33 Μπλοκ Διάγραμμα αντιστροφέα

Το διάγραμμα της εικόνας 1.33 αποτελείται από 14 μέρη τα οποία λειτουργούν ως εξής: Το (1) είναι η ηλιακή γεννήτρια η οποία στην συνέχεια έχει διακόπτες και την προστασία της DC τάσης που είναι το εξάρτημα (2) που παράγεται από την ηλιακή γεννήτρια, το (3α) εξάρτημα το οποίο είναι το κύκλωμα προστασίας από την ηλεκτρική ακτινοβολία και ακολουθείται από ένα DC φίλτρο που είναι το εξάρτημα (3b). Έπειτα, το εξάρτημα (4) αποτελείται από τα διάταξη των ημιαγωγών ισχύος του αντιστροφέα το οποίο αποτελεί το βασικότερο μέρος του. Στην συνέχεια τα εξαρτήματα (5α) το οποίο είναι το ηλεκτρομαγνητικό φίλτρο και το (5b) το οποίο είναι το φίλτρο ημιτόνου τα οποία βρίσκονται στο AC κομμάτι μπλοκ διαγράμματος. Τα εξαρτήματα (6) και (7) τα οποία είναι οι διακόπτες AC και το δίκτυο αντίστοιχα. Ο εξοπλισμός για την διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων στο DC και AC κομμάτι είναι τα εξαρτήματα (8) και (10) αντίστοιχα τα οποία με την βοήθεια των οδηγών (9) αλληλοεπιδρούν με τα διάφορα εξαρτήματα και τους ελεγκτές. Ο ελεγκτής το εξάρτημα (11) λειτουργεί ως μονάδα προστασίας, γεννήτρια παλμών, ελέγχου, παρακολούθησης και αλληλεπίδρασης. Τα μέρη τα οποία παρουσιάζουν απώλειες θερμότητας όπως οι ημιαγωγοί ισχύος και οι μαγνήτες συνδέονται με μία ψήκτρα η οποία είναι ενσωματωμένη στον αντιστροφέα ώστε να ελαττωθούν οι θερμικές απώλειες. Ακόμα, οι περισσότεροι αντιστροφείς είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο ρεύματος δηλαδή επιστρέφουν την παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα στο δίκτυο. Η αποδοτικότητα τους αποτελεί τον σπουδαιότερο παράγοντα με το οποίο συγκρίνονται οι αντιστροφείς μεταξύ τους ώστε να επιλεγθεί ο καλύτερος για την εφαρμογή την οποία επιλέγονται να εκτελέσουν. Για την αύξηση της αποδοτικότητας τους κρίθηκε

αναγκαίο από τους κατασκευαστές να επανασχεδιάζονται ανά τακτά διαστήματα ώστε να μειωθούν οι τιμές στην παραγόμενη ισχύ ανά μονάδα, να διατηρηθεί σταθερό το κόστος παράλληλα με την αύξηση της ισχύος των αντιστροφέων, την απλοποίηση της παραγωγής τους και την μεγαλύτερη ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του αντιστροφέα. Επιπλέον, μειώνονται οι απώλειες από την παραγωγή θερμότητας με την χρήση της απαιτούμενης ψύξης, καθώς και την βελτίωση της αποδοτικότητας των ημιαγωγών με την χρήση του πυριτίου και του άνθρακα (SiC) και των μαγνητών σε συνδυασμό με τις νέες τοπολογίες που εφαρμόζονται.

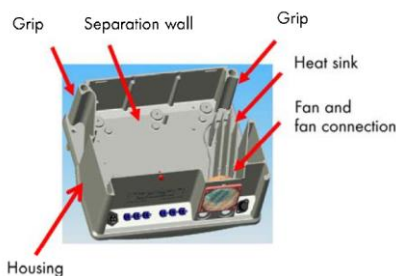
1.3.4.1 Είδη

Οι πρώτοι αντιστροφείς κατασκευάστηκαν το 1991 και η απόδοση τους κυμαίνονταν στο 90% και είχαν πολύ μικρή τάση είσοδου. Η δεύτερη γενιά αντιστροφέων που ξεκίνησε το 2004 είχε βελτιώσεις στους τομείς της ψύξης και καλύτερη διάταξη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε σχέση με αυτούς της πρώτης γενιάς. Η αποδοτικότητα τους προσεγγίζει το 98% με παράλληλη αύξηση της τάσης εξόδου από τον αντιστροφέα. Τέλος, η Τρίτη γενιά η οποία ξεκινά να κατασκευάζεται από το 2007 είναι η πιο αναπτυγμένη γενιά σε όλους τους τομείς: της ονομαστικής ισχύος και της πολυπλοκότητας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των περιορισμών της τροφοδοσίας και την αύξηση της ισχύος εξόδου η οποία φτάνει μέχρι και τα 5kW. Στην Εικόνα 1.34 απεικονίζεται η δομή ενός αντιστροφέα πρώτης γενιάς. Αρχικά αποτελείται από το περίβλημα που είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι στην οποία η αλουμινένια ψήκτρα και το επιτοίχιο στήριγμα συνδέονται μεταξύ του με βίδες. Ο μετασχηματιστής, το πηνίο και το ηλεκτρομαγνητικό φίλτρο είναι εξαρτήματα τα οποία είναι διακριτά μεταξύ τους. Τα ημιαγωγικά εξαρτήματα συνδέονται πάνω στην αλουμινένια ψήκτρα ώστε να μειωθεί η απώλειες που προκαλούνται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Η εγκατάσταση των εξαρτημάτων γίνεται από πάνω προς τα κάτω με την χρήση συνδέσμων που βρίσκονται στο πίσω μέρος του περιβλήματος. Το μειονέκτημα που εμφανίζει αυτή η τεχνική τοποθέτησης είναι η αύξηση στον αριθμό των καλωδίων που κατά επέκταση αποτελεί τον παράγοντα που μπορεί να χαλάσει την συσκευή. Με αυτό τον τρόπο όμως δεν αναγκαστική ψύξη ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα του αντιστροφέα αλλά υπάρχει υψηλή προστασία με την χρήση του προτύπου IP65. Ο πρώτος αριθμός στην συγκεκριμένο πρότυπο διασφαλίζει ότι η συσκευή έχει θωράκιση από οποιοδήποτε στερεό ακόμα και σε επαφή με τον άνθρωπο το νούμερο 6 αποτελεί την μέγιστη θωράκιση από την σκόνη και ο δεύτερος αριθμός διασφαλίζει την προστασία από την είσοδο υγρών στην συσκευή όπου ο αριθμός 5 αντιπροσωπεύει νερό που εκτοξεύεται υπό πίεση από στόμιο 12,5mm προς τη συσκευή, από οποιαδήποτε κατεύθυνση ότι δε θα τη βλάψει [18].



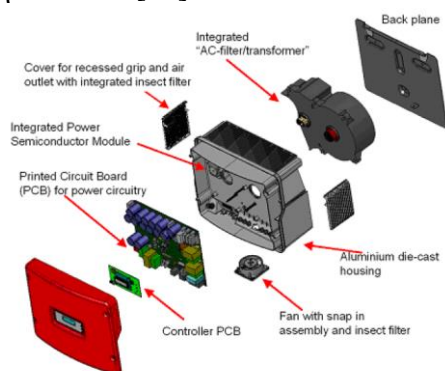
Εικόνα 1.34 Δομή Αντιστροφέας Πρώτης Γενιάς

Η δεύτερη γενιά αποτελείται από αντιστροφείς οι οποίοι έχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος η οποία απαιτεί ένα νέο βελτιωμένο σύστημα θερμικής διαχείρισης ώστε να είναι εφικτή αυτή η αύξηση ισχύος. Στην Εικόνα 1.35 αναπαρίσταται το περίβλημα ενός αντιστροφέα δεύτερης γενιάς.



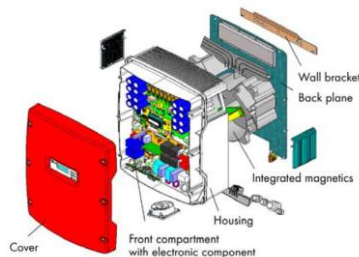
Εικόνα 1.35 Περίβλημα Αντιστροφέα Δεύτερης Γενιάς

Αποτελείται από τα παρακάτω μέρη: Το περίβλημα του, τον διαχωριστικό τοίχο του μπροστινού με του πίσω μέρους, την ηλεκτρομαγνητική μόνωση, την ψήκτρα, τις επιτοίχιες βάσεις και την σύνθεση της ψήκτρας. Επιπλέον υπάρχει μια ενσωματωμένη μαγνητική μονάδα η οποία περιλαμβάνει έναν μετασχηματιστή, πηνία και τα AC φίλτρα τα οποία βρίσκονται στο πίσω μέρος του αντιστροφέα. Τα προαναφερθέντα εξαρτήματα τοποθετούνται σε ένα πλαστικό περίβλημα το οποίο δημιουργεί ένα κανάλι αέρος που βελτιώνει την ψύξη που χρειάζονται τα περισσότερα εξαρτήματα που είναι τοποθετημένα σε αυτή την διάταξη. Στην Εικόνα 1.36 περιγράφεται η τοποθέτηση των ηλεκτρομηχανικών μερών ενός αντιστροφέα μέσης τάσης της δεύτερης γενιάς. Σε σύγκριση με την πρώτη γενιά η δεύτερη είναι το περίβλημα κατασκευασμένο από αλουμίνιο και έχει ενσωματωμένη ψήκτρα και λαβές. Στο πίσω μέρος όπου βρίσκονται τα AC εξαρτήματα μαζί με το φίλτρο και τον μετασχηματιστή είναι απομονωμένο πλήρως από το μπροστινό μέρος. Η σύνδεση μεταξύ μπροστινού και πίσω μέρους του αντιστροφέα γίνεται με την χρήση ενός σφραγισμένου συστήματος που βρίσκεται στο πίσω μέρος της ηλεκτρικής πλακέτας. Επίσης, αντί της χρήσης ημιαγωγών ισχύος χρησιμοποιούνται σετ από ενσωματωμένα ηλεκτρονικά ισχύος και για την μείωση των καλωδίων του αντιστροφέα χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρομαγνητικό φίλτρο που βρίσκεται πάνω στην ηλεκτρική πλακέτα [18].



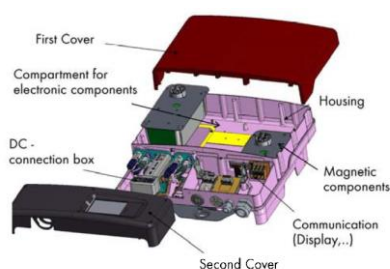
Εικόνα 1.36 Δομή Ηλεκτρομηχανικών Μερών Αντιστροφέα Δεύτερης Γενιάς

Η απαίτηση όμως για αντιστροφείς με μεγαλύτερη ισχύ εξόδου έφεραν τις πρώτες βελτιώσεις της δεύτερης γενιάς μαζί με την βελτίωση της θερμικής διαχείρισης των εξαρτημάτων. Η χρήση του συστήματος Opticool επιτυγχάνει ακριβώς αυτόν τον σκοπό της βελτιστοποίησης θερμικής διαχείρισης με την χρήση δυο ξεχωριστών διαμερισμάτων. Στο πίσω διαμέρισμα βρίσκεται ο εξαερισμός ενώ στο μπροστά βρίσκονται όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Με την χρήση δυο ανεμιστήρων δημιουργείται μεγαλύτερη ροή αέρα ώστε να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η ψύξη. Στην Εικόνα 1.37 διακρίνεται η δομή των ενισχυμένης εξόδου τάσης αντιστροφέων δεύτερης γενιάς. Όπως και οι αντιστροφείς της δεύτερης γενιάς με χαμηλή ισχύ εξόδου είναι το περίβλημα τους είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο με ενσωματωμένες ψήκτρες, χερούλια, τους ενσωματωμένους μαγνήτες, τα ηλεκτρονικά ισχύος και την θήκη. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτού του τύπου αντιστροφέα είναι η αύξηση του όγκου του αλλά τα πλεονεκτήματα του είναι περισσότερα από τα μειονεκτήματα όπως η αύξηση της ονομαστικής ισχύος εξόδου και μεγαλύτερη αποδοτικότητα από τους αντιστροφείς πρώτης και δεύτερης γενιάς που κυμαίνεται στο 98% [17].



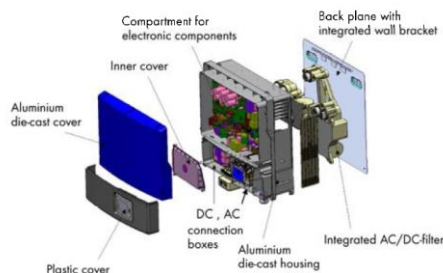
Εικόνα 1.37 Δομή αντιστροφέα Ενισχυμένης Τάσης Εξόδου Δεύτερης Γενιάς

Η Τρίτη γενιά ξεκινά να κατασκευάζεται από το 2007. Απλοποιείται η διαδικασία κατασκευής των εξαρτημάτων με την τοποθέτηση τους πάνω στο μπροστινό διαμέρισμα του αντιστροφέα. Το μπροστινό διαμέρισμα χωρίζεται σε τρία διαφορετικά μέρη όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.38 [18].



Εικόνα 1.38 Δομή Αντιστροφέα Τρίτης Γενιάς

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία έχουν ημιαγωγούς βρίσκονται στο μεγαλύτερο διαμέρισμα το οποίο σφραγίζεται με μια πλάκα αλουμινίου η οποία προσφέρει απομόνωση από την σκόνη, την υγρασία με συνέπεια την βαθμονόμηση ασφάλειας της συσκευής στο πρότυπο IP να είναι IP65. Τα μικρότερα διαμερίσματα έχουν μικρότερη κάλυψη από την σκόνη και την υγρασία και καλύπτονται μόνο από ένα πλαστικό περιβλήμα. Η χρήση αυτού του τύπου διαχωρισμού αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα στην εγκατάσταση, στην επισκευή και στις εργασίες συντήρησης του αντιστροφέα χωρίς να χάνεται όμως η προστασία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στο μικρότερο δεύτερο και τρίτο διαμέρισμα υπάρχουν τα DC και AC εξαρτήματα αντίστοιχα τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους ώστε να είναι ευκολότερη η εγκατάσταση, η επισκευή και η συντήρησή τους. Τα ηλεκτρονικά μέρη ενσωματώνονται σε μια ηλεκτρονική πλακέτα και υπάρχουν δύο μαγνήτες στις κοιλότητες του τοίχους αποσύνδεσης του μπροστινού με του πίσω διαμερίσματος. Στην Εικόνα 1.39 περιγράφεται η δομή των ενισχυμένων τάσεως εξόδου τριφασικών αντιστροφέων το οποίο αποτελεί βελτίωση της τρίτης γενιάς [18].

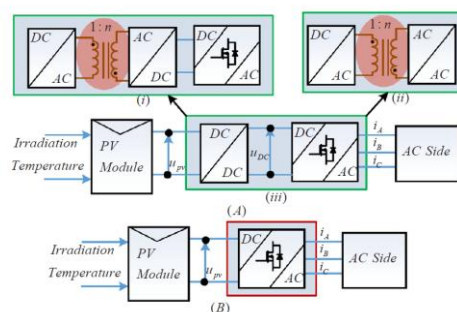


Εικόνα 1.39 Δομή Αντιστροφέα Ενισχυμένης Τάσης Εξόδου Τρίτης Γενιάς

Το περίβλημα έχει ακριβώς την ίδια κατασκευή όπως και οι άλλες γενιές. Το πίσω διαμέρισμα δυο ψήκτρες που είναι ίδιες με αυτές της δεύτερης γενιάς. Οι διαφορές βρίσκονται στην τοποθέτηση των μαγνητών και στο πίσω διαμέρισμα όπου εκτός από τα AC εξαρτήματα βρίσκονται ενσωματωμένα και τα DC εξαρτήματα. Το επιτοίχιο στήριγμα βρίσκεται στο πίσω μέρος του αντιστροφέα. Το μπροστινό διαμέρισμα είναι και πάλι χωρισμένο σε τρία μέρη. Ένα μέρος για τα ηλεκτρικά εξαρτήματα ισχύος, ένα κουτί για την σύνδεση των DC εξαρτημάτων και ένα κουτί AC για την σύνδεση και επικοινωνία. Το διαμέρισμα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μπορεί να μονωθεί με μία πλάκα αλουμινίου ώστε να έχει πιστοποιήσει από το πρότυπο IP65. Όπως και στην δεύτερη γενιά οι ημιαγωγοί αντικαθίστανται από σετ ενσωματωμένων ηλεκτρονικών ισχύος. Το DC κουτί σύνδεσης περιλαμβάνει τους DC συνδέσμους και τα εξαρτήματα ασφάλειας όπως το αλεξικέραυνο. Οι AC συνδέσεις και η οθόνη είναι μέρη του συνδετικού AC κουτιού. Τα κουτιά αυτά θωρακίζονται με την χρήση πλαστικού. Επιπλέον, τα κουτιά αυτά μπορούν να καλυφθούν και μια επιπλέον εσωτερική στρώση ώστε να είναι περισσότερο θωρακισμένα τα εξαρτήματα. Έτσι με αυτό τον τρόπο τα AC και DC κουτιά απομονώνονται από ηλεκτρικά εξαρτήματα ισχύος [18]. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.38 το κεντρικό εξάρτημα του αντιστροφέα είναι το (4) το οποίο περιέχει τα ηλεκτρονικά ισχύος τοποθετημένα σε μια συγκεκριμένη τοπολογία η οποία καθορίζεται ανάλογα με την εφαρμογή.

1.3.4.2 Τοπολογίες

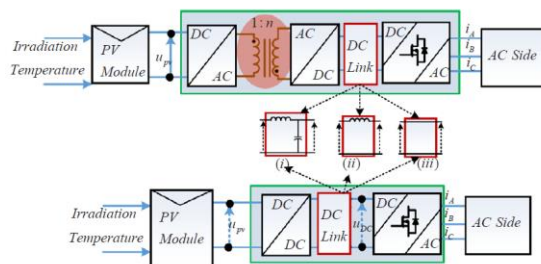
Δύο κύριες τοπολογίες θα αναλυθούν σε αυτή την εργασία: Οι τοπολογίες Multi-level Power Converters (MSPC) μαζί με τις υποκατηγορίες του και οι Single Stage Power Converters (SSPC) μαζί με τις υποκατηγορίες του. Στην Εικόνα 1.40 παρουσιάζονται οι MSPC τοπολογίες (A) μαζί με τις υποκατηγορίες τους οι οποίες είναι: i) DC-AC-DC-AC, ii) DC-AC-AC και iii) DC-DC-AC καθώς και οι SSPC τοπολογίες (B) [17].



Εικόνα 1.40 Τοπολογίες MSPC και SSPC

Ο αριθμός των σταδίων επεξεργασίας της ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα συγχωνεύεται ώστε να αποκομιστούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν την επιλογή του αντιστροφέα και αυτά είναι: η αύξηση της ενίσχυσης της τάσης, η απομόνωση των κυκλωμάτων στις υψηλές συχνότητες και το εύρος λειτουργίας. Οι MSPC τοπολογίες έχουν συνδεθεί με τις κατηγορίες των μη απομονωμένων DC-DC μετατροπέων ή αλλιώς απομονωμένων DC-DC που συμπεριλαμβανομένων των μετασχηματιστών υψηλών συχνοτήτων και DC-AC μετατροπέων. Οι τοπολογίες αυτές κατηγοριοποιούνται όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.41 σε i) DC-AC-DC-AC, ii) DC-AC-AC και iii) DC-DC-AC.

Στην DC-AC-DC-AC τοπολογία η DC τάση που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα σταθεροποιείται με την χρήση ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης ή High Frequency Transformer (HFT) που βασίζεται σε μετατροπέα DC-AC-AC όπου στο προηγούμενο στάδιο γίνεται η επιθυμητή ενίσχυση της τάσης. Στο τελευταίο στάδιο η DC τάση μετατρέπεται σε AC τάση. Στην πρώτη απομόνωση DC-DC ο μετατροπέας ο οποίος μπορεί να αποτελεί και μέρος ενός MPPT προσφέρει την απομόνωση των DC τάσεων. Για να επιτευχθεί αυτή χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι γεφυρών όπως οι πλήρεις γέφυρες, οι μισές γέφυρες και η διπλής ενέργειας γέφυρες οι οποίες βασίζονται στην απομόνωση που έχουν οι DC-DC μετατροπείς. Το κόστος και οι απώλειες αυτής της τοπολογίας είναι το υψηλό κόστος κατασκευής λόγω της μεγάλης επεξεργασίας που απαιτείται κατά την διάρκεια των πολλαπλών σταδίων και το πλήθος των εξαρτημάτων που απαιτείται για την κατασκευή αυτών. Η DC-AC-DC-AC με μερικές διαφοροποιήσεις στην σύνδεση DC-DC μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω στις 3 παρακάτω κατηγορίες: Στα Inductor Capacitor Circuit (LC) τύπου σύνδεσης πολλαπλών σταδίων, στα L τύπου DC συνδέσμου πολλαπλών σταδίων και στα ψευδο-DC συνδέσμου τοπολογίες που βρίσκονται ανάμεσα σε δυο στάδια οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 1.41 [17].



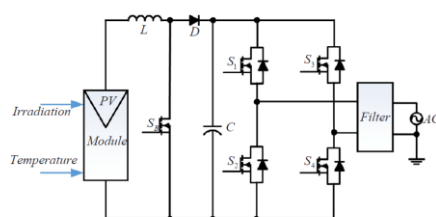
Εικόνα 1.41 Υποκατηγορίες Τοπολογίας DC-AC-DC-AC

Η τοπολογία LC τύπου σύνδεσης πολλαπλών σταδίων τοποθετείται ανάμεσα στον μετατροπέα DC-AC-DC και στα στάδια όπου λαμβάνει χώρα η αντιστροφή. Η παρουσία αυτής τοπολογίας ομαλοποιεί την DC τάση εισόδου στο τελευταίο στάδιο του αντιστροφέα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη και ποιοτικότερη ισχύ εξόδου σε σχέση με άλλες τοπολογίες DC σύνδεσης ενώ παράλληλα προσφέρει καλύτερη αποσύνδεση. Ωστόσο, το μειονέκτημα της είναι το υψηλό κόστος κατασκευής της και η χαμηλή αξιοπιστία που παρέχει. Η L τύπου τοπολογία παρουσιάζει μικρές αλλαγές στον σύνδεσμο DC. Η προηγούμενη τοπολογία αντικαθίσταται με την L τύπου DC συνδέσμου που απεικονίζεται στην εικόνα 1.41 στο (ii). Εξαιτίας αυτού του λόγου το τελευταίο στάδιο της λειτουργίας του αντιστροφέα τροποποιείται από πηγή τάσης σε πηγή ρεύματος. Έτσι δημιουργούνται μισά ημίτονα στο ενδιάμεσο πηνίο όπου με τον κατάλληλο έλεγχο των διακοπών ισχύος του απομονωμένου μετατροπέα DC-DC. Στην συνέχεια τα μισά ημίτονα μετατρέπονται σε πλήρη στο τελευταίο στάδιο του αντιστροφέα ενώ παράλληλα φιλτράρονται από ένα LC φίλτρο και στην συνέχεια τροφοδοτούν το δίκτυο ή τα φορτία που βρίσκονται συνδεδεμένα στον αντιστροφέα. Λόγω της χρήσης μικρότερου πυκνωτή DC σύνδεσης η τοπολογία αυτή παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και μικρότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με την πρώτη. Επιπλέον, προσφέρει μεγαλύτερη αποδοτικότητα επειδή η συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα είναι ίδια με την συχνότητα του δικτύου. Το μειονέκτημα της είναι ότι η αποσύνδεση γίνεται σε χαμηλότερες τιμές ισχύος σε σχέση με την πρώτη. Η τοπολογία ψευδό-DC σύνδεσης πολλαπλών σταδίων αντικαθιστά την DC σύνδεση με ένα ψευδό DC σύνδεσμο. Η μη ύπαρξη DC εξαρτημάτων σε αυτή την συνδεσμολογία μειώνει το κόστος, το μέγεθος και τον όγκο σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες. Ωστόσο, η απόδοση της είναι μειωμένη σε σχέση με τις άλλες δύο και δημιουργεί περισσότερες αρμονικές συχνότητες σε σχέση με τις άλλες. Συνοπτικά, η τοπολογία DC-AC-DC-AC λειτουργεί με την χρήση υψηλής συχνότητας DC-AC μετατροπέα στην είσοδο ο οποίος μετατρέπει την DC τάση εισόδου σε υψηλής συχνότητας AC τάση. Έπειτα αυτή η υψηλή συχνότητα αυξάνεται με την χρήση του HFT και μετατρέπεται ξανά σε DC τάση με την χρήση μιας γέφυρας ανόρθωσης. Τέλος ομαλοποιείται η DC τάση με την χρήση ενός DC συνδέσμου μετά την γέφυρα και η έξοδος του συνδέσμου DC καταλήγει στο τελευταίο στάδιο του αντιστροφέα το οποίο μετατρέπει την DC τάση σε AC. Στα MSPC συστήματα υπάρχουν μεγάλες απώλειες λόγω του πλήθους των σταδίων. Η χρήση soft διακοπών σε αυτά τα συστήματα βελτιώνει την αποδοτικότητα τους οι οποία είναι ιδιαίτερως σημαντική για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Για να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι διακόπτες δημιουργήθηκε η συντονισμένη τοπολογία DC-AC-DC-AC η οποία με την χρήση της συχνότητας διαμόρφωσης μπορεί να ελεγχθεί η έξοδος της αντίστασης των συντονισμένων αντιστροφέων από το μηδέν ως και το άπειρο. Η χρησιμότητα αυτής της ιδιότητας είναι ο συντονισμός με τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς την χρήση αντιστάσεων σε σειρά ή την χρήση ασφαλειών πάνω στο φορτίο. Οι συντονισμένοι μετατροπείς εφαρμόζονται κατά κόρων σε PWM απομονωμένους DC-DC μετατροπείς σε φωτοβολταϊκές μετατροπές. Ανάμεσα στους συντονισμένους μετατροπείς ο σειριακός μετατροπέας έχει υψηλή αποδοτικότητα

αλλά υστερεί στον έλεγχο της τάσης εξόδου. Το πρόβλημα που προκύπτει από τα φορτία λύνεται με την χρήση του παράλληλα συντονισμένου μετατροπέα ο οποίος διαχειρίζεται μεγαλύτερα πόσα ενέργειας άρα έχει και υψηλότερη αποδοτικότητα. Ο συνδυασμός παράλληλης και εν σειρά σύνδεσης δημιουργεί έναν νέο μετατροπέα τον σειρά-παράλληλα ο οποίος διατηρεί τα πλεονεκτήματα των δυο διαφορετικών συνδεσμολογιών στην μικρή ισχύ που καταναλώνει και την μειωμένη ευαισθησία στα φορτία. Ωστόσο, για να επιτύχει την απαιτούμενη τάση πρέπει να την ενισχύσει περισσότερο το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την λειτουργία του κυκλώματος σε υψηλότερες συχνότητες οι οποίες μειώνουν την αποδοτικότητά τους.

Η DC-AC-AC τοπολογία διαφέρει από την προηγούμενη τοπολογία επειδή στο DC-AC-AC μέρος των προηγούμενων τοπολογιών αντικαθίσταται ο μετατροπέας AC-AC υψηλών συχνοτήτων από ένα AC μετατροπέα ο οποίος λειτουργεί στην συχνότητα του δικτύου. Αρχικά, η παραγόμενη DC τάση των φωτοβολταϊκών μετατρέπεται σε υψηλής συχνότητας AC τάση και στην συνέχεια διέρχεται από έναν μετασχηματιστή υψηλών συχνοτήτων για την εξισορρόπηση της τάσης. Η έξοδος του HFT κατευθύνεται σε έναν μετατροπέα AC-AC ώστε το σήμα υψηλής συχνότητας να μετατραπεί σε AC τάση με συχνότητα όμοια του δικτύου. Η ύπαρξη αυτής της διαδικασίας απαλείφει την χρήση του DC συνδέσμου που περιλαμβάνονταν στις προηγούμενες τοπολογίες το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της αξιοπιστίας. Παράλληλα, ο αριθμός των σταδίων μεταξύ φορτίου και πηγής μειώνεται το οποίο συνεπάγεται με την αύξηση της αποδοτικότητας. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι κακή αποσύνδεση ισχύος που παρουσιάζει καθώς και η χαμηλή ποιότητα της ισχύος εξόδου. Οι ομοιότητες που εμφανίζει με τις παραπάνω τοπολογίες είναι η χρήση ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και η παροχή ηλεκτρικής απομόνωσης ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό σύστημα και στο φορτίο το οποίο έχει ως αποτέλεσμα υψηλή ενίσχυση του συστήματος και την ανθεκτικότητα αυτού σε βλάβες. Επίσης, η χρήση του αντιστροφέα στην συχνότητα του δικτύου μειώνει τις ενεργειακές απώλειες που μπορεί να προκύψουν από την σύνδεση στο δίκτυο ή την τροφοδοσία των φορτίων. Τέλος, τα συστήματα MSPC για να υλοποιηθούν χρησιμοποιούν αρκετά εξαρτήματα καθιστώντας τα έτσι ακριβά και χαμηλής αποδοτικότητας.

Η τοπολογία DC-DC-AC ονομάζεται αλλιώς μετατροπή ενέργειας με την χρήση δυο σταδίων (TSPC) και είναι πιο ευρέως χρησιμοποιημένη στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Για να βελτιωθεί ο σχεδιασμός, το κέδρος της τάσης όπως και η συλλογή ενέργειας. Η δομή της τοπολογίας αυτής είναι η εξής: Ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά πάνελ και στον αντιστροφέα τοποθετείται ένας μετατροπέας DC-DC. Έπειτα, η μετατροπή της ενέργειας είναι απομονωμένη σε αυτή την μέθοδο και ο μη απομονωμένος μετατροπέας DC-DC που περιλαμβάνουν οι παραπάνω μέθοδοι αντικαθίστανται από buck boost, boost και Cuk μετατροπείς. Ένας μετατροπέας DC-DC τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα που υλοποιείται από μισή ή ολόκληρη γέφυρα στην Εικόνα 1.42 απεικονίζεται η συμβατική τοπολογία ενός TSPC συστήματος [18].



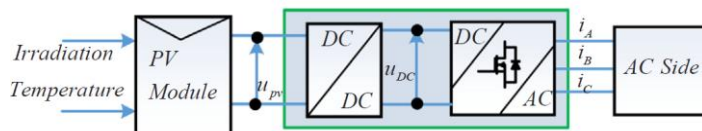
Εικόνα 1.42 Τοπολογία DC-DC-AC

Στην περίπτωση της ημί-γέφυρας ο σύνδεσμος DC αναπτύσσεται με την χρήση δυο πυκνωτών οι οποίοι έχουν ίδια τιμή οι οποίοι λειτουργούν ως DC γεννήτρια τριών ακροδεκτών που τροφοδοτούν την ημί-γέφυρα η οποία μετατρέπει την DC τάση σε AC. Στην συνέχεια η AC τάση διέρχεται από ένα φίλτρο προτού φτάσει στα φορτία. Σε αυτή την περίπτωση η μισή τάση του μετατροπέα boost ισούται με την μέγιστη τιμή της AC τάσης. Στα συστήματα FBI TSPC η πλήρης έξοδο του μετατροπέα boost ισούται με την υψηλότερη τιμή της τάσης που έχει μετατραπεί σε AC. Έτσι συγκρίνοντας τα FBI συστήματα με τα Half Bridge Inverter (HBI) παρατηρείται ότι τα πρώτα έχουν μεγαλύτερη τάση εξόδου και η υψηλότερη αντεστραμμένη τάση είναι ακριβώς η μισή. Για αυτό τον λόγο προτείνονται τα FBI από τα HBI για τα TSPC συστήματα που έχουν όμοια χαρακτηριστικά. Παρομοίως το σύστημα boost αντικαθίσταται από buck and boost. Το νέο σύστημα που προτείνεται είναι με την χρήση μη απομονωμένου buck and boost μετατροπέα DC-DC με περιορισμό της DC τάσης στα 100V ώστε να τηρείται το πρωτόκολλο ασφαλείας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ανόρθωση της DC τάσης πραγματοποιείται στο πρώτο στάδιο του buck-boost μετατροπέα και έπειτα η τάση εξόδου buck-boost μεταβαίνει στο τελευταίο στάδιο του μετατροπέα. Η τοπολογία αυτή φαίνεται ότι είναι απλή ως προς την υλοποίηση της αλλά ο ρυθμός μετατροπής της τάσης και το εύρος των τιμών της DC τάσης είναι περιορισμένο. Επιπλέον, η συνδεσμολογία της τοπολογίας αυτής απαιτεί τον διπλάσιο αριθμό ημιαγωγών από ότι η συμβατική μη απομονωμένος buck-boost DC-DC μετατροπέας. Για την λύση αυτού του προβλήματος προτάθηκε η χρήση ανορθωτή DC στο πρώτο στάδιο και έπειτα αντιστροφή της μισής κυματομορφής. Λόγω όμως της χρήσης του HFT και του μισού ανορθωμένου σήματος DC τα συστήματα αυτά δεν έχουν μεγάλη αντοχή στην ισχύ. Τέλος, προτείνεται η χρήση ενός buck-boost αντιστροφέα με την αφαίρεση του HFT αλλά περιλαμβάνοντας όμως την επέκταση της DC λειτουργίας προσθέτοντας έναν μεσαίο πυκνωτή στον βρόχο φόρτισης. Σε αυτό το σύστημα διευρύνεται η τάση εξόδου αλλά λόγω της πολυπλοκότητας της λειτουργίας και τον μεγάλο αριθμό διακοπών μειώνεται αρκετά η αποδοτικότητα του.

Στα παραπάνω συστήματα παρατηρείται ότι κάποια από αυτά έχουν ενεργή απόζευξη ενώ κάποια άλλα όχι. Η ενεργή απόζευξη χρησιμοποιείται όταν η στιγμιαία ισχύ που εκπέμπεται με την διπλάσια συχνότητα εισόδου η οποία δημιουργεί διπλό κυματισμό στην DC τάση. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων η ύπαρξη του κυματισμού αυτού μειώνει την αποδοτικότητα της μετατροπής της παραγόμενης DC τάσης εφόσον δε υπάρχει κάποιος μετατροπέας που μπορεί να απομονώσει το σύστημα από τα φορτία που τροφοδοτεί. Συνεπώς οι αντιστροφείς χρησιμοποιούν φίλτρα ώστε να επιτυγχάνουν μια ομαλή DC τάση και ένταση. Η χρήση ενός απομονωμένου buck-boost αντιστροφέα με την χρήση ενός μεσαίου πυκνωτή που ακολουθείται από έναν γρήγορο αντιστροφέα για την λύση αυτού του προβλήματος. Η ενέργεια που παράγεται στο στάδιο buck-boost αποθηκεύεται στον ενδιάμεσο πυκνωτή. Η τάση του ενδιάμεσου πυκνωτή αποτελείται από δύο μέρη: Το DC κομμάτι και το AC κομμάτι το οποίο βρίσκεται στην διπλάσια συχνότητα από ότι αυτή του φορτίου. Η αποθηκευμένη ενέργεια που έχει ο ενδιάμεσος πυκνωτής επεξεργάζεται από τον γρήγορο αντιστροφέα που βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο και μετά μεταβαίνει σε ένα LC φίλτρο και έπειτα μεταβαίνει στο δίκτυο ή στα φορτία που τροφοδοτεί. Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω τοπολογίες είναι hard οι οποίοι προκαλούν μεγάλες απώλειες και για την μείωση αυτών χρησιμοποιούνται διακόπτες συντονισμένης τεχνολογίας. Τέλος υπάρχουν και οι αντιστροφείς χωρίς την χρήση μετασχηματιστή ή αλλιώς TSPCS στις οποίες οι τοπολογίες λύνουν το πρόβλημα της διπλής γείωσης μεταξύ υψηλής και μεσαίας τάσης. Η τοπολογία με την χρήση διόδου έχει αρκετές παραλλαγές όπως η διακοπτική διάταξη. Η διάταξη αυτή η μισή τάση εξόδου του boost μετατροπέα φτάνει στην μέγιστη ισχύ της AC τάσης εξόδου. Άλλη μια τοπολογία

τέτοιου τύπου υλοποιείται με την χρήση δύο ξεχωριστών boost μετατροπέων οι οποίοι τροφοδοτούν έναν αντιστροφέα Diode Clamp Multilevel Inverter (DCMLI). Τέλος η τοπολογία αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση δίοδων η οποία μπορεί να αντικατασταθεί από άλλες τοπολογίες όπως με την χρήση πυκνωτών σφικτήρων, με αλληλουχίες ημί-γεφυρών ή ακόμα και με πολλαπλούς μετατροπείς πολλών επιπέδων. Οι δυο πιο σημαντικές υποκατηγορίες των TSPCS συστημάτων είναι: Η συνεχής μετατροπείς DC-DC που τροφοδοτούν έναν PWM αντιστροφέα και τα ανορθωμένα DC που τροφοδοτούν το δίκτυο με τον αντιστροφέα. Η πρώτη τοπολογία η συμβατή με τα φωτοβολταϊκά συστήματα και χρησιμοποιείται αρκετά ενώ η δεύτερη τοπολογία λειτουργεί με την χρήση του ανορθωμένου DC σήματος το οποίο παράγεται στην έξοδο του μετατροπέα DC-DC με την χρήση των κατάλληλων εξαρτημάτων. Έτσι, αντικαθίσταται ο αντιστροφέας υψηλής συχνότητας το οποίο μεταφράζεται σε βελτίωση της αποδοτικότητας του και μείωση των απωλειών που προέρχονται από του διακόπτες. Το μειονέκτημα των παραπάνω τοπολογιών είναι η εφαρμογή του μετατροπέα DC-DC μισού ημιτόνου ο οποίος εμφανίζει δυσκολίες στον σχεδιασμό τους επειδή ο μετατροπέας αυτός λαμβάνει την μέγιστη τιμή ισχύος και όχι την μέση και η δημιουργία συστημάτων ελέγχου του είναι αρκετά δύσκολη. Επιλογικά, η τοπολογία των συστημάτων TSPCS παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.43 καθώς και τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν είναι:

- Αποτελούνται από μεγάλο πλήθος εξαρτημάτων
- Παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες σε σχέση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν μετασχηματιστή
- Είναι ογκωθείς
- Το κόστος κατασκευής τους είναι υψηλό και έχουν μεγάλο βάρος [16]



Εικόνα 1.43 Τοπολογία TSPCS Συστημάτων

Για την λύση των παραπάνω μειονεκτημάτων προτείνεται η λύση τοπολογιών μονού σταδίου ή αλλιώς SSPC. Οι αντιστροφείς μονού σταδίου χρησιμοποιούνται όταν η παραγόμενη DC τάση του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι αρκετά μεγάλη ώστε παύει να είναι απαραίτητη η χρήση DC-DC μετατροπέα και μετασχηματιστή για την ενίσχυση της. Έπειτα, οι τοπολογίες αυτές μπορούν να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος όπως η λειτουργία ενός MPPT, του αντιστροφέα και την ύπαρξη ενός συστήματος ενίσχυσης της DC τάσης. Έτσι με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά οι αντιστροφείς μονού σταδίου κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες: Τους αντιστροφείς μονού σταδίου που υποβιβάζουν και ενισχύουν την τάση. Η τοπολογία μονού σταδίου υποβιβασμού της τάσης είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη γενιά αντιστροφέων στην δεκαετία του 80 και σχεδιάστηκαν με γνώμονα την ηλεκτροκίνηση. Αργότερα, υλοποιήθηκαν οι αυτομεταλλασσόμενοι αντιστροφείς οι οποίοι δημιουργήθηκαν για την χρήση στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το κόστος τους είναι μικρό, έχει μικρότερες απώλειες, είναι αρκετά ανθεκτικός αλλά για να υλοποιηθεί χρησιμοποιεί υψηλή DC τάση σύνδεσης. Για να υλοποιηθεί αυτή η υψηλή DC τάση σύνδεσης χρησιμοποιούνται κλασσικοί μετασχηματιστές με την χρήση του Full Bridge Inverter (FBI) παράλληλα με υψηλές συχνότητες το οποίο όμως οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας. Παρόλο που εμφανίζεται αυτό το μειονέκτημα η τοπολογία παραμένει αρκετά

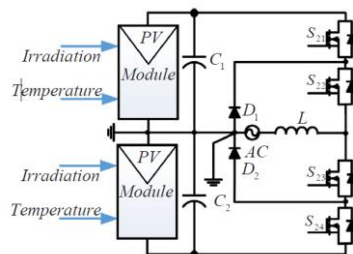
καλή λόγω της ευρωστίας της, του χαμηλού κόστους κατασκευής και της γνώσης που υπάρχει πάνω σε αυτή την τεχνολογία. Επιπλέον, προτιμάται από τις άλλες τοπολογίες όταν επιτυγχάνεται ο στόχος της αποδοτικότητας στο σύστημα. Τέλος, τα μειονεκτήματα που εμφανίζει αυτή η τοπολογία είναι:

- Μειωμένη αποδοτικότητα
- Το ογκωθές μέγεθος της
- Υψηλό κόστος

Άλλη μια τοπολογία μονού σταδίου άξια αναφοράς είναι η buck-derived πολλαπλών επιπέδων. Όπως και με τον μετασχηματιστή πλήρης γέφυρας VSI, οι πολυεπίεδροι αντιστροφείς χρησιμοποιούν την τεχνολογία πτώσης τάσης. Αυτό το είδος αντιστροφών αποτελεί ίσως την καλύτερη επιλογή για τα φωτοβολταϊκά συστήματα υψηλής και μεσαίας ισχύος. Στην Εικόνα 1.44 απεικονίζεται η τεχνολογία DCMLI η οποία αντικαθίσταται από άλλες τοπολογίες πολλαπλού επιπέδου όπως με την χρήση ενός συνδεδεμένου πυκνωτή, συνεχών ημί-γέφυρών και πολυεπίεδρων αντιστροφών. Η σύγκριση μεταξύ των συμβατικών δυο επιπέδων αντιστροφών με τους πολυεπίεδρους αντιστροφείς είναι ότι οι τελευταίοι παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Έχουν μικρότερη παράγωγο $\frac{dV}{dt}$
- Μικρότερη αλλοίωση της τάσης εισόδου
- Υψηλές συχνότητες αλλαγής
- Μειωμένη αλλοίωση στις αρμονικές
- Λιγότερα σημεία κοινής τάσης

Η τοπολογία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 1.44 και παρατηρείται ότι χρησιμοποιείται το κύκλωμα ελέγχου GCC το οποίο αποτελείται από δυο διακόπτες και ένα πηνίο.



Εικόνα 1.44 Τεχνολογία DCMLI

Η παραπάνω τοπολογία μπορεί να εντοπίσει αποτελεσματικά το MPP στο φωτοβολταϊκό σύστημα ακόμα και με την ύπαρξη έντονης σκιάς. Το μειονέκτημα που εμφανίζει είναι ότι η χρήση της μισής γέφυρας προσδίδει στοιχεία υποβιβασμού τάσης και για να μπορέσει το σύστημα να εντοπίσει το νέο MPP που έχει το σύστημα σε κατάσταση σκιάς χρειάζεται αύξηση στον αριθμό των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Μια ακόμα χρήσιμη τοπολογία είναι η υψηλής απόδοσης buck αντιστροφών μονού σταδίου. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της ημί-γέφυρας προσθέτοντας ακόμα δυο παράλληλους συνδεδεμένους διακόπτες και δύο διόδους. Η χρήση των δυο διακοπών γίνεται όταν υπάρχει απότομη άνοδος της τάσης η οποία αυξάνει την στιγμιαία την αποδοτικότητα του αντιστροφέα λόγω της της ροής ρεύματος που δεν καταλήγει στην είσοδο της DC σύνδεσης επειδή οι δύο πυκνωτές και οι διόδοι προστατεύουν το κύκλωμα από αυτό το φαινόμενο. Η αποτελεσματικότητα της τοπολογίας αυτής είναι πολύ υψηλή στο 98%. Τέλος, για να μειωθεί η DC

τάση εισόδου στα κυκλώματα μονού σταδίου μετατροπής ενέργειας προτείνονται νέες τοπολογίες όπως οι μονού σταδίου ενίσχυσης τάσης με την χρήση buck-boost, συντονισμένων κυκλωμάτων, επαγωγικών κυκλωμάτων και την χρήση τοπολογίας με έξι διακόπτες.

Οι τοπολογία μονού σταδίου ενίσχυσης τάσης με την χρήση buck-boost ομοιάζει με την τοπολογία TSPC. Τα συστήματα ενίσχυσης και υποβιβασμού μπορούν παράλληλα να ενισχύσουν και να λειτουργούν ως αντιστροφείς σε συστήματα μονού σταδίου ισχύος το οποίο εξυπηρετεί ιδιαίτερα τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όμοια με τους μετατροπείς DC-DC αυτοί οι αντιστροφείς χρησιμοποιούν πηνία ώστε να αποθηκεύσουν την παραγόμενη ενέργεια ή flyback μετασχηματιστές οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν την παραγόμενη και να απομονώσουν το φωτοβολταϊκό σύστημα από τα φορτία ή το δίκτυο. Οι περισσότερες τοπολογίες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία υλοποιούνται με τον συνδυασμό δύο απομονωμένων ή μη απομονωμένων μετατροπέων DC-DC με την είσοδο τους συνδεδεμένη και σε σειρά ενώ το φορτίο είναι συνδεδεμένο με διαφορική ή προσθετική μέθοδο. Για την βελτίωση αυτής της τοπολογίας προτείνεται η χρήση τεσσάρων διακοπών ενίσχυσης. Η τοπολογία αυτή χαρακτηρίζεται από τις εισόδους DC που συνδέονται με μετατροπέα διπλής ενίσχυσης σε παράλληλη σύνδεση με την πηγή τους και το φορτίο συνδέεται με το ίδιο τρόπο όπως στην παραπάνω μέθοδο με τις εξόδους των διπλών μετατροπέων ενίσχυσης. Ο κάθε μετατροπέας είναι διαμορφωμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει μια μονοπολική ημιτονοειδείς DC τάση με διαφορά φάσης 180° στο σήμα εξόδου. Ο σχεδιασμός της τοπολογίας αυτής αρχικά δεν προοριζόταν για την χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά βρέθηκε να έχει υψηλή απόδοση σε συστήματα που ήταν συνδεδεμένα με το δίκτυο. Υπάρχουν υψηλές απώλειες διακοπών λόγω της μεγάλης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που δημιουργούν οι σκληροί διακόπτες. Μια παραλλαγή της τοπολογίας αυτής υλοποιήθηκε με την είσοδο της ενίσχυσης και του υποβιβασμού συνδεδεμένες και δεμένες παράλληλα με την πηγή ενώ το φορτίο συνδεδεμένο διαφορικά. Η κύρια διαφορά με την προηγούμενη τοπολογία είναι ότι ο boost αντιστροφέας αντικαθίσταται με buck-boost αντιστροφείς. Η σύνδεση του φορτίου είναι ίδια με την προηγούμενη τοπολογία αλλά πλέον μπορεί να παραχθεί AC τάση εξόδου είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την DC τάση εξόδου. Επιπρόσθετα, μια νέα τοπολογία προτείνεται με την χρήση δύο flyback μετασχηματιστών σε μια κοινή πηγή και η συνδεσμολογία του φορτίου δεν αλλάζει. Σε αντίθεση με την προηγούμενη τοπολογία υπάρχουν δυο απομονωμένοι buck-boost μετατροπείς και HFT ο οποίος προσφέρει την απομόνωση του DC και AC μέρους. Η τελευταία τοπολογία για την υλοποίηση αντιστροφέων μονού σταδίου είναι η τοπολογία που χρησιμοποιεί έξι διακόπτες η οποία βασίζεται στο πρότυπο buck-boost μετατροπέα. Η υλοποίηση του είναι για περιορισμένο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ και δεν περιλαμβάνει διπλή γείωση. Ωστόσο, επειδή πάντα κάποιος από τους αγωγούς του φωτοβολταϊκού πάνελ θα είναι γειωμένος με την χρήση των διακοπών S_1 και S_4 . Η τοπολογία αυτή δεν περιέχει μετασχηματιστή είναι ενιαία και αυτό της προσδίδει πλεονέκτημα στις AC εφαρμογές. Έπειτα, προτείνεται ένας απομονωμένος buck-boost αντιστροφέας, ο οποίος αποτελείται από δυο συγχωνευμένους buck-boost αντιστροφείς σε μια ημί-γέφυρα με τέσσερις διακόπτες. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται επιπλέον δυο ακόμα διακόπτες για την ταυτόχρονη φόρτιση σε κάθε ημί περίοδο της εξόδου της AC τάσης. Τέλος, αυτή η τοπολογία προσφέρει απομόνωση ανάμεσα στο πάνελ και στο δίκτυο [18].

1.3.4.3 Χαρακτηριστικά

Οι αντιστροφείς όπως έχει προαναφερθεί επιλέγονται με βάση την εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά τα οποία έχουν οι αντιστροφείς είναι:

- Η συνδεσμολογία τους σε σχέση με το δίκτυο είτε είναι αυτόνομοι είτε συνδεδεμένοι
- Η παροχή απομόνωσης των εξαρτημάτων του φωτοβολταϊκού συστήματος με τα φορτία
- Η απόξευξη ισχύος
- Το πλήθος των σταδίων επεξεργασίας της ισχύος
- Η παροχή διπλής γείωσης
- Τα επίπεδα ενσωμάτωσης των εξαρτημάτων τους
- Η ικανότητα διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος
- Ο Αριθμός των εξαρτημάτων, το μέγεθος και ο όγκος του αντιστροφέα
- Το εύρος τάσης λειτουργίας
- Οι απώλειες και η ψύξη του συστήματος

Όταν οι αντιστροφείς βρίσκονται συνδεδεμένοι στο δίκτυο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από αυτούς που είναι εγκατεστημένοι σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα όπως στα φορτία, στην ροή της ισχύος και της κατεύθυνσης αυτής. Γενικότερα, η ροή της ισχύος στα συστήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο δεν αποτελεί παράγοντα ο οποίος λαμβάνεται υπ' όψιν επειδή το ρεύμα κατευθύνεται πάντα προς το δίκτυο και υπάρχει προστασία από την επιστροφή του ρεύματος. Από την άλλη πλευρά το φαινόμενο της αντιστροφής του ρεύματος από τα ενεργά φορτία όπως οι γεννήτριες ρεύματος ή γενικά φορτία που απαιτούν υψηλό ρεύμα εκκίνησης πρέπει να προσδιοριστεί η κατεύθυνση και να κατασκευαστεί ένα σύστημα προστασίας από το φαινόμενο αυτό. Η προτεινόμενη λύση είναι η χρήση ενός αντιστροφέα ο οποίος θα έχει είτε διόδους ανατροφοδότησεως είτε διπολικούς ενεργούς διακόπτες προς αποφυγή αυτού του φαινομένου. Οι ελεγχόμενοι αμφίδρομοι αντιστροφείς είναι αποτελεσματικοί όταν βρίσκονται συνδεδεμένοι με ένα φορτίο το οποίο δεν είναι διαθέσιμο από την πηγή DG και ταυτόχρονα οι μπαταρίες του συστήματος είναι άδειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις το δίκτυο φορτίζει τις μπαταρίες διακόπτοντας έτσι την συμβατική ροή ισχύος.

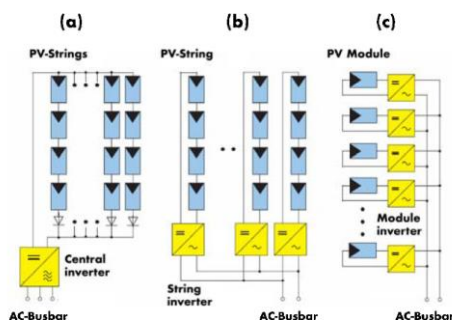
Η απομόνωση και η ασφάλεια απαιτείται σε όλα τα ηλεκτρικά συστήματα. Ειδικά στους αντιστροφείς η International Electrotechnical Commission (IEC) είναι εκείνη η οποία ορίζει το πρωτόκολλο ασφαλής λειτουργίας των ηλιακών αντιστροφέων. Η επιτροπή αυτή ορίζει τις ελάχιστες προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να καλύπτονται από τους κατασκευαστές στην σχεδίαση και την κατασκευή των αντιστροφέων όπως: στην προστασία από ηλεκτροπληξία του χρήστη, από μηχανολογικού τύπου βλάβες, την προστασία από την πυρκαγιά και από άλλους παράγοντες. Επίσης, παρέχονται οι γενικοί κανόνες που διέπουν την λειτουργία όλων των αντιστροφέων που προορίζονται για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Η γαλβανικής απομόνωσης αντιστροφείς προσφέρουν καλύτερη ασφάλεια από ότι τα συστήματα που δεν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή καθώς αυτού του τύπου η συνδεσμολογία δεν συνδέει άμεσα την πηγή με τα φορτία του συστήματος. Επιτρέπουν στην DC πλευρά δηλαδή στα φωτοβολταϊκά πάνελ και στην AC πλευρά δηλαδή στα φορτία του συστήματος και στο δίκτυο να γειωθούν ξεχωριστά το ένα από το άλλο.

Τέλος, πάντα τα μεταλλικά μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να γειώνονται για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας και πρέπει να μην γειώνονται ποτέ μαζί DC αρνητικά ή θετικά καλώδια με αντιστροφέα ο οποίος δεν διαθέτει μετασχηματιστή.

Η απόζευξη της ισχύος είναι απαραίτητη ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στο δίκτυο ή τα φορτία του συστήματος ειδικά όταν η παραγόμενη ισχύς εισέρχεται απευθείας στους αντιστροφείς από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή τα πάνελ επιθυμείτε να βρίσκονται πάντα στο μέγιστο σημείο ισχύος ενώ το δίκτυο ή ένας μονοφασικός αντιστροφέας απαιτεί να δέχεται ως είσοδο ένα πλήρως ανορθωμένο ημίτονο με διπλάσια συχνότητα από αυτή του δικτύου καθώς και η ροή της ισχύος να είναι συνεχής. Για αυτό τον λόγο οι περισσότερες τοπολογίες χρησιμοποιούν πυκνωτές χωρητικότητας 100μF για να επιτευχθεί η αποσύνδεση τοποθετείται στην είσοδο του αντιστροφέα. Όμως, αυτοί οι πυκνωτές παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα αξιοπιστίας, το μεγάλο μέγεθος τους και την μικρή διάρκεια ζωής τους. Στην περίπτωση των αντιστροφέων πολλαπλών σταδίου τοποθετείται ένας πυκνωτής DC σύνδεσης ανάμεσα στο πρώτο και το τελευταίο στάδιο του αντιστροφέα για να επιτευχθεί η αποσύνδεση. Τέλος, την καλύτερη απόζευξη ισχύος εμφανίζουν τα συστήματα δύο σταδίων και έπειτα ακολουθούν τα συστήματα μονού σταδίου στα οποία για να επιτευχθεί απόζευξη τοποθετείται ένας πυκνωτής με υψηλή συχνότητα εισόδου. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει το πλήθος των σταδίων επεξεργασίας της ισχύος. Οι μονού σταδίου buck-boost αντιστροφείς έχουν ένα μοναδικό χαρακτηριστικό το οποίο είναι η μη ύπαρξη μετασχηματιστή στην συχνότητα του δικτύου λόγω του εσωτερικού boost συχνοτήτων. Συνεπώς είναι πιο συμπαγής με καλύτερο λόγο απόδοσης-κόστος όταν συγκρίνονται με τους αντίστοιχους μετατροπείς DC-DC που έχουν είτε συμβατικούς PWM αντιστροφείς ή ακόμα και PWM αντιστροφείς που βρίσκονται στην συχνότητα του δικτύου. Η υστέρηση που εμφανίζουν οι μονού σταδίου αντιστροφείς είναι ο περιορισμός στην διαχείριση της ισχύος και στο μικρό εύρος λειτουργίας DC τάσης. Για να ενισχυθεί η διαχείριση της χωρητικότητας πρέπει οι κεντρικοί διακόπτες ισχύος να υποστούν μεγάλη πίεση το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την χρήση αντιστροφέα με πολλαπλού σταδίου τοπολογίες όταν τα συστήματα έχουν υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και επιθυμείτε υψηλή απόδοση. Επίσης, οι πολλαπλού σταδίου τοπολογίες έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας το οποίο τους καθιστά αποδοτικούς κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Ο μεγάλος αριθμός σταδίων μειώνει τις απαιτήσεις του ελεγκτή το οποίο σημαίνει ότι η διαδικασία εύρεσης του MPP διεξάγεται στο πρώτο στάδιο ενώ η αντιστροφή, ο έλεγχος της ισχύος, η ενίσχυση της τάσης και η αλληλεπίδραση του δικτύου διεξάγεται στα επόμενα στάδια. Το μειονέκτημα των πολλών σταδίων είναι η αύξηση στο κόστος κατασκευής και τον όγκο των αντιστροφέων ενώ το πλεονέκτημα του μονού σταδίου είναι ότι είναι συμπαγής και εμφανίζουν μικρότερες απώλειες.

Η ύπαρξη της διπλής γείωσης είναι απαραίτητη διότι προστατεύει τόσο το σύστημα όσο και τον χρήστη από τα φαινόμενα της ηλεκτροπληξίας, της πυρκαγιάς καθώς και από τις μηχανικές βλάβες που μπορούν να εμφανιστούν στο σύστημα. Επίσης, αυξάνει την ασφάλεια του συστήματος μειώνοντας την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη, παρέχεται προστασία από τους κεραυνούς και από τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Όταν η DC τάση των φωτοβολταϊκών πάνελ υπερβαίνει τα 50V τότε πρέπει να γειωθούν ξεχωριστά τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ. Γενικότερα στα μονοφασικά φωτοβολταϊκά συστήματα υπάρχει πάντα γείωση στον ουδέτερο. Τέλος, τοπολογίες οι οποίες προσφέρουν απομόνωση από το δίκτυο δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη διπλής γείωσης ενώ οι τοπολογίες που δεν είναι απομονωμένες δεν μπορούν να συνδεσμοποιηθούν με την χρήση της διπλής γείωσης.

Επιπλέον, η ικανότητα διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος αποτελεί ένα χαρακτηριστικό των αντιστροφών. Όπως είναι γνωστό τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να συνδεσμοποιηθούν με διάφορες τοπολογίες. Στην Εικόνα 1.45 διακρίνονται οι τρεις βασικές τοπολογίες και τα είδη των προαναφερθέντων κατηγοριών τα οποία είναι: Κεντρική, string και multi-string [17].



Εικόνα 1.45 Συνδεσμολογία Φωτοβολταϊκών πάνελ με Αντιστροφείς

Η (α) συνδεσμολογία είναι μια τυπική συνδεσμολογία κατά την οποία τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν συνδεσμολογία σε σειρά αλλά και παράλληλα. Ονομάζεται κεντρική διότι ένας κεντρικός αντιστροφέας συνδέεται στην DC πλευρά όλων των ηλιακών πάνελ. Όταν υπάρχει εγκατεστημένη ισχύ άνω των 250KWp μέχρι μερικά Mwp χρησιμοποιείται αυτού του είδους η συνδεσμολογία. Στο (b) υπάρχει ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πάνελ τα οποία είναι χωρισμένα σε διάφορες ομάδες και συνδεδεμένα σε σειρά ονομάζονται string. Κάθε string έχει συνδεδεμένο έναν ξεχωριστό αντιστροφέα που εξυπηρετεί εκείνο και έπειτα ο αντιστροφέας συνδέεται με τους υπόλοιπους string αντιστροφείς. Η χρήση πολλαπλών string αντιστροφών προσφέρει την βέλτιστη δυνατή σύνδεση αρκετών σετ σε έναν αντιστροφέα. Η DC έξοδος κάθε string οριοθετείται από έναν μετατροπέα DC-DC. Παράλληλα, αυτές οι έξοδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους σε έναν αντιστροφέα DC-AC. Η τυπική ισχύς ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να φτάσει μέχρι τα 5kW. Αυτοί οι αντιστροφείς και οι επόμενες γενιές αυτών χρησιμοποιούνται σε κατοικίες οι οποίες βρίσκονται στο δίκτυο μέσης ισχύος το οποίο κυμαίνεται στα 250kW. Στο (c) περιγράφεται μια συνδεσμολογία πάνελ και αντιστροφών σε μορφή multi-string. Σε αυτή χρησιμοποιούνται μικροί αντιστροφείς σε κάθε ομάδα πάνελ και ονομαστική ισχύ αυτών των αντιστροφών δεν ξεπερνά το 1 KW. Ο συμπαγής σχεδιασμός, το μικρότερο μέγεθος αλλά και βάρος των αντιστροφών αποτελούν τα κύρια κριτήρια κατά την αγορά τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιδιώκεται η μείωση των παθητικών ηλεκτρονικών και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ισχύος το οποίο οδηγεί στην μείωση βάρους και κόστους. Γενικά οι τοπολογίες μονού σταδίου έχουν λιγότερα εξαρτήματα, βάρος και μέγεθος σε σχέση με αυτά των δύο σταδίων. Τα συστήματα τα οποία έχουν εύρη στάδιο λειτουργίας προτιμώνται όταν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στις περιβαλλοντολογικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας όπως είναι η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ύπαρξης σκιάς. Γενικά οι τοπολογίες πολλαπλών σταδίων προσφέρουν μεγάλο εύρος στην τάση λειτουργίας τους. Οι τοπολογίες οι οποίες έχουν μεγάλο κέρδος μπορούν να παρουσιάζουν την ίδια ιδιότητα το οποίο όταν χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα με χαμηλότερο εύρος τάσης προσφέρει καλύτερη ασφάλεια και μικρότερες διαρροές ρεύματος. Τέλος, οι απώλειες που δημιουργούνται από την θερμότητα που αναπτύσσεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος καθώς οι διακοπτικές απώλειες και οι παρασιτικές απώλειες των παθητικών εξαρτημάτων αποτελούν απώλειες του αντιστροφέα.

1.4 Συνδεσμολογία Συστήματος

Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι υπολογισμοί όλων των εξαρτημάτων του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται το μέγεθος των καλωδίων και τα ασφαλιστικά τα οποία χρειάζονται ώστε να λειτουργήσει το σύστημα με ασφάλεια. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και δημιουργούνται δύο string στα οποία χρησιμοποιείται καλώδιο με διατομή 6 mm^2 το οποίο οδηγείται σε έναν διακόπτη 32 A και σε μια ασφάλεια 25 A ώστε αν υπάρξει κάποια διαρροή ρεύματος από το πάνελ να μην επεκταθεί προς το υπόλοιπο σύστημα. Επίσης, τα πάνελ πρέπει να γειωθούν για να προστατευτούν από πιθανό βραχυκύκλωμα και από τους κεραυνούς. Για τον υπολογισμό του καλωδίου χρησιμοποιείται η σχέση 1.3.15 από την οποία προκύπτει ότι το ρεύμα που διαρρέει το καλώδιο είναι 83,89 A. Από αυτή την σχέση προκύπτει για την σύνθεση των πάνελ με το σύστημα μπαταριών απαιτείται η χρήση καλωδίων με διατομή 25 mm^2 ή εναλλακτικά χρησιμοποιείται πολύκλωνο καλώδιο διατομής 16 mm^2 .

$$I_{cab} = I_{rcc} = I_{sc}^M \times N_{pm} \times F_{safe} \quad (1.3.15)$$

Για το καλώδιο σύνθεσης των μπαταριών μεταξύ τους χρησιμοποιείται καλωδίου διατομής 16 mm^2 το οποίο υπολογίζεται από την σχέση 1.3.16 όπου το ρεύμα ισούται με 65 A και το P_i είναι ίσο με 10000 W:

$$C_{bat} = \frac{P_{inv}}{I_{mpp} \times 3} \quad (1.3.16)$$

Τέλος, ο αντιστροφέας συνδέεται με τον πίνακα της οικίας με καλώδιο διατομής που υπολογίζεται από την σχέση 1.3.17:

$$I_{oi} = \frac{P_i}{V_{oi} \times pf} \quad (1.3.17)$$

Το I_{oi} είναι το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα, η τάση έξοδου του αντιστροφέα που ισούται με 240V και ο συντελεστής ισχύος ισούται με pf 0,8. Ο συντελεστής ισχύος pf χρησιμοποιείται για την μέτρηση της αποτελεσματικότητας των ηλεκτρολογικών συστημάτων. Όταν ο συντελεστής αυτός είναι μικρότερος από το 1 όπως στην περίπτωση αυτή σημαίνει ότι οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος δεν είναι στην ίδια φάση. Το I_{oi} ισούται με 34,78 A και για αυτό χρησιμοποιείται καλώδιο πολύκλωνο τριών αγωγών διατομής 3x4 [19].

1.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν και περιεγράφηκαν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς και οι αλλαγές στις ενεργειακές συνήθειες που πρέπει να κάνουν οι χρήστες τους ώστε να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος που χρησιμοποιούν. Έπειτα, παρατέθηκε το κανονιστικό πλαίσιο και το κόστος που απαιτείται να ακολουθήσει ο χρήστης ώστε να κατασκευαστεί το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Επιπλέον, αναλυθήκαν τα μέρη του συστήματος ώστε στο επόμενο κεφάλαιο να επιλεχθούν τα πιο σύγχρονα, οικονομικά και αποτελεσματικά μέρη από την κάθε κατηγορία. Από την ποικιλία των τύπων των φωτοβολταϊκών πάνελ, ο τύπος των μονοκρυσταλλικών αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη οικονομικά και αποδοτικά επιλογή. Όσον αφορά για την επιλογή ελεγκτή φόρτισης χρησιμοποιείται η πιο πρόσφατη και αποδοτική τεχνολογία για την μεγιστοποίηση και βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από της ηλιακές ακτίνες. Στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας επιλέγεται με βάση την έρευνα που διεξήχθητε σε αυτό το κεφάλαιο η τεχνολογία LFP διότι έχει μικρότερο κόστος συντήρησης σε σύγκριση με τις μπαταρίες τύπου Lead Acid και μεγαλύτερο κύκλο φορτίσεων αποφορτίσεων. Στους αντιστροφείς έπειτα από μια εμπειριστατωμένη αναδρομή στα είδη και στις τεχνολογίες που υπάρχουν αποφασίστηκε η χρήση αντιστροφέα τρίτης γενιάς buck and boost λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας που εμφανίζεται σε αυτή την γενιά. Τέλος, στο επίπεδο της καλωδίωσης η επιλογές των καλωδίων και των ασφαλιστικών λήφθηκαν με γνώμονα την πιθανή επεκτασιμότητα του συστήματος καθώς και την μεγιστοποίηση της ασφάλειας τόσο του χρήστη όσο και του συστήματος. Τέλος, στο μέρος του νομικού πλαισίου παρατηρείται έλλειμα ειδικής νομοθετικής πρόβλεψης όσον αφορά την διαδικασία εγκατάστασης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

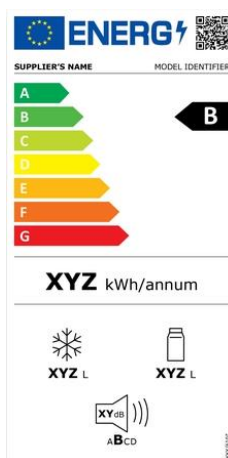
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Σχεδιασμός και Τεχνικοοικονομική Μελέτη

Σε αυτό το κεφάλαιο υπολογίζονται οι ημερήσιες καταναλώσεις μιας οικίας και στην συνέχεια με βάση αυτές υπολογίζονται και αναλύονται τα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος τα οποία είναι: Τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ελεγκτές φόρτισης των μπαταριών, οι μπαταρίες, ο αντιστροφέας, η καλωδίωση του συστήματος καθώς και την επαλήθευση τους μέσω του εργαλείου υπολογισμού PVGIS. Τέλος, πραγματοποιείται η οικονομική μελέτη του παρόντος συστήματος που περιλαμβάνει το κόστος κατασκευής, το συνολικό κόστος των μερών, τον χρόνο απόσβεσης του καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από το κεφάλαιο αυτό.

2.1 Υπολογισμός Καταναλώσεων Οικίας

Για τον σχεδιασμό του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζονται οι ημερήσιες καταναλώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος της οικίας ώστε να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της ισχύος των φωτοβολταϊκών πάνελ. Η ενέργεια που καταναλώνουν οι οικιακές συσκευές μετριέται σε Watt-hours (Wh) οι οποίες προκύπτουν από το γινόμενο της μέσης κατανάλωσης της συσκευής το οποίο μετριέται σε Watt επί των ωρών λειτουργίας αυτών. Η καταναλισκόμενη ισχύς της οικίας ή των οικιακών συσκευών μπορεί να εκτιμηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

- (i) τους ετήσιους λογαριασμούς του ηλεκτρικού ρεύματος όπου διαιρώντας με τις ημέρες κατανάλωσής βρίσκουμε την μέση ημερήσια συνολική κατανάλωση,
- (ii) με την μέτρηση της κατανάλωσης των συσκευών με την χρήση του βατόμετρου καθ' όλη την διάρκεια μίας ημέρας και την συλλογή αυτών σε έναν πίνακα ώστε να υπολογιστεί η συνολική ημερήσια κατανάλωση
- (iii) βρίσκοντας την ενεργειακή ετικέτα όλων των συσκευών όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1, όπου στο κέντρο της αναγράφεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας σε kWh, κάνοντας την ίδια διαδικασία όπως στην δεύτερη περίπτωση.



Εικόνα 2.1 Ενεργειακή ετικέτα συσκευής

Για τον υπολογισμό των καταναλώσεων σε αυτή την οικία δημιουργήθηκε ο πίνακας καταναλώσεων της στον οποίο καταγράφονται οι συσκευές, η μέση κατανάλωση, οι ώρες χρήσης,

η ημερήσια κατανάλωση κάθε συσκευής και η συνολική ημερήσια κατανάλωσή οποία είναι το άθροισμα των ημερήσιων καταναλώσεων των συσκευών.

Συσκευή	Αριθμός Συσκευών	Μέση Κατανάλωση (W)	Ώρες Χρήσης (h)	Κατανάλωση (Wh)
Ψυγείο	1	35	24	840
Ηλεκτρική Κουζίνα	1	1000	2	2000
Πλυντήριο Ρούχων	1	790	2	1580
Πλυντήριο Πιάτων	1	580	2	1160
Τηλεόραση	1	166	6	996
Φορητός Υπολογιστής	1	60	4	240
Σταθερός ηλεκτρονικός υπολογιστής	1	100	4	400
Φορτιστής κινητού	4	16	1	64
Κλιματιστικό 9000BTU	1	1500	1	1500
Φούρνος Μικροκυμάτων	1	800	0,1	80
Λάμπα LED 10W 860lm	8	10	4	320
Αυτοκατανάλωση Συστήματος	1	400	3	1200
Σύνολα		5575		10332

Πίνακας 2.1.1 Τυπικές Καταναλώσεις Οικίας

Ο Πίνακας 2.1.1 απεικονίζει τις ημερήσιες καταναλώσεις της οικίας, από τις οποίες συμπεραίνουμε ότι πρέπει να εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία παράγουν ακόμα και τις πιο δύσκολες ημέρες τουλάχιστον 10,32 kWh ημερησίως.

2.2 Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Πάνελ

Το πάνελ που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος διαθέτει τα χαρακτηριστικά παρατίθενται στην Εικόνα 2.2 :

Electrical data (STC)			
NU-JD540			
Maximum power	P_{max}	540	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	50.34	V
Short-circuit current	I_{sc}	13.66	A
Voltage at point of maximum power	V_{mpp}	41.64	V
Current at point of maximum power	I_{mpp}	12.97	A
Module efficiency	η_m	20.89	%

STC = Standard Test Conditions: irradiance 1,000 W/m², AM 1.5, cell temperature 25 °C.
 Rated electrical characteristics are within ±10 % of the indicated values of I_{sc} , V_{oc} and 0 to +5 % of P_{max} .
 Reduction of efficiency from an irradiance change of 1,000 W/m² to 200 W/m² ($T_{module} = 25$ °C) is less than 3 %.

Electrical data (NMOT)			
NU-JD540			
Maximum power	P_{max}	404.78	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	47.71	V
Short-circuit current	I_{sc}	11.06	A
Voltage at point of maximum power	V_{mpp}	38.81	V
Current at point of maximum power	I_{mpp}	10.43	A

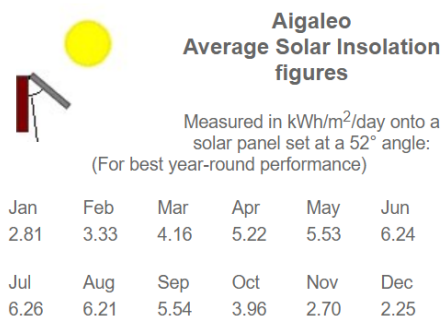
NMOT = Nominal Module Operating Temperature: 42.5 °C, irradiance 800 W/m², air temperature of 20 °C, wind speed of 1 m/s.

Εικόνα 2.2 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πάνελ

Στις παραπάνω υπό-ενότητες αναλύθηκαν τα είδη και τα χαρακτηριστικά καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Υπολογίζεται η ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ που χρειάζεται να έχει το σύστημα καθώς και ο αριθμός των πάνελ που αντιστοιχούν. Αρχικά, πρέπει να είναι γνωστά τα έξης:

- Η DC τάση του ελεγκτή φόρτισης V_{dc}
- Ο μέσος όρος ηλιοφάνειας την ημέρα T_{sh}
- Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος E_d σε Wh .

Η τάση λειτουργίας που επιλέχθηκε για το παρών σύστημα είναι τα 48V λόγω του μεγέθους των φορτίων που εξυπηρετεί. Ο μέσος όρος ηλιοφάνειας υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό εργαλείο που υπολογίζει τις ώρες της μέγιστης ακτινοβολίας για κάθε μήνα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 και στην συνέχεια αθροίστηκαν και διαιρέθηκαν δια του 12 ώστε να βρεθεί ο αριθμός αυτός $T_{sh} = 4,5$ h [19].



Εικόνα 2.3 Μέσος Όρος Ωρών Ηλιακής Ακτινοβολίας

Τέλος, η ημερήσια κατανάλωση ανακτήθηκε από τον Πίνακα 2.1.1 και είναι $E_d=10332$ Wh. Επίσης, θα πρέπει να είναι γνωστά η αποδοτικότητα των άλλων μερών του φωτοβολταϊκού: (α) του φορτιστή μπαταριών $n_c=0,96$, (β) των μπαταριών $n_b=0,95$ και (γ) των αντιστροφών $n_i=0,95$. Έτσι υπολογίζεται η συνολική ενέργεια λειτουργίας του συστήματος [19]:

$$E_{rd} = \frac{E_d}{n_c n_i n_b} \quad (2.2.1)$$

Το E_{rd} του συστήματος είναι: $E_{rd} = 11925$ Wh. Έπειτα, βρίσκουμε την μέση μέγιστη ισχύ διαιρώντας την συνολική μέση ενέργεια E_{rd} με τον μέσο όρο χρόνου της ηλιακής ακτινοβολίας T_{sh} και καταλήγουμε στην σχέση 2.2.2:

$$P_{aver,peak} = \frac{E_{rd}}{T_{sh}} \quad (2.2.2)$$

Από την σχέση 2.2.2 υπολογίζεται το $P_{aver,peak}=2650$ Wh. Μετά πραγματοποιείται υπολογισμός του ρεύματος τους συστήματος από την σχέση:

$$I_{dc} = \frac{P_{aver,peak}}{V_{dc}} \quad (2.2.3)$$

Ισούται με $I_{dc}=5,8$ A. Για τον υπολογισμό του αριθμού των πάνελ που είναι συνδεδεμένα παράλληλα, σε σειρά και ο συνολικός τους αριθμός πραγματοποιείται από τις σχέσεις:

$$N_{sm} = \frac{V_{dc}}{V_{mpp}} \quad (2.2.4)$$

$$N_{pm} = \frac{I_{dc}}{I_{mpp}} \quad (2.2.5)$$

$$N_{tm} = N_{pm} N_{sm} \quad (2.2.6)$$

Από την σχέση 2.2.4 υπολογίζεται αριθμός των πάνελ που είναι συνδεδεμένα εν σειρά $N_{sm}=10$ από την σχέση 2.2.5 υπολογίζεται ο αριθμός των πάνελ που είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους $N_{pm}=0,4$ και από την σχέση 2.2.6 ο συνολικός αριθμός των πάνελ που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών της ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος $N_{tm}=4,90$. Επειδή είναι γνωστό ότι δεν μπορούν να υπάρχουν δεκαδικά ψηφία στα πάνελ στρογγυλοποιούνται όλοι οι δεκαδικοί αριθμοί προς τα πάνω για λόγους ασφαλείας: $N_{sm}=10$, $N_{pm}=1$ και $N_{tm}=10$. Όποτε χρησιμοποιούνται 10 πάνελ εκ των οποίων τα 10 θα είναι συνδεδεμένα σε σειρά και τα 1 παράλληλα [19].

2.3 Υπολογισμός Ελεγκτή Φόρτισης

Η επιλογή του ηλιακού ελεγκτή μπαταριών υπολογίζεται με βάση τον έλεγχο του ρεύματος που περνά από αυτόν. Ένας καλός ηλιακός ελεγκτής είναι ικανός να αντέξει τόσο το ρεύμα που προκύπτει από τα φωτοβολταϊκά πάνελ όσο και το ρεύμα που χρησιμοποιούν τα φορτία που είναι συνδεδεμένα σε αυτόν. Η κύρια μέθοδος διαστασιοποίησης του είναι να μπορεί να αντέξει το συνολικό ρεύμα βραχυκυκλώματος του συστήματος των φωτοβολταϊκών πάνελ μαζί με έναν παράγοντα ασφαλείας που ονομάζεται F_{safe} ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν την επέκταση του συστήματος. Στο παρόν σύστημα θα χρησιμοποιηθεί ο ηλιακός ελεγκτής τύπου MPPT από την εταιρία Victron: Smart solar MPPT RS 450|200 με τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στην Εικόνα 2.4:

Isolated SmartSolar MPPT RS	450 100	450 200
CHARGER		
Battery voltage	48 V	
Rated charge current	100 A	200 A
Maximum charge power	5,8 kW at 57,6 V	11,5 kW at 57,6 V
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 57,6 V (adjustable)	
Charge voltage 'float'	Default setting: 55,2 V (adjustable)	
Programmable voltage range	Minimum: 36 V Maximum: 60 V ⁽⁷⁾	
Charge algorithm	Multi-stage adaptive (adjustable)	
Battery temperature sensor	Included	
Maximum efficiency	96 %	
Self-consumption	15 mA	
SOLAR		
Maximum DC PV voltage	450 V	
Start-up voltage	120 V	
MPPT operating voltage range	80 – 450 V ⁽¹⁾	
Number of trackers	2	4
Max. PV operational input current	18 A per tracker	
Max. PV short circuit current ⁽²⁾	20 A per tracker	
Max. DC output charging power	4000 W per tracker 5760 W total	4000 W per tracker 11520 W total
Maximum PV array size per tracker ⁽³⁾	7200 Wp (450 V x 20 A) ⁽³⁾	
PV Isolation fail level ⁽⁴⁾	100 kΩ	

Εικόνα 2.4 Χαρακτηριστικά MPPT

Οι σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό είναι η παρακάτω [19]:

$$I_{rcc} = I_{sc} * N_{pm} * F_{safe} \quad (2.3.1)$$

$$N_{cc} = \frac{I_{rcc} N_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I_{rcc}}{I_{cc}} \quad (2.3.2)$$

Και τα χαρακτηριστικά του MPPT ελεγκτή είναι: $I_{cc} = 80A$ και $V_{cc} = 48V$. Τότε οι εξισώσεις 2.3.1 και 2.3.2 που υπολογίζουν την μέγιστη ένταση ρεύματος του ελεγκτή καθώς και των αριθμό των ελεγκτών που θα χρειαστούν είναι: $72.68A$ και $0,90$ αντίστοιχα. Έτσι, ο ελεγκτής διαρρέεται από μέγιστο ρεύμα $72,68$ και για την διαχείριση αυτής της έντασης χρησιμοποιείται μόνο ένας ελεγκτής κατά προσέγγιση. Τέλος, όπως αναφέρεται και στον υπολογισμό του φωτοβολταϊκού συστήματος όταν οι αριθμοί δεν είναι ακέραιοι και αφορούν εξαρτήματα του συστήματος στρογγυλοποιούνται προς τα πάνω για λόγους ασφαλείας όποτε χρησιμοποιείται ένας ηλιακός ελεγκτής μπαταριών ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή ασφάλεια στο σύστημα.

2.4 Υπολογισμός Αντιστροφέα

Η επιλογή και ο υπολογισμός του αντιστροφέα που χρησιμοποιείται στο παρόν φωτοβολταϊκό σύστημα πληρεί τα παρακάτω κριτήρια:

- Η συνολική ισχύς του πρέπει να είναι ίση ή περισσότερη από ότι το άθροισμα της ισχύς των φορτίων που τροφοδοτεί
- Η τάση λειτουργίας πρέπει να είναι ίδια με την τάση του συστήματος μπαταριών του συστήματος

Πρακτικά, υπολογίζεται το άθροισμα της ισχύος των επαγωγικών φορτίων και φορτίων αντιστάσεως του συστήματος. Έπειτα, για την ασφάλεια του συστήματος προστίθεται ένας παράγοντας ασφαλείας όποιος ισούται με $F_{safe} = 1,25$ για την ασφάλεια και επεκτασιμότητα του συστήματος. Η ισχύς των μη ενεργών φορτίων υπολογίζεται από την σχέση 2.4.1 η οποία ισούται με 5527W [19].

$$P_{nia} = \sum_{i=1}^n P_{nia_i} \quad (2.4.1)$$

Έπειτα υπολογίζεται η ισχύς των επαγωγικών ή άεργων καταναλώσεων των συσκευών που χρειάζονται μεγάλο ρεύμα εκκίνησης το οποίο επιβαρύνει τον αντιστροφέα και υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 2.4.2 και ισούται με 8310W:

$$3P_{ia} = 3 \sum_{i=1}^n P_{nia_k} \quad (2.4.2)$$

Και τέλος αθροίζοντας τις σχέσεις 2.4.1 και 2.4.2 και πολλαπλασιάζοντας τες με τον παράγοντα ασφαλείας και επεκτασιμότητας του συστήματος υπολογίζεται η ισχύς που πρέπει να έχει ο αντιστροφέας ώστε να λειτουργεί εύρυθμα το σύστημα [5].

$$P_i = 1.25(P_{nia} + 3P_{ia}) \quad (2.4.3)$$

Η σχέση 2.4.3 ισούται με 15951W όποτε χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας με τάση λειτουργίας όσο το σύστημα μπαταριών δηλαδή τα 48V και ισχύ 10000W. Το μοντέλο που αντιστοιχεί στις παραπάνω προδιαγραφές είναι ο αντιστροφέας της Victron Multi-plus II 10000|48 που διαθέτει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5:

MultiPlus-II 230V	48/10000/ 140-100
PowerControl & PowerAssist	
Transfer switch	
Maximum AC input current	100 A
	100 A
DC Input voltage range	
Output	48V – 38-66 V
Cont. output power at 25°C (3)	10000 VA
Cont. output power at 25°C	8000 W
Cont. output power at 40°C	7000 W
Cont. output power at 65°C	6000 W
Max apparent feed-in power	10000 VA
Peak power	18000 W
Maximum efficiency	96%
Zero load power	38 W
Zero load power in AES mode	27 W
Zero load power in Search mode	4 W

Εικόνα 2.5 Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα

2.5 Υπολογισμός Χωρητικότητας Μπαταριών

Οι μπαταρίες που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση αυτού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι τύπου λιθίου φωσφορικού σιδήρου και στην Εικόνα 2.6 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της.

Battery type	LFP
Rated capacity of battery pack	200Ah
Rated voltage of battery pack	51.2V
Maximum charging voltage	57.6V
Minimum discharge voltage	40V
Rated charge/discharge current	100A
Maximum charge/discharge current	120A
Charging temperature range	0 to +45°C
Discharge temperature range	-20°C to +50°C
Depth of discharge	> 80%
Discharge magnification	< 1C
Self-discharge (25°C)	< 3%/Month
Cycle life	> 5000 times (< 0.5C)
Interactive mode (APP)	LCD+Button+Bluetooth
Dimension	700*515*250mm (Error±2mm)
Weight	About 65KG

Εικόνα 2.6 Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα Μπαταρίας

Για τον υπολογισμό του αριθμού των μπαταριών και του τρόπου σύνδεσης τους υπολογίζεται η εκτιμώμενη ενέργεια αποθήκευσης του συστήματος η οποία προκύπτει από την σχέση 1.4.2 [19]:

$$E_{est} = E_d \times D_{aut} \quad (2.5.1)$$

Όπου το E_d ισούται με 10332 και υπολογίζοντας τις μέρες που επιθυμείτε να λειτουργεί το σύστημα με την χρήση μπαταριών είναι μία $D_{aut}=1$. Όποτε, η σχέση 2.5.1 ισούται με $E_{est}=10332h$. Έπειτα, υπολογίζεται από την σχέση 2.5.2 η χωρητικότητα ασφαλείας του συστήματος όπου είναι το πηλίκο την εκτιμώμενης ενέργειας προς το DoD.

$$E_{safe} = \frac{E_{est}}{D_{disc}} \quad (2.5.2)$$

Η σχέση 1.4.3 ισούται με 10875 Wh. Για να βρεθεί η συνολική χωρητικότητα που χρειάζεται η μπαταρία σε Ah υπολογίζεται από την σχέση 2.5.3

$$C_{tb} = \frac{E_{safe}}{V_b} \quad (2.5.3)$$

Όπου το $V_b=48V$ είναι η τάση λειτουργίας του συστήματος και το $C_{tb}=523Ah$. Σε αυτό το σημείο μπορεί υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός μπαταριών που απαιτείται για το παρών σύστημα διαιρώντας την συνολική χωρητικότητα που πρέπει να έχει το σύστημα μπαταριών σε Ah προς την ονομαστική χωρητικότητα που έχει η επιλεγμένη μπαταρία. Η σχέση 2.5.4 βρίσκει τον αριθμό αυτό ο οποίος είναι 2,61 όποτε στρογγυλοποιείται προς τα πάνω και γίνεται 3:

$$N_{tb} = \frac{C_{tb}}{C_b} \quad (2.5.4)$$

Μετά από την σχέση 2.5.5 υπολογίζεται το πλήθος των μπαταριών που θα συνδεθούν σε σειρά και υπολογίζεται διαιρώντας την τάση DC του συστήματος προς την ονομαστική τάση της μπαταρίας [19].

$$N_{sb} = \frac{V_{dc}}{V_b} \quad (2.5.5)$$

2.6 Τεχνοοικονομική Μελέτη

Σε αυτή την υπό-ενότητα πραγματοποιείται η οικονομική μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης. Ο Πίνακας 2.6.1 παρουσιάζει αναλυτικά όλα τα κόστη των εξαρτημάτων και της καλωδίωσης για την υλοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια που αφορούν την έξυπνη καταγραφή της καταναλισκόμενης ενέργειας της οικίας.

Υλικά	Τεμάχια	Τιμή μονάδας (€)	Τιμή (€)
Πάνελ 540Wr και Βάσεις στήριξης	12	200,00	2400,00
Victron Multiplus II Inverters 10000 48	1	4358,00	4358,00
Victron SmartSolar MPPT RS 450 200-Tr	1	2462,00	2462,00
Victron Cerbo GX	1	377,00	377,00
Victron Lynx Distributor	1	242,00	242,00
Victron Lynx Power-In	1	169,00	169,00
Μπαταρίες 15kWh LFP	1	3800,00	3800,00
Λοιπό Ηλεκτρολογικό Υλικό και Εγκατάσταση	1	2227,00	2227,00
Shelly Plus Plug S	1	25,00	74,00
Shelly EM	1	53,90	53,90
Θερμόμετρο Xiaomi BLE	1	10,00	63,71
Σύνολα			16174,00

Πίνακας 2.6.1 Κόστος Υλικών Αυτόνομης Φωτοβολταϊκής Οικίας

Παρατηρείται ότι η τιμή υλοποίησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με έξυπνη επιτήρηση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας δεν είναι φτηνή. Χρειάζεται να επενδυθούν αρκετά χρήματα για την υλοποίηση και για αυτό πρέπει υπολογίζεται το ποσοστό και ο χρόνος απόσβεσης του συστήματος. Λόγω του κόστους πρέπει να υπολογιστούν τα πιθανά οικονομικά οφέλη της επένδυσης. Υπολογίζονται με την χρήση του παράγοντα Return On Investment (ROI), το οποίο αποκαλύπτει το κέρδος που προκύπτει από το ποσό της αρχικής επένδυσης. Ο υπολογισμός του γίνεται με την χρήση της σχέσης 2.6.1 [16]:

$$ROI = \frac{\text{Κόστος(Μετάτηνεπένδυση)}}{\text{ΕπενδυμένοΚεφάλαιο}} \times 100\% \quad (2.6.1)$$

Είναι γνωστό ότι ο σκοπός του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η εξοικονόμηση χρήματων παράλληλα με την εξοικονόμηση ενέργειας. Για αυτό υπολογίζεται το ROI, το οποίο όσο μεγαλύτερο είναι τόσο πιο θελκτική είναι η επένδυση. Πριν να υπολογιστεί το ROI πρέπει να υπολογιστεί το συνολικό κόστος καθόλη την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Για τον υπολογισμό αθροίζονται όλα τα κόστη τα όποια αποτελούν το φωτοβολταϊκό σύστημα μαζί με τα έξοδα συντήρησης και εγκατάστασης. Τα έξοδα συντήρησης και εγκατάστασης είναι μικρά και για αυτό δεν λαμβάνονται υπ' όψιν. Έπειτα, υπολογίζονται το συνολικό όφελος της εγκατάστασης για

όλη την διάρκεια λειτουργίας το οποίο είναι το πόσο πληρωμής του ρεύματος που πλήρωνε ο χρήστης πριν την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών. Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος εξοικονομείται πλήρως το ρεύμα που καταναλώνει κατά την διάρκεια του έτος η οικία αφού οι ανάγκες καλύπτονται από την παραγομένη ηλεκτρική ενέργεια των φωτοβολταϊκών πάνελ και την αποθηκευμένη ενέργεια που περιέχουν οι μπαταρίες. Ο υπολογισμός αποπληρωμής του συστήματος είναι ο υπολογισμός του λόγου του κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος προς την εξοικονόμηση του ηλεκτρικού ρεύματος και υπολογίζεται σε έτη. Η εξοικονόμηση του ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει από τον αρχικό υπολογισμό της ημερήσιας κατανάλωσης επί την τιμή της κιλοβατώρας και έπειτα τον πολλαπλασιασμό αυτού του πόσου με τις ημέρες του χρόνου που εξοικονομείται η ενέργεια στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος είναι όλο το χρόνο δηλαδή 365 ημέρες. Σήμερα, η μέση τιμή της κιλοβατώρας κυμαίνεται στο 0,18 €/kWh. Τέλος, υπολογίζεται το Net Benefit του συστήματος το οποίο είναι η διαφορά του ποσού εξοικονόμησης μείον το κόστος του συστήματος και έπειτα υπολογίζεται το ROI. Επιπλέον στους υπολογισμούς αυτούς λαμβάνεται υπ' όψιν η διάρκεια καλής λειτουργίας των εξαρτημάτων. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν εγγύηση καλής λειτουργίας τα 25 έτη, ο αντιστροφέας και ο ελεγκτής των μπαταριών έχουν 5 έτη αλλά με μία επιβάρυνση η οποία είναι το 10% της τιμής αγοράς των εξαρτημάτων φτάνει τα 10 έτη εγγύησης. Οι μπαταρίες έχουν τον μικρότερο χρόνο εγγύησης ο οποίος είναι τα 5 έτη. Στους υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί, για λόγους απλοποίησης, γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα εξαρτήματα θα λειτουργούν απρόσκοπτα για τουλάχιστον 25 έτη. Στους παραπάνω υπολογισμούς που πραγματοποιούνται δεν έχουν συμπεριληφθεί τα έξοδα εγκατάστασης του συστήματος τα οποία βρίσκονται κοντά στο πόσο των 2000€. Το συνολικό κόστος υλοποίησης μαζί με την εγκατάσταση και τις απαραίτητες αδειοδοτήσεις είναι 16174€ και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ROI και Net Benefit.

Ημερήσια κατανάλωση (Wh)	Ημερήσιο κόστος Ηλεκτρικής Κατανάλωσης (€)	Τιμή Ενέργειας (€/kWh)	Ετήσιο Κόστος Ρεύματος (€)	Κόστος Ηλεκτρικής κατανάλωσης στα 25 έτη (€)	Net Benefit (€)	ROI (%)	Χρόνος Αποπληρωμής (έτη)
10330	24,75	0,18	903,00	22584,53	6409,00	39	17,9

Πίνακας 2.6.2 Υπολογισμός ROI και Net Benefit

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το ROI όπως παρατηρείται στον Πίνακα 2.6.2 είναι:

- Μη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας
- Η τιμή της κιλοβατώρας του ηλεκτρικού ρεύματος
- Αναπάντεχες βλάβες από πιθανές αστοχίες του συστήματος

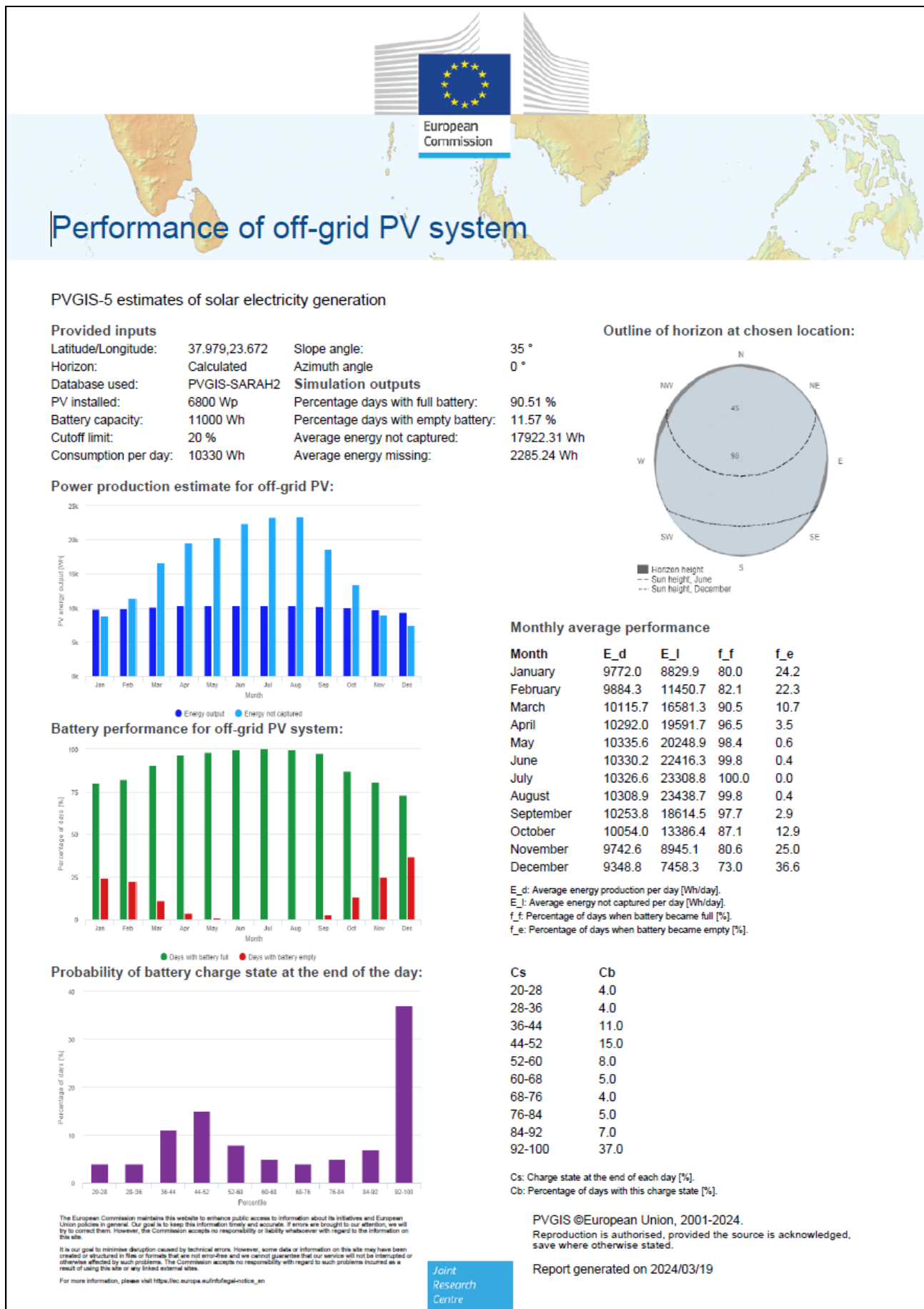
Συμπερασματικά, ο σωστός σχεδιασμός που ακολουθείται και από την αντίστοιχη σωστή εγκατάσταση, συμβάλλει στην εύρυθμη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, εάν έχουν προβλεφθεί σενάρια αποτυχίας υποσυστημάτων. Το σύστημα το οποίο υλοποιείται σε αυτή την Διπλωματική Εργασία είναι κερδοφόρο για τον χρήστη. Η απόσβεση του με τις υπάρχουσες τιμές ρεύματος θα διαρκέσει 17 έτη και το συνολικό ROI του κυμαίνεται στο 39%.

2.7 Επαλήθευση Υπολογισμών

Η χρήση εργαλείων επαλήθευσης υπολογισμών στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ένα από τα κρισιμότερα στάδια κατά την διάρκεια της σχεδίασης, ανάλυσης καθώς και της βελτιστοποίησης του. Με την χρήση αυτών των εργαλείων εκτιμούνται τα μεγέθη του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή του με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Αυτές είναι:

- Η ηλιακή ακτινοβολία στην συγκεκριμένο γεωγραφικό μήκος και πλάτος
- Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πάνελ
- Κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε σχέση με το αζιμούθιο
- Η ύπαρξη σκίασης κάποιες συγκεκριμένες ώρες της ημέρας
- Ύπαρξη συστήματος tracking για την παρακολούθηση της θέσης του Ήλιου

Για την επαλήθευση των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στα μέρη του αυτόνομου φωτοβολταϊκού χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο εργαλείο που παρέχεται από την Ευρωπαϊκή ένωση το οποίο ονομάζεται PVGIS. Στην Εικόνα 2.7 εμφανίζονται τα αποτελέσματα τα οποία εξάχθηκαν από το εργαλείο αυτό καθώς και η επαλήθευση των προβλέψεων για την αυτονομία του συστήματος για όλους τους μήνες του έτους. Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι τους καλοκαιρινούς μήνες το σύστημα δεν θα μπορέσει να απορροφήσει όλη την προσφερόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσφέρεται από τον Ήλιο. Κατά τους χειμερινούς μήνες και ειδικότερα από το μήνα Νοέμβριο έως και τον Φεβρουάριο η παραγωγή ενέργειας ώστε να ικανοποιηθούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί δηλαδή η ημερήσια αυτονομία ενεργείας καθώς και η αποθήκευση ενέργειας για το διάστημα μίας μέρας αυτονομίας θα είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω της μειωμένης ηλιοφάνειας που υπάρχει κατά την διάρκεια αυτών των μηνών. Επιπλέον, αναλύεται η κατάσταση της φόρτισης των μπαταριών για καθόλη την διάρκεια του χρόνου. Η μπαταρία θα πέσει κοντά στο όριο αποκοπής μόνο στο 6% των ημερών του χρόνου το οποίο υποδηλώνει την καλή διαστασιολόγηση που έχει πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια των υπολογισμών. Επιπρόσθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες οι ανάγκες του συστήματος καλύπτονται πλήρως λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και την διάρκεια αυτής. Τέλος, οι μπαταρίες του συστήματος θα μένουν άδειες περίπου μια μέρα από κάθε μήνα του χρόνου διότι ο στόχος του συστήματος είναι η αντοχή του για δυο μέρες χωρίς ηλιοφάνεια [20]. Επιπροσθέτως, με την χρήση αυτών των συστημάτων γίνεται προσομοίωση του σχεδιασμένου συστήματος σε πραγματικές συνθήκες από τις οποίες επαληθεύεται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Η εφαρμογή αυτών των εργαλείων υπολογισμών οδηγεί στην μείωση του κόστους εγκατάστασης λόγω του σωστού υπολογισμού των μεγεθών που αποτελούν το σύστημα, την βελτίωση της αξιοπιστίας του και γενικότερα της διαχείρισης του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.



Εικόνα 2.7 Έκθεση Επαλήθευσης Υπολογισμών από το Εργαλείο PVGIS

2.7.1 Εργαλεία Υπολογισμών

Υπάρχουν αρκετά εργαλεία και συγκεκριμένα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση αυτών των εγκαταστάσεων. Τα οποία σημαντικά και δημοφιλή εργαλεία που υπολογίζονται τα μεγέθη και οι παράμετροι που αποτελούν ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι:

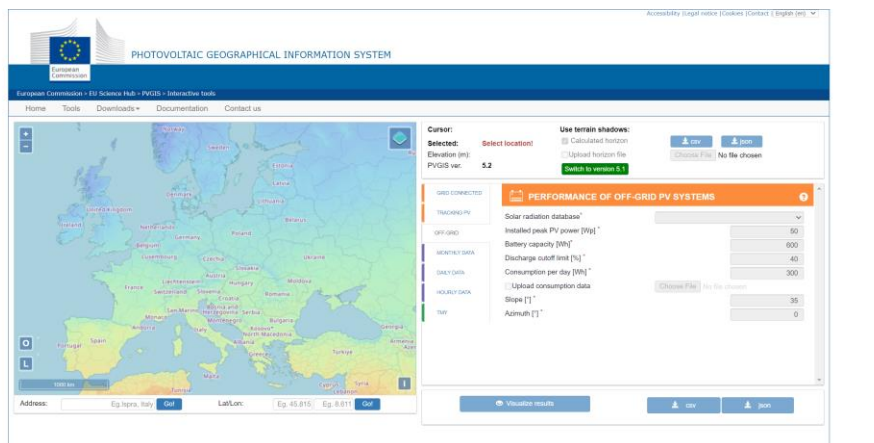
- PVsyst
- PVGIS
- SAM

ΤΟ PVsyst είναι το πιο προηγμένο και πλήρες εργαλείο υπολογισμού από τα περισσότερα προγράμματα που κυκλοφορούν στην αγορά διότι παρέχει εκτείνεις παράγοντες κατά την διενέργεια της προσομοίωσης όπως: την γεωγραφική θέση του συστήματος, την παρουσία του φαινομένου της σκίασης στο σύστημα και τον καιρό που επικρατεί στην περιοχή στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Επιπλέον, διαθέτει την επιλογή για διενέργεια τεχνικοοικονομικής μελέτης του σχεδιασμένου συστήματος υπολογίζοντας και το οικονομικό σκέλος του. Για την βελτιστοποίηση και τον υπολογισμό αυτών των παραγόντων αυτών χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων οι οποίες περιέχουν τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία χρειάζονται ώστε να βελτιστοποιηθούν και να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά. Τα μειονεκτήματα αυτού του εργαλείου υπολογισμού είναι ότι δεν διατίθεται δωρεάν και η χρήση του προορίζεται για επαγγελματίες που ήδη ασχολούνται στον χώρο της σχεδίασης και υλοποίησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος [21]. Το PVGIS είναι ένα δωρεάν εργαλείο διαστασιοποίησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο σχεδιάστηκε από το European Commission's Joint Research Centre (JRC) με σκοπό τον υπολογισμό της ηλιακής απόδοσης και των παραμέτρων οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού συστήματος ανεξαρτήτως του τύπου του σε συνάρτηση με την τοποθεσία του στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο σύστημα αυτό ενσωματώνονται βάσεις δεδομένων οι οποίες περιέχουν δεδομένα από τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση και την λειτουργία του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος όπως: Η γεωγραφική του θέση, η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την εκάστοτε τοποθεσία οι τύποι των φωτοβολταϊκών πάνελ, οι χάρτες απόδοσης στους οποίους παρουσιάζεται η εκτιμώμενη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται από μετεωρολογικούς δορυφόρους σε συνδυασμό με επιγείους μετεωρολογικούς σταθμούς ώστε να αυξηθεί το ποσοστό ακρίβειας κατά την διενέργεια των υπολογισμών. Επιπλέον, για την περαιτέρω βελτίωση των υπολογισμών του συστήματος απαιτείται η γνώση της σκίασης που υπάρχει στο εκάστοτε σημείο εγκατάστασης. Η λύση αυτού του προβλήματος παρέχεται από με την χρήση των συστημάτων GIS. Ο συνδυασμός των μετεωρολογικών σταθμών επίγειων και του διαστήματος καθώς και η γνώση του γεωγραφικού περιβάλλοντος στο οποίο είναι ανεπτυγμένο το σύστημα αποτελεί το κύριο μέρος του εργαλείου αυτού. Το εργαλείο αυτό διατίθεται δωρεάν από την Ευρωπαϊκή Ένωση και διατίθεται στην ιστοσελίδα: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. Σε αυτή την ιστοσελίδα περιέχονται τα στοιχεία που εμφανίζονται στην Εικόνα 2.8 τα οποία είναι:

- Η επιλογή ηλιακής βάσης δεδομένων

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

- Εισαγωγή της εγκατεστημένης ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ
- Η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών
- Το ποσοστό αποφόρτισης των μπαταριών
- Η ημερήσια κατανάλωση σε Wh
- Οι γωνίες του Αζιμούθιου
- Η κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ



Εικόνα 2.8 Το Σύστημα PVGIS

Επιλογικά, το PVGIS είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για επαγγελματίες στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, αναλυτές ενέργειας, και για χρήστες που ενδιαφέρονται να αξιολογήσουν την καταλληλότητα μιας τοποθεσίας για φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [20]. Το εργαλείο υπολογισμού SAM είναι ένα ελεύθερο εργαλείο που παρέχεται από τον Εθνικό Εργαστήριο Ενέργειας των ΗΠΑ. Το εργαλείο αυτό πραγματοποιεί την πιο εμπειριστατωμένη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με τα άλλα δυο που έχουν προαναφερθεί και λειτουργεί ως εξής:

- Εισάγεται από τον χρήστη η τοποθεσία και το φωτοβολταϊκό σύστημα.
- Εισάγονται τα αναλυτικά τα στοιχεία τα οποία το αποτελούν,
- Εισάγεται το είδος του αντιστροφέα από την υπάρχουσα βάση δεδομένων του συστήματος
- Σχεδιάζεται το φωτοβολταϊκό σύστημα
- Υπολογίζονται οι απώλειες που προκύπτουν από την σκίαση στον χώρο και τις απώλειες του συστήματος
- Υπολογίζονται τα οικονομικά μεγέθη που αφορούν το φωτοβολταϊκό σύστημα όπως το κόστος του και το ROI

Τέλος, το SAM αποτελεί ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας ενεργειακών έργων [21].

2.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίστηκαν, επαληθευτήκαν τα μέρη που αποτελούν το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς και πραγματοποιήθηκε η τεχνοοικονομική μελέτη η οποία καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος. Επισημαίνεται ότι για την βέλτιστη δυνατή λειτουργία του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει τα μέρη του να είναι επώνυμα, η εγκατάστασή τους, η διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός να γίνονται μόνο από εξουσιοδοτημένους ηλεκτρολόγους οι οποίοι γνωρίζουν την εκάστοτε νομοθεσία για την εγκατάσταση. Επιπρόσθετα, κατά την διενέργεια της διαδικασίας του υπολογισμού των μερών του φωτοβολταϊκού συστήματος όταν οι τιμές βρίσκονται στο όριο είναι καλό να στρογγυλοποιούνται στην αμέσως επόμενη τάξη μεγέθους. Η επιλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ καθορίστηκε με γνώμονα την ανάγκη της επιθυμητής παραγωγής ενέργειας, τον διαθέσιμο κατάλληλο χώρο και τέλος το διαθέσιμο ποσό επένδυσης. Η επιλογή του ελεγκτή φόρτισης πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την βελτιστοποίηση διαχείρισης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και την εφαρμογή της νεότερης και αποτελεσματικότερης τεχνολογίας που διέπει αυτά τα συστήματα. Κατά την επιλογή των αντιστροφών ενέργειας επιλέχθηκαν σύμφωνα με την νεότερη τεχνολογία ώστε να περιοριστούν οι απώλειες που δημιουργούνται κατά την μετατροπή ενέργειας από DC σε AC καθώς και την επιλογή της πιο εμπορικά δόκιμης λύσης. Η επιλογή των μπαταριών πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την πιο αποτελεσματική, ασφαλή και αποδοτική λύση που υπάρχει στο εμπόριο η οποία είναι η τεχνολογία λιθίου φωσφορικού σιδήρου. Ακόμη, στην διενέργεια υπολογισμού του ROI και του Net Benefit λαμβάνεται υπόψιν η μεταβλητότητα που υπάρχει στην τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και η πτώση των τιμών στα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιλογικά, παρατίθενται και η αναλύονται τα πιο γνωστά εργαλεία που επαληθεύουν τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις παραπάνω υποενότητες του παρόντος κεφαλαίου. Ιδιαίτερη, ανάλυση παρέχεται για το σύστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία το οποίο είναι το PVGIS, το οποίο είναι δωρεάν και υλοποιημένο για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Τεχνολογίες Νεφοϋπολογιστικής και ΔτΠ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται και περιγράφονται οι τεχνολογίες οι οποίες διέπουν την Νεφοϋπολογιστική και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Αρχικά, περιγράφονται οι βασικές έννοιες της Νεφοϋπολογιστικής ως Infrastructure as a Service (IaaS). Στην συνέχεια αναλύονται οι τεχνολογίες των Virtual Machines (VMs) και του docker-compose οι οποίες αποτελούν την βάση για την υλοποίηση της εφαρμογής που περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια. Έπειτα, περιγράφεται ο τρόπος αποθήκευσης και ο τύπος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής. Ακόμη, αναλύονται οι τεχνολογίες επικοινωνιών και τα πρωτόκολλα που απαιτούνται για την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής: MQTT, BLE και το πρωτόκολλο ασφαλείας SSH. Τέλος, εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την χρήση και την περιγραφή των παραπάνω τεχνολογιών καθώς και η χρησιμότητα τους στην εφαρμογή που υλοποιείται στα επόμενα κεφάλαια.

3.1 Νεφοϋπολογιστική και IaaS

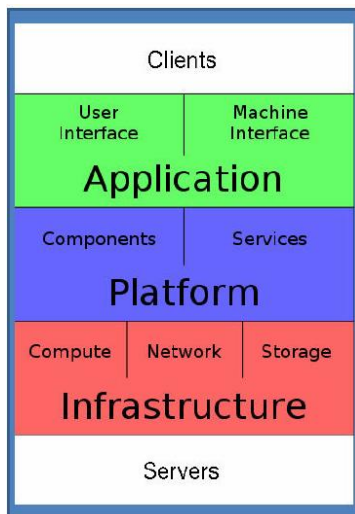
Μια ακόμα από τις πιο δημοφιλείς και ραγδαία αναπτυσσόμενες τεχνολογίες είναι η Νεφοϋπολογιστική. Η Νεφοϋπολογιστική αποτελεί μια υπολογιστική αρχιτεκτονική η οποία βασίζεται στην χρήση απομακρυσμένων υπολογιστικών πόρων με την χρήση του διαδικτύου για την ανάπτυξη διαδικτυακών εφαρμογών, την επεξεργασία και την αποθήκευση δεδομένων. Με επιπλέον κόστος, διατίθενται υπηρεσίες επεκτασιμότητας και εγγύησης του Quality of Service (QoS) των υπηρεσιών. Τα πέντε κύρια χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα που διαθέτει είναι:

- Δεν απαιτείται η υλοποίηση και συντήρηση υπολογιστικών συστημάτων (on premises)
- Δεν χρειάζεται μεγάλη αρχική επένδυση CapEx (Capital Expenditures)
- Λειτουργικά έξοδα τα οποία αυξάνουν καθώς αυξάνουν και οι ανάγκες του συστήματος OpEx (Operational Expenditures)
- Πληρωμή υπηρεσιών με βάση των χρησιμοποιούμενων πόρων (pay as you go)
- Εύκολη επεκτασιμότητα και συρρίκνωση βάση των αναγκών (Scale Up, Scale Down)

Οι υπηρεσίες διαθέτουν ευρεία πρόσβαση στο διαδίκτυο ώστε να είναι προσβάσιμες σε διαφορετικές συσκευές και τοποθεσίες. Οι πόροι επεκτείνονται ή συρρικνώνονται ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και η χρέωση τους πραγματοποιείται αυτόματα από την εφαρμογή με βάση την χρήση τους. Επιπρόσθετα, η διαθεσιμότητα των πόρων όπως οι εικονικοί υπολογιστές, ο αποθηκευτικός χώρος και οι υπηρεσίες δικτύου παρέχονται αυτόματα από τον πάροχο χωρίς την διενέργεια διαδικασιών από την πλευρά του χρήστη και του προγραμματιστή της εφαρμογής. Τέλος, μοιράζονται και οργανώνονται για την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών και ο καθένας από αυτούς αποκτά πρόσβαση μόνο στους πόρους που του είναι απαραίτητη για την λειτουργία της εφαρμογής. Η αρχιτεκτονική της Νεφοϋπολογιστικής περιγράφεται στην Εικόνα 3.1 και αποτελείται από τρία κύρια στρώματα [22]:

- SaaS (Software as a Service)

- PaaS (Platform as a Service)
- IaaS (Infrastructure as a Service)

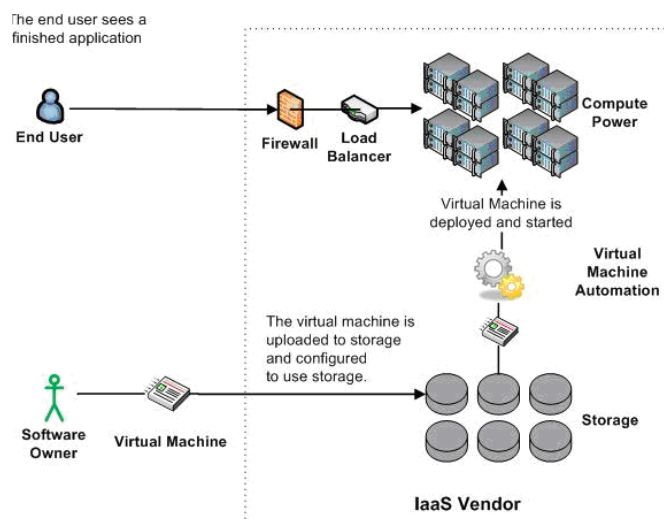


Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική Νεφοϋπολογιστικής

Στο στρώμα του SaaS αναπτύσσονται οι εφαρμογές και περιέχεται όλο το υλικό της εφαρμογής που έχει αναπτυχθεί τα οποία διαχειρίζονται από τον πάροχο της υποδομής νέφους. Η παροχή αυτής της υπηρεσίας περιλαμβάνεται με την πληρωμή ενός οικονομικού αντιτίμου το οποίο αντιστοιχείται στην χρήση των πόρων των οποίων απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία της εφαρμογής. Οι πάροχοι τέτοιου είδους υπηρεσιών διαθέτουν δικές τους βάσεις δεδομένων μέσω των οποίων οι εφαρμογές διατίθενται στους χρήστες μέσω του διαδικτύου. Ενδεικτικοί πάροχοι αυτού του είδους υπηρεσιών είναι: NetSuite και η Oracle CRM on demand. Το δεύτερο στρώμα που περιλαμβάνεται στην αρχιτεκτονική αυτή είναι το PaaS. Στο PaaS πραγματοποιείται η διαδικασία ανάπτυξης και εξέλιξης των εφαρμογών διαδικτυακά από τους προγραμματιστές. Εξυπηρετείται η ανάπτυξη και η εξέλιξη των εφαρμογών αφαιρώντας τον υπολογισμό κόστος και πολυπλοκότητας του υλικού και της δομής που απαιτείται για την αποστολή και την διαθεσιμότητα της στους χρήστες. Παράλληλα, οι προγραμματιστές επικεντρώνονται στη ανάπτυξη στην εφαρμογής. Οι πάροχοι διαθέτουν στις πλατφόρμες εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού και βάσεις δεδομένων για την αποθήκευση και αποστολή των εφαρμογών αυτών μέσω του διαδικτύου στους χρήστες. Οι πάροχοι που διαθέτουν τέτοιου είδους υπηρεσίες είναι: Η Google App Engine, Red Hat OpenShift και Salesforce Platform. Το τρίτο και τελευταίο στρώμα το αποτελεί το IaaS. Σε αυτό το στρώμα παρέχονται υπηρεσίες λογισμικού και υλικού ως υπηρεσία καθιστώντας το εξέλιξη στον τομέα του hosting χωρίς να απαιτείται μακροχρόνια δέσμευση. Οι πάροχοι των υπηρεσιών αυτών συντηρούν απλά τους servers ενώ οι χρήστες καθίστανται υπεύθυνοι για την συντήρηση των εφαρμογών και των δεδομένων. Επιπλέον παρέχονται υπηρεσίες πρόσβασης στο διαδίκτυο, δρομολόγησης, αποθήκευσης δεδομένων, τα εργαλεία για την επεξεργασία και την ανάπτυξη υποδομών, επέκταση του φάσματος, της μνήμης της χωρητικότητας τα οποία κοστολογούνται ανάλογα με τον φόρτο που απαιτείται από τους server του παρόχου. Ο εξοπλισμός τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό που διατίθεται από τους παρόχους είναι ο παρακάτω:

- Αυτοματισμοί στις διαχειριστικές διαδικασίες
- Δυναμική επεκτασιμότητα

- Εικονοποίηση
- Παροχή υπηρεσιών με βάση την οριοθετούμενη πολιτική
- Συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο
- Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών
- Εφαρμογή μοντέλου χρέωσης ανάλογα με την χρήση των υπηρεσιών [22]



Εικόνα 3.2 Λειτουργία IaaS

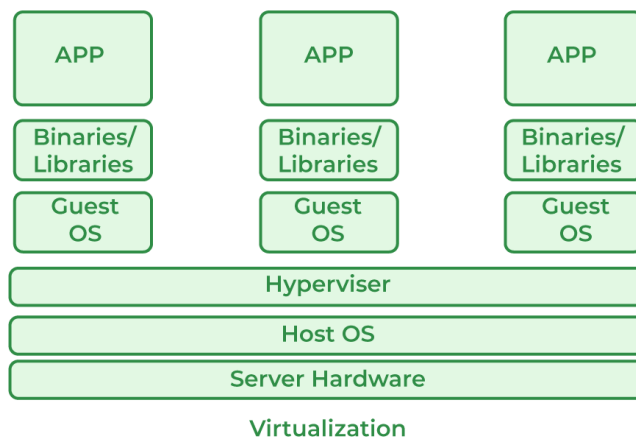
Στην Εικόνα 3.2 περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας της υπηρεσίας IaaS. Αρχικά, υλοποιείται η εφαρμογή από τον προγραμματιστή σε ένα εικονικό μηχάνημα ώστε να ανεβεί στις βάσεις δεδομένων του παρόχου. Έπειτα, ο πάροχος εφόσον διαθέτει το εικονικό μηχάνημα αποθηκευμένο στην βάση δεδομένων του, αναπτύσσεται στην υπολογιστή χωρητικότητα όπου εκεί δημιουργούνται τόσα εικονικά μηχανήματα της εφαρμογής όσα χρειάζονται για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών. Επίσης, διαμοιράζεται η κίνηση ώστε να μην υπάρξουν καθυστερήσεις στην πλευρά των χρηστών. Τέλος, για την προστασία της εφαρμογής και των υπολογιστικών πόρων χρησιμοποιείται από τους παρόχους τοίχος προστασίας ώστε να προστατευθούν από πιθανές κακόβουλες επιθέσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν.

3.1.1 VMs

Όπως αναφέρεται στην προηγούμενη υπό-ενότητα για την υλοποίηση των εφαρμογών με την χρήση της Νεφοϋπολογιστικής χρησιμοποιείται η τεχνική της εικονοποίησης διότι αποτελούν το δομικό στοιχείο των υποδομών IaaS και της Νεφοϋπολογιστικής. Η εικονοποίηση είναι η τεχνολογία κατά την οποία δημιουργούνται εικονικές οντότητες όπως λειτουργικά συστήματα, βάσεις δεδομένων ακόμα και πόροι που αφορούν το δίκτυο που αφορούν ώστε να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα από πολλούς χρήστες. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης των φυσικών πόρων και την εκτέλεση των εφαρμογών στην ήδη υπάρχουσα υποδομή χωρίς την ανάγκη διαφορετικού υλικού για κάθε εικονική μηχανή. Υπάρχουν αρκετά τύποι εικονοποίησης μερικοί από αυτούς είναι:

- Εικονοποίηση Εφαρμογών
- Εικονοποίηση Δικτύων
- Εικονοποίηση Αποθηκευτικού χώρου
- Εικονοποίηση Δεδομένων

Σε αυτή την Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιείται η εικονοποίηση εφαρμογών διότι κατασκευάζεται μια εφαρμογή όπου βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα Linux 22.04.3 LTS για την δημιουργία της. Έτσι με αυτό το μοντέλο παρέχεται πρόσβαση στην εφαρμογή από οποιοδήποτε σημείο και αποθήκευση των δεδομένων σε ένα απομακρυσμένο φυσικό μηχάνημα. Η δομή των εικονικών συστημάτων περιγράφεται από την Εικόνα 3.3³.



Εικόνα 3.3 Δομή Εικονικής Αρχιτεκτονικής

Αρχικά, εικονοποιείται η εφαρμογή για να αποσταλεί στον διακομιστή. Έπειτα, αναπτύσσεται στο φυσικό σύστημα (Host OS) όπου θα εκτελεστεί η εικονοποίηση για τη διανομή της σε εικονικούς υπολογιστές. Στο τρίτο στάδιο, η αρχιτεκτονική εστιάζει στον Υπερεπόπτη (Hypervisor), όπου διαχειρίζεται, δημιουργεί και εκτελεί τις εικονικές μηχανές. Επιπλέον, σε αυτό το επίπεδο, οι

³ “What is a Container? | Docker.” Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.docker.com/resources/what-container/>

εικονικές μηχανές απομονώνονται μεταξύ τους από το υποκείμενο φυσικό σύστημα. Τέλος, πραγματοποιείται η εγκατάσταση του επιθυμητού λειτουργικού συστήματος, των απαραίτητων βιβλιοθηκών και της εφαρμογής που έχει δημιουργηθεί για να λειτουργεί σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές. Τα κύρια χαρακτηριστικά της εικονοποίησης είναι:

- Παροχή αυξημένης ασφάλειας
- Διαμοιρασμός εφαρμογών
- Ενσωμάτωση
- Διαχείριση κατά της διάρκειας εκτέλεσης

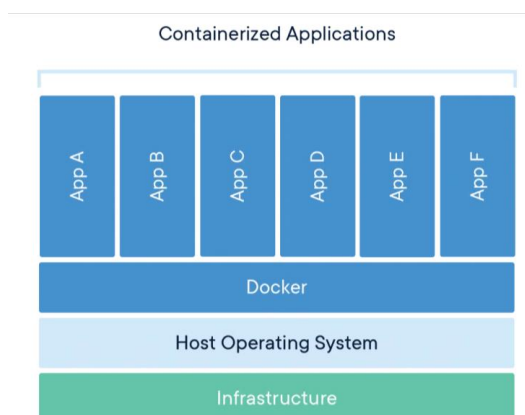
Η δυνατότητα ελέγχου της εκτέλεσης οποιοδήποτε προγράμματος που προσφέρεται από μια εικονική μηχανή δημιουργούνται οι προϋποθέσεις ενός πιο ασφαλούς, ελεγχόμενου περιβάλλοντος εκτέλεσης προγραμμάτων. Όλες οι λειτουργίες των προγραμμάτων αυτών εκτελούνται στην εικονική μηχανή, η οποία στη συνέχεια τις μεταφράζει και τις εφαρμόζει στα προγράμματα υποδοχής προστατεύοντας την φυσική μηχανή και το πηγαίο κώδικα της εφαρμογής από τυχόν κακόβουλες ενέργειες. Επιπλέον, διαχειρίζονται αρκετές λειτουργίες από τις οποίες οι σημαντικότερες είναι ο διαμοιρασμός, η εξομοίωση και η απομόνωση των εφαρμογών. Με την διαδικασία της εικονοποίησης δημιουργείται κάθε φορά ξεχωριστό περιβάλλον στον ίδιο φυσικό πάροχο για την υλοποίηση της ίδιας εφαρμογής. Από την δομή της αρχιτεκτονικής στην εικονοποίηση πραγματοποιείται κοινή χρήση φυσικών πόρων μεταξύ πολλών άλλων εικονικών μηχανών, αλλά επιπρόσθετα επιτρέπεται και τη συγκέντρωση πόρων.

3.1.2 Containers

Τα containers αναφέρονται σε εικονικά περιβάλλοντα εκτέλεσης που περιέχουν εφαρμογές και όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα χρειάζονται για να εκτελεστούν. Ο όρος container χρησιμοποιείται ευρέως στο πλαίσιο της εικονοποίησης και συγκεκριμένα αναφέρεται στα εικονικά περιβάλλοντα που δημιουργούνται και διαχειρίζονται με τη χρήση τεχνολογιών όπως το Docker ή το Podman. Αποτελούνται από μια τυπική μονάδα λογισμικού στην οποία περιέχονται ο κώδικας και όλες τις εξαρτήσεις που απαιτούνται ώστε η εφαρμογή να εκτελείται γρήγορα και αξιόπιστα από το ένα υπολογιστικό περιβάλλον στο άλλο. Ένα docker container είναι ένα ελαφρύ, αυτόνομο, εκτελέσιμο πακέτο λογισμικού που περιλαμβάνει όλα όσα χρειάζονται για την εκτέλεση μιας εφαρμογής: κώδικα, χρόνο εκτέλεσης, εργαλεία συστήματος, βιβλιοθήκες συστήματος και ρυθμίσεις. Η τεχνολογία των containers είναι αρκετά δημοφιλής επειδή στο Docker αξιοποιούνται και άλλες τεχνολογίες εκτός από αυτήν των containers. Το Docker είναι μια εφαρμογή ανοιχτού κώδικα στην οποία εκτελούνται σε ένα απομονωμένο περιβάλλον που δημιουργείται στο φυσικό μηχάνημα ένα στρώμα πάνω το επίπεδο του Kernel και επεξεργάζονται εφαρμογές οι οποίες διαθέτουν. Αρχικά, δημιουργούνται και ελέγχονται τα containers τα οποία έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Εύκολη ένταξη και μεταφορά εφαρμογών από container σε container
- Μεταφορά παραλλαγών των ίδιων εφαρμογών στον ίδιο χώρο
- Συντονισμός με προγράμματα τρίτων
- Εύκολη ανάπτυξη τους σε περιβάλλοντα νέφους

Η ευκολία που συναντάται στην μετακίνηση των εφαρμογών υλοποιείται διότι καταλαμβάνουν μικρή χωρητικότητα και δεν επηρεάζονται κατά την διάρκεια της μεταφοράς. Η μεταφορά παραλλαγών στον ίδιο χώρο αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο αποκτείνεται από το μικρό μέγεθος των εφαρμογών και την δομή λειτουργίας του docker. Στην Εικόνα 3.4 απεικονίζεται η δομή του docker⁴.



Εικόνα 3.4 Δομή Docker Container

⁴ “What is a Container? | Docker.” Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.docker.com/resources/what-container/>

Αρχικά, το docker αποτελείται από την απαραίτητη φυσική δομή πάνω στην οποία βασίζεται το λειτουργικό σύστημα Linux Kernel στην συνέχεια πάνω σε αυτόν εγκαθίσταται η εφαρμογή docker και έπειτα αναπτύσσονται τα containers. Το docker αποτελείται από 4 βασικά δομικά στοιχεία τα οποία είναι:

- Docker Client & Server
- Docker Images
- Docker Registries
- Docker Containers

Δημιουργείται μια εικόνα του docker με την υλοποίηση ενός read only αρχείου στο οποίο διατίθεται η βάση η οποία ονομάζεται base image. Η βάση όπως προαναφέρεται βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα Linux. Μέσα από την δημιουργία αυτών των εικονικών συστημάτων δημιουργούνται τα container τα οποία διαθέτουν το ίδιο λειτουργικό σύστημα με το base image. Έπειτα οι εικόνες που δημιουργήθηκαν τοποθετούνται στα docker registries τα οποία ανταποκρίνονται στον πηγαίο κώδικα και αντλούνται από το διαδίκτυο. Υπάρχουν δυο κατηγοριών registries τα δημόσια και τα ιδιωτικά. Η μεγαλύτερη και ασφαλέστερη πηγή δημοσίου registry αποτελεί το docker hub μπορούν να ανεβούν images τόσο από ιδιότητες σε ένα ιδιωτικό registry όσο και ανέβασμα δημοσίων εικόνων από τις εταιρίες. Τα container δημιουργούνται εφόσον έχει εγκατασταθεί πρώτα ένα docker image. Έτσι, διατίθενται στα container τα απαραίτητα δομικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες για την υλοποίηση της εφαρμογής απομονωμένη από το υπόλοιπο σύστημα.

3.1.3 Docker Compose

Το Docker compose είναι ένα εργαλείο της εταιρίας Docker που διαχειρίζεται και ορίζει την λειτουργία πολλαπλών Docker containers ως ένα μοναδικό υπολογιστικό σύνολο. Με το εργαλείο αυτό απλοποιείται ο έλεγχος της διαχείρισης των εφαρμογών, των υπηρεσιών, των ρυθμίσεων δικτύου και των συνδέσεων μεταξύ διάφορων containers σε ένα αρχείο διαμόρφωσης με την χρήση ενός αρχείου που διαθέτει την κατάληξη YAML. Η ιδιότητα που διαθέτει το αρχείο αυτό είναι η υλοποίηση πολλαπλών υπηρεσιών με την χρήση μιας και μόνο εντολής⁵. Η λειτουργία αυτή υποστηρίζεται από όλα τα στάδια ανάπτυξης τα οποία είναι η παραγωγή, η ανάπτυξη, η δοκιμή μέχρι και την τελική υλοποίηση παρέχονται εντολές οι οποίες διαχειρίζονται όλα τα στάδια της εφαρμογής όπως:

- Την εκκίνηση και το σταμάτημα της εφαρμογής
- Την κατάσταση των εκτελούμενων containers
- Καταγραφή των εκτελούμενων υπηρεσιών
- Την εκτέλεση εντολών σε κάθε ένα container ξεχωριστά

Στην Εικόνα 3.5 παρατίθεται η δομή ενός αρχείου docker compose στο οποίο περιέχονται δυο υπηρεσίες οι οποίες ονομάζονται web και db και μέσα σε αυτές υλοποιείται η κατασκευή του υπηρεσίας που περιέχει την τελευταία έκδοση της εικόνας του προγράμματος του nginx proxy manager με ανοιχτή την πόρτα 8080:80 και αντίστοιχα στη δεύτερη υπηρεσία περιέχεται η τελευταία έκδοση της εικόνας του προγράμματος postgres μαζί με τον καθορισμό ενός περιβάλλοντος και ενός κωδικού πρόσβασης.

```
version: '3'
services:
  web:
    image: nginx:latest
    ports:
      - "8080:80"
  db:
    image: postgres:latest
    environment:
      POSTGRES_PASSWORD: examplepassword
```

Εικόνα 3.5 Παράδειγμα Docker compose αρχείου

Επιπλέον, με το docker-compose συγχωνεύονται πολλαπλά αρχεία μεταξύ τους ώστε να οριστεί το περιβάλλον της εφαρμογής. Ο συνδυασμός αρχείων YAML υλοποιείται με την προσάρτηση ή την παράκαμψη στοιχείων YAML με βάση τη σειρά αρχείων Σύνταξης που ορίζονται από τον χρήστη. Τα απλά χαρακτηριστικά και οι χάρτες παρακάμπτονται από το αρχείο σύνθεσης υψηλότερης σειράς, οι λίστες συγχωνεύονται με προσθήκη. Οι διαδρομές ορίζονται από τον γονικό φάκελο του

⁵ “Docker Compose overview,” Docker Documentation. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://docs.docker.com/compose/>

πρώτου αρχείου compose, κάθε φορά που τα συμπληρωματικά αρχεία που συγχωνεύονται φιλοξενούνται σε άλλους φακέλους. Για την επαναχρησιμοποίηση άλλων αρχείων σύνθεσης ή να των συνυπολογισμό τμημάτων του μοντέλου εφαρμογής σε ξεχωριστά αρχεία σύνθεσης χρησιμοποιείται η ιδιότητα της συμπερίληψης. Το χαρακτηριστικό της ιδιότητας αυτής είναι χρήσιμο όταν απαιτείται διαμοιρασμός και η επεξεργασία της εφαρμογής από διάφορες ομάδες. Η χρήση του docker-compose πραγματοποιείται διότι κατά την ανάπτυξη λογισμικού απαιτείται η εκτέλεση και αλληλεπίδραση της εφαρμογής σε ένα απομονωμένο περιβάλλον. Η εντολή compose διαθέτει τις κατάλληλες εντολές για την δημιουργία και την αλληλεπίδραση με ένα τέτοιο περιβάλλον. Έπειτα, στο αρχείο αυτό διατίθεται τρόποι τεκμηρίωσης και διαμορφώσεις των εξαρτημένων υπηρεσιών της εφαρμογής όπως είναι το API της εφαρμογής και μέσω της γραμμής εντολών δημιουργείται ή εκκινείτε ένα ή περισσότερα container. Επιπλέον, με το docker-compose ελαττώνεται το μέγεθος και δημιουργείται ένα μόνο αρχείο των προαπαιτούμενων πληροφοριών που χρειάζεται να γνωρίζει κάθε φορά ο εκάστοτε προγραμματιστής το οποίο εκτελείται μόνο με μερικές εντολές. Τέλος, διευκολύνεται η δημιουργία αυτοματοποιημένων περιβαλλόντων δοκιμών το οποίο είναι το πιο σημαντικό μέρος για την συνεχή ανάπτυξη και αυτοματοποιημένη διαδικασία ελέγχου των εκάστοτε εφαρμογών. Οι αυτοματοποιημένες δοκιμές από άκρο σε άκρο απαιτούν ένα περιβάλλον στο οποίο εκτελούνται δοκιμές. Στο compose παρέχεται και δημιουργείται ένα ειδικό περιβάλλον για τον αυτοματοποιημένο έλεγχο και διενέργειας δοκιμών. Με τον πλήρη ορισμό του περιβάλλοντος σε ένα αρχείο compose δημιουργείται και καταστρέφεται άμεσα ένα περιβάλλον με την χρήση άπλων εντολών οι οποίες είναι: **docker compose up -d, ./run_tests, docker compose down**⁶.

⁶ “How Compose works,” Docker Documentation. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://docs.docker.com/compose/compose-application-model/>

3.2 Βάσεις Δεδομένων

Βάση δεδομένων ορίζεται μια οργανωμένη συλλογή δομημένων πληροφοριών ή δεδομένων τα οποία αποθηκεύονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο έλεγχος αυτής της διαδικασίας πραγματοποιείται με την χρήση ενός ειδικού λογισμικού το οποίο ονομάζεται DBMS (DataBase Management System). Με το λογισμικό αυτό μεταφέρονται τα αιτήματα που πραγματοποιούνται από τον χρήστη στον φυσικό χώρο που βρίσκονται αποθηκευμένα και ζητείται η πρόσβαση. Τα δεδομένα, το σύστημα διαχείρισης τους και τις οποίες εφαρμογές που σχετίζονται αποτελούν την βάση δεδομένων. Οι μοντελοποίηση των δεδομένων αυτών πραγματοποιείται συνήθως με την μορφή στηλών και γραμμών σε έναν πίνακα ώστε η επεξεργασία και η αποδοτικότητα της αναζήτησης να είναι αποτελεσματική. Έτσι, αποκτάται ευκολότερα πρόσβαση, οργάνωση, ενημέρωση, διαχείριση, έλεγχος και μετατροπή των δεδομένων. Η πιο συνηθισμένη και διαδεδομένη γλώσσα για την διαχείριση και την δημιουργία query είναι η SQL (Structured Query Language). Τέλος, η κεντρική λειτουργία μιας βάσης δεδομένων είναι ότι τα δεδομένα αυτά διαχειρίζονται με όρους οι οποίοι αφορούν της σχέση τους με άλλα δεδομένα που βρίσκονται εντός της βάσης. λογισμικό DBMS μεταφέρει τα αιτήματα που πραγματοποιούνται από τον χρήστη [23].

3.2.1 SQL

Η σχεσιακή βάση δεδομένων ή αλλιώς SQL είναι μια βάση η οποία δομείται αποκλειστικά από μια συλλογή σχέσεων δεδομένων. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε από τον Edgar Codd το 1960 και η λειτουργία του είναι η εξής: Αρχικά ορίζονται οι σχέσεις οι οποίες αποτελούν έναν πίνακα ο οποίος περιέχει στήλες και γραμμές. Το περιεχόμενο των στηλών είναι οι ιδιότητες των δεδομένων ενώ στις γραμμές περιέχονται οι πληροφορίες αυτών. Οι σχέσεις αυτές έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία τις διαφοροποιούν από άλλους τύπους δεδομένων. Κάθε ένα από αυτά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά αποτελούν την βάση με την οποία ο DBMS ορίζει τους περιορισμούς. Οι στήλες διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Το όνομα κάθε στήλης είναι μοναδικό στον πίνακα
- Οι τιμές που λαμβάνουν οι στήλες προέρχονται από έναν μοναδικό τομέα
- Δεν υπάρχει αντίληψη της σειράς άρα οι σειρά των στηλών δεν επηρεάζει το νόημα των δεδομένων
- Οι τιμές που λαμβάνουν οι στήλες προέρχονται από έναν και μοναδικό τομέα. Το αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας είναι η ετερογένεια των σχέσεων των στηλών.

Όπως και στις στήλες έτσι και στις γραμμές στις σχεσιακές βάσεις δεδομένων εμφανίζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Ύπαρξη μιας και μόνο τιμής σε κάθε στήλη και σειρά διότι οι σχέσεις δεν μπορούν να λάβουν ιδιότητες με πολλαπλές τιμές
- Ύπαρξη μοναδικότητας διότι δεν μπορούν να υφίσταται ίδιες σειρές σε μια σχέση
- Ύπαρξη ενός και μόνο κυρίως κλειδιού
- Από την θέση της σειράς δεν επηρεάζονται τα δεδομένα [24]

3.2.2 No-SQL

Η μη σχεσιακές βάσεις δεδομένων είναι βάσεις οι οποίες δεν χρησιμοποιούν πίνακες για την αποθήκευση των δεδομένων τους. Οι βάσεις αυτές διαθέτουν διάφορους τύπους οι οποίοι βασίζονται στον τύπο δεδομένων που επεξεργάζονται. Οι κύριοι τύποι που αποτελούν αυτές τις βάσεις δεδομένων είναι:

- Εγγράφων
- Ευρειών στηλών και γραμμών
- Κυρίως κλειδιού

Τέλος παρέχονται εύχρηστα σχήματα και επεκτείνονται αρκετά ευκολά με την ύπαρξη μεγάλου όγκου δεδομένων και χρηστών. Το όνομα που αποδίδεται σε αυτές τις βάσεις δεδομένων είναι το No-SQL (No Structured Query Language). Η βάση η οποία χρησιμοποιεί τον τρόπο του κύριου κλειδιού λειτουργεί με την ανάθεση ενός μοναδικού κλειδιού στις σε κάθε μια τιμή δεδομένων. Η αποθήκευση τους πραγματοποιείται σε ένα μπλοκ όπου ανακτώνται με την χρήση του εκάστοτε κλειδιού που ανατέθηκε στην τιμή η οποία ζητείται. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου βάσης είναι η ταχύτητα αναζήτησης και στην μη ύπαρξη περιορισμού στον τύπο των δεδομένων. Για την δημιουργία της λειτουργίας αναζήτησης ο χρήστης πρέπει να κατασκευάσει ευρετήριο στα οποία τα κλειδιά συνδέονται με το κείμενο ή φράση που έχει δημιουργηθεί στο ευρετήριο και η διαδικασία της αναζήτησης διεξάγεται εντός του ευρετηρίου. Τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν αυτού του τύπου βάσεων δεδομένων είναι η ταχύτητα στην ανάκτηση των δεδομένων. Ο τύπος βάσης δεδομένου εγγράφου ομοιάζει με μια την βάση δεδομένου τύπου κυρίως κλειδιού αλλά διαφέρει στο τύπο των πληροφοριών οι οποίες αποθηκεύονται. Στην τύπου εγγράφου αποθηκεύονται έγγραφα τα οποία κατασκευάστηκαν από ξεχωριστά μέρη που ονομάζονται δεδομένα. Επίσης, τα έγγραφα μπορούν να περιέχουν μέσα τους και άλλα έγγραφα. Η αναζήτηση τους πραγματοποιείται με την δημιουργία ευρετηρίων που περιέχουν τα στοιχεία των εγγράφων. Αυτού του τύπου βάσεις δεν διαθέτουν σχήμα άλλα κάθε αρχείο διαθέτει ένα κλειδί το οποίο διαθέτει μοναδική τιμή ώστε το κάθε έγγραφο μπορεί να αναγνωριστεί μέσω αυτού. Στις βάσεις δεδομένων τύπου στηλών αρχικά φαίνονται σαν μια σχεσιακή βάση δεδομένων. Η λειτουργία αυτής της βάσης πραγματοποιείται με την χρήση γραμμών και στηλών ενώ η διαχείριση της πραγματοποιείται με μια γλώσσα η οποία είναι τύπου SQL. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές διαφορές με μια SQL η κυριότερη από αυτές είναι η μη υποστήριξη συνδέσμων. Σε μια σχεσιακή βάση όπως έχει προαναφερθεί κάθε πίνακας διαθέτει μια συγκεκριμένη δομή η οποία είναι ότι κάθε σειρά διαθέτει χώρο για κάθε στήλη κάτι το οποίο σε αυτή την βάση δεν ισχύει διότι η βασική μονάδα αποθήκευσης των δεδομένων αποτελείται από την στήλη και όχι από την γραμμή. Η στήλη διαθέτει το όνομα με το οποίο αναγνωρίζεται η κάθε σειρά που περιέχεται στην γραμμή και το περιεχόμενο αυτής της τιμής είναι ένα timestamp. Το timestamp δεν πραγματοποιεί μόνο την χρονική σύνδεση των δεδομένων αλλά παράλληλα διευκολύνεται η διαγραφή και η διατήρηση πολλαπλών εκδόσεων των ίδιων δεδομένων ώστε να εντοπίζονται ευκολότερα αλλαγές κατά την διάρκεια του χρόνου. Τέλος, το πλεονέκτημα των βασισμένο σε στήλες βάσεων δεδομένων είναι η ταχύτητα στην άθροιση, στην εξαγωγή και στην περίληψη των δεδομένων [24].

3.2.3 Time Series DataBases

Η χρονική σειρά είναι μια διαδοχική σειρά τιμών μιας μεταβλητής χωρισμένης σε ίσα χρονικά διαστήματα. Τέτοιου είδους ακολουθίες χαρακτηρίζονται ως διακριτού χρόνου. Οι μετρήσεις οι οποίες διαφοροποιούνται με βάση το χρονικό διάστημα και μέσω εξάγονται χρήσιμες πληροφορίες και συμπεράσματα μέσω της αναγνώρισης των μοτίβων αποτελούν δεδομένα τα οποία βασίζονται στην χρονική σειρά. Η χρήση των δεδομένων των χρονικών σειρών χρησιμοποιούνται σε διάφορες συνθήκες οι σημαντικότερες από αυτές αυτών είναι:

- Η χρονική σειριακή ανάλυση
- Η παλινδρομική ανάλυση
- Η σειριακή χρονική πρόβλεψη

Στην χρονική σειριακή ανάλυση η αξιοποίηση των δεδομένων πραγματοποιείται με σκοπό την εξερεύνηση των αλλαγών της μεταβλητής σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Στην παλινδρομική ανάλυση αξιοποιούνται οι αλλαγές που επηρεάζουν μια συγκεκριμένη μεταβλητή η οποία με την προκαλεί αλλαγές σε άλλες μεταβλητές την ίδια χρονική περίοδο. Τέλος, στην σειριακή πρόβλεψη χρησιμοποιούνται πληροφορίες που σχετίζονται με τις ιστορικές τιμές των μεταβλητών και τα συσχετιζόμενα μοτίβα ώστε να προβλεφθούν μελλοντικές ενέργειες. Η TSDB (Time Series DataBase) είναι ένας τύπος βάσης δεδομένων με το οποίο βελτιστοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων τύπου χρονικής σειράς. Ειδικεύεται στην διαχείριση των μετρήσεων, των γεγονότων και οποιονδήποτε άλλων μετρήσεων οι οποίες σχετίζονται μεταξύ τους με την χρονική σειρά. Μερικές από τις ιδιότητες που παρέχονται στον χρήστη από αυτή την βάση δεδομένων είναι : η αρίθμηση, η δημιουργία, η αναβάθμιση, η καταστροφή και η οργάνωση δεδομένων στην βέλτιστη χρονική σειρά. Οι TSDB διαθέτουν αρκετές ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται από τον τύπο των δεδομένων που αποθηκεύονται σε αυτές οι οποίες είναι:

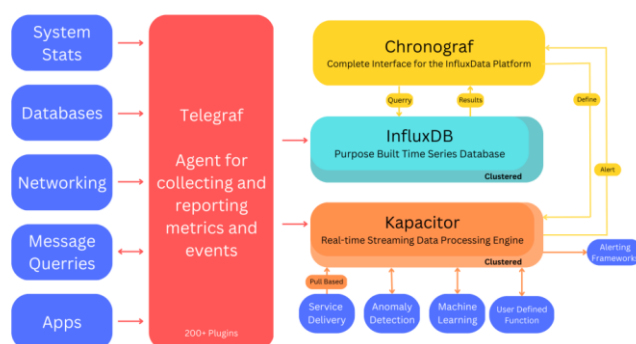
- Τοποθεσία των δεδομένων
- Γρήγορες και ευρείες ερωτήσεις
- Υψηλή απόδοση στην εισαγωγή των δεδομένων
- Συμπίεση των δεδομένων
- Επεκτασιμότητα
- Χρησιμότητα

Όταν τα συσχετιζόμενα δεδομένα δεν βρίσκονται αποθηκευμένα στο ίδιο φυσικό μέσο αποθήκευσης, αυξάνεται ο χρόνος λήψης της απάντησης που τίθεται από τον χρήστη αυτό οδηγεί στην υπέρβαση του χρονικού ορίου λήψης απάντησης. Για αυτό τον λόγο τα δεδομένα σε μια TSDB κατατάσσονται ανάλογα με τον τύπο τους στο ίδιο φυσικό cluster και στο ίδιο χρονικό εύρος ώστε να ελαχιστοποιείται η οποιαδήποτε καθυστέρηση που μπορεί να προκύψει. Η ομαδοποίηση όμοιων δεδομένων που συσχετίζονται μεταξύ τους πραγματοποιείται για την διασφάλιση της ταχύτητας στην απάντηση των ερωτήσεων. Σε αρκετές περιπτώσεις στις συνηθισμένες βάσεις

δεδομένων παράγεται ένα ευρετήριο από τα σφάλματα της μνήμης λόγω του μεγάλου όγκο δεδομένων που διαχειρίζονται για την μείωση των φαινομένων που επηρεάζουν την απόδοση. Το κύριο πρόβλημα που επιλύεται από αυτές τις βάσεις είναι η υψηλή απόδοση κατά την εγγραφή των δεδομένων. Οι TSDB διασφαλίζουν υψηλή διαθεσιμότητα, απόδοση σε όλες τις ενέργειες εγγραφής και ανάγνωσης δεδομένων κατά την διάρκεια υψηλής κίνησης στην βάση επειδή απαιτείται εγγραφή και ανάγνωση των δεδομένων κάθε δευτερόλεπτο ή και σε ακόμα μικρότερο διάστημα. Λόγω της πυκνής καταγραφής των δεδομένων απαιτούνται αποδοτική αλγόριθμοι συμπίεσης τους για την βέλτιστη εξοικονόμηση πόρων και χώρου αποθήκευσης του συστήματος. Όσο πιο πίσω χρονικά βρίσκονται τα δεδομένα τόσο η χρησιμότητα τους ελαχιστοποιείται οπότε οι TSBD παρέχοντας τέτοιου είδους υπηρεσίες βελτιστοποιείται η λειτουργικότητα τους. Η συνεχής αύξηση στην αποστολή δεδομένων αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Οι συμβατικές λύσεις που παρέχονται από τις συνηθισμένες βάσεις δεδομένων δεν ανταπεξέρχονται και δεν αντέχουν αυτήν την επεκτασιμότητα που απαιτείται ώστε να παραμείνουν λειτουργικές. Η TSDB σχεδιάστηκαν με γνώμονα την επεκτασιμότητα εισάγοντας λειτουργίες οι οποίες εστιάζουν στον χρόνο. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η απόδοση ενώ παράλληλα αυξάνεται ο ρυθμός εισροής δεδομένων, επιταχύνεται η απάντηση στις ερωτήσεις και πραγματοποιείται αποτελεσματικότερη συμπίεση των δεδομένων. Οι βάσεις αυτές περιλαμβάνουν λειτουργίες και διαδικασίες με τις οποίες αναλύονται συστηματικά σειριακά χρονικά δεδομένα. Με την χρήση τεχνικών διατήρησης δεδομένων, διενέργεια συνεχών ερωτήσεων και στην χρονική ελαστικότητα που παρέχεται αυξάνεται η χρησιμότητα τους και βελτιστοποιείται η εμπειρία του χρήστη [25].

3.2.3.1 InfluxDB

Η TSDB (Time Series DataBase) βάση δεδομένων InfluxDB είναι μια ανοιχτού κώδικα μη δομημένη χρονικής σειράς βάση δεδομένων στην οποία διατίθενται προαιρετικά προγράμματα κλειστού κώδικα. Γράφτηκε με την γλώσσα προγραμματισμού GO με την οποία βελτιστοποιείται η διαχείριση δεδομένων χρονοσειρών. Επίσης, παρέχεται παρόμοιο είδος ερωτήσεων όπως στην γλώσσα SQL. Το λογισμικού ανοιχτού κώδικα στο οποίο στηρίζεται η InfluxDB ονομάζεται στοίβα Telegraf, InfluxDB, Chronograf, Kapacitor (TICK). Στο TICK παρέχεται μια πλήρη χρονική σειριακή βάση δεδομένων με ποικίλες υπηρεσίες οι οποίες περιλαμβάνουν την βάση της καθώς και διάφορες υπηρεσίες οι οποίες λειτουργούν στο νέφος. Οι υπηρεσίες κλειστού κώδικα IE και IC παρέχουν επιπλέον λειτουργίες από την βασική έκδοση όπως υψηλότερη διαθεσιμότητα, επεκτασιμότητα, σημεία επαναφοράς και backup. Στην Εικόνα 3.6 περιγράφεται η λειτουργία του TICK stack καθώς και τα προγράμματα που προσφέρονται από την εταιρία της InfluxDB για αυτό το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε από αυτήν.



Εικόνα 3.6 TICK stack

Η πιο σημαντική παράμετρος στις χρονικές βάσεις δεδομένων καθώς και στην InfluxDB είναι ο χρόνος. Η στήλη του χρόνου περιλαμβάνεται σε όλες τις εκδόσεις διότι εκεί αποθηκεύονται τα διακριτά στίγματα του χρόνου με βάση τα οποία σχετίζονται τα δεδομένα. Οι υπόλοιπες δυο στήλες ονομάζονται πεδία ή χαρακτηριστικά. Κάθε πεδίο περιγράφεται από ένα κλειδί πεδίου και από μια τιμή πεδίου. Οι τιμές των πεδίων είναι δεδομένα τα οποία συνδέονται με την χρήση ενός χρονικού αποτυπώματος. Καθένα από αυτά τα κλειδιά πεδίου σχετίζονται με ένα ζευγάρι το οποίο ονομάζεται σετ πεδίου. Η τοποθεσία και οι στήλες των οδών ονομάζονται ετικέτες. Κάθε ζευγάρι τιμών ετικετών ονομάζεται σετ ετικετών. Η διαφορά που συναντάται ανάμεσα στα πεδία και στις ετικέτες είναι ότι οι δεύτερες βρίσκονται σε μορφή ευρετηρίου το οποίο της καθιστά ταχύτερες στην απάντηση ερωτήσεων από ότι στα πεδία που δεν διατίθεται αυτή η ιδιότητα. Παρατηρείται ότι το κύριο κλειδί αποτελείται από ένα timestamp και ένα tag. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελούν οι μετρήσεις οι οποίες αποτελούν το τεχνικό μέρος του περιεχομένου του πεδίου. Η πολιτική διατήρησης δεδομένων περιγράφεται από το χρονικό διάστημα κατά το οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα και τα αντίγραφα αυτών σε clusters από την InfluxDB. Η προεπιλεγμένη πολιτική διατήρησης των δεδομένων με άπειρη χρονική διάρκεια και χωρίς αντιγραφή ονομάζεται autogen, στην οποία η διάρκεια της είναι άπειρη και ο παράγοντας αντιγραφή παίρνει την τιμή 1. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτής της βάσης δεδομένων είναι οι σειρές. Οι σειρές αποτελούνται από δεδομένα τα οποία διαθέτουν κοινή πολιτική διατήρησης,

μετρήσεις και σετ ετικετών. Ως σημείο ορίζεται το σετ του πεδίου που βρίσκεται στην ίδια σειρά με ένα συγκεκριμένο timestamp όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 3.7 [23].

table	_measurement	_field	_value	_start	_stop	_time
mean	group string	group string	no group double	group dateTime:RFC3339	group dateTime:RFC3339	no group dateTime:RFC3339
0	Power	value	216.5	2024-02-11T17:26:23.916Z	2024-02-11T17:31:23.916Z	2024-02-11T17:27:10.000Z
0	Power	value	216.3	2024-02-11T17:26:23.916Z	2024-02-11T17:31:23.916Z	2024-02-11T17:28:10.000Z
0	Power	value	217.6	2024-02-11T17:26:23.916Z	2024-02-11T17:31:23.916Z	2024-02-11T17:29:10.000Z
0	Power	value	217	2024-02-11T17:26:23.916Z	2024-02-11T17:31:23.916Z	2024-02-11T17:30:10.000Z

Εικόνα 3.7 Δομή InfluxDB

Η InfluxDB διαθέτει αρκετές λειτουργίες για την διευκόλυνση της αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων:

- Κατακερματισμός
- Αποθήκευση δεδομένων

Το φαινόμενο του κατακερματισμού αποτελεί τον οριζόντιο χωρισμό των δεδομένων σε μια βάση. Κάθε χωρισμός των δεδομένων ονομάζεται κατακερματισμός. Σε αυτή την βάση δεδομένα τα δεδομένα αποθηκεύονται με αυτή την τεχνική η οποία οργανώνεται από την πολιτική ανάκτησης δεδομένων όπου τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε timestamps που διαθέτουν συγκριμένο χρονικό όριο. Το μέγεθος του περιθωρίου αυτού εξαρτάται από την πολιτική ανάκτησης που έχει οριστεί από τον χρήστη. Η προκαθορισμένη πολιτική ανάκτησης εξαρτάται από τον ρυθμό αποστολής των δεδομένων στην βάση. Όσο αφορά την αποθήκευση δεδομένων χρησιμοποιείται από την InfluxDB δική της δομή η οποία ονομάζεται Time-Structured Merge Tree (TSM) tree. Η πρώτη δομή αποθήκευσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η level db που βασίζεται πάνω στην τεχνολογία log structure merge tree η οποία βελτιστοποιεί την διακίνηση στην γραφή των δεδομένων και έχει ενσωματωμένη την λειτουργία συμπίεσης αρχείων. Το μειονέκτημα αυτής της λύσης ήταν ότι δεν διέθετε την ικανότητα για backup των δεδομένων το οποίο κατά επέκταση σήμαινε ότι για την δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας έπρεπε η βάση δεδομένων να κλείσει. Για την επίλυση των θεμάτων αυτών δημιουργήθηκαν η hyperlevel db και η Rockdb οι οποίες βασίζονταν στην αρχιτεκτονική τύπου Log-structured merge (LSM) tree. Το κύριο μειονέκτημα όμως αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι η διαδικασία διαγραφής των δεδομένων ήταν χρονικά δαπανηρή και δύσκολη. Τελικά η λύση δόθηκε με την χρήση του TSM tree το οποίο βασίζεται στην αρχιτεκτονική LSM και χρησιμοποιείται για την ευρητήριο με την τεχνική write ahead log [25].

3.3 Τεχνολογίες Επικοινωνιών και Ασφάλεια στο ΔτΠ

Το ΔτΠ είναι το περιβάλλον στο οποίο όλες οι συσκευές βρίσκονται συνδεδεμένες στο διαδίκτυο για την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που παρέχουν οποιαδήποτε στιγμή απαιτηθεί καθώς και την λήψη δράσης από τις συσκευές αυτές. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό υπολογιστικών συσκευών που διαθέτουν πρόσβαση στο διαδίκτυο μερικές από αυτές είναι:

- Αισθητήρες
- Ολοκληρωμένες μονάδες επεξεργασίας
- Αντικείμενα καθημερινής όπως μια έξυπνη σκούπα

Τα χαρακτηριστικά τα οποία περιλαμβάνονται στο ΔτΠ είναι: Το κάθε αντικείμενο που εμπεριέχεται σε αυτό διαθέτει μια μοναδική ταυτότητα και εικονική προσωπικότητα, Χρήση έξυπνων διεπαφών για την διεξαγωγή επικοινωνίας εντός του περιβάλλοντος που βρίσκονται, το περιβάλλον επικοινωνίας είναι και αυτό έξυπνο όπως και η συσκευές που περιλαμβάνονται σε αυτό και στην ύπαρξη διαρκής σύνδεσης μεταξύ ανθρώπων και συσκευών οποιαδήποτε στιγμή σε οποιοδήποτε τοποθεσία. Επιπλέον, στο ΔτΠ υπάρχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

- Αρχιτεκτονική
- Νοημοσύνη
- Πολυπλοκότητα
- Επεκτασιμότητα
- EaaS (Everything as a Service)

Η επίτευξη ασφαλούς επικοινωνίας αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα για ασφάλεια των δεδομένων και για την ιδιωτικότητα των διακινούμενων δεδομένων. Οι περιορισμοί που τίθενται από την συλλογή, την αποθήκευση και την ανταλλαγή δεδομένων πρέπει να προφυλάσσουν την ιδιωτικότητα των προσωπικών αρχείων. Η βελτιστοποίηση της ασφάλειας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζεται στο ΔτΠ όσο εκείνο ενσωματώνεται ολοένα και περισσότερο στην καθημερινή ζωή. Με την ραγδαία αύξηση επιβάλλεται η χρήση μεθόδων ασφαλείας που αποτρέπουν την κλοπή των δεδομένων. Η εφαρμογή των ήδη υπαρχών λύσεων δεν είναι τόσο εύκολη όσο ακούγεται λόγω του περιορισμού της υπολογιστικής δύναμης που διαθέτουν οι συσκευές που περιέχουν αυτή την τεχνολογία. Οι κρισιμότεροι περιορισμοί κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι: ο περιορισμός που διαθέτουν από το υλικό τους δηλαδή η μικρή υπολογιστική δύναμη, μικρή χωρητικότητα μνήμης και οι περιορισμοί στην ενεργειακή κατανάλωση, περιορισμοί που βασίζονται στο λογισμικό δηλαδή μη ύπαρξη προγραμμάτων ασφαλείας και περιορισμούς από το λογισμικό του ενσωματωμένου συστήματος και στους περιορισμούς δικτύου οι οποίοι είναι: η επεκτασιμότητα, κινητικότητα και η ύπαρξη δυναμικών περιβαλλόντων επικοινωνίας. Παρόλο που χρόνο με τον βελτιώνεται η ασφάλεια των συσκευών το ΔτΠ παρουσιάζει αδυναμίες οι οποίες βρίσκονται παντού διότι πάντα κάποιος κακόβουλης χρήστης προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση στα δεδομένα της συσκευής και να τα επηρεάσει. Χωρίς, την χρήση κατάλληλων μέτρων ασφαλείας το δίκτυο των συσκευών καθίσταται ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις οι οποίες τις περισσότερες φορές δεν είναι ορατές δια γυμνού οφθαλμού. Οι κίνδυνοι που καθιστούν ευάλωτες τις συσκευές αυτές είναι [26]:

- Περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες
- Ετερογένεια στην τεχνολογία μεταφοράς δεδομένων
- Ύπαρξη τρωτών σημείων στις συσκευές είτε υλικού είτε λογισμικού
- Μη εφαρμογή τεχνικών ασφαλείας από τους χρήστες
- Αδύναμη ασφάλεια συσκευής

Οι τύποι των επιθέσεων που διεξάγονται από τους κακόβουλους χρήστες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Φυσικές
- Επίθεση στην κωδικοποίηση
- Επίθεση στο δίκτυο
- Επίθεση κατά την μεταφορά της πληροφορίας
- Επιθέσεις στο λογισμικό

Ορίζεται ως τεχνολογία των επικοινωνιών, η χρήση μέσων και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά, την ανταλλαγή και την επικοινωνία πληροφοριών ανάμεσα σε ανθρώπους, συσκευές ή συστήματα. Οι απαιτήσεις που απαιτούνται να καλυφθούν για την ύπαρξη ενός ασφαλούς δικτύου πληροφοριών είναι στην διασφάλιση της ασφαλούς κινητικότητας και μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο, ασφάλεια που παρέχεται από τις τεχνολογίες επικοινωνιών με την διασφάλιση της μικρότερης έκθεσης του σήματος όσο περισσότερο γίνεται. Επιπρόσθετα, η ποικιλομορφία που εμφανίζεται στην κατασκευή των συσκευών ως προς την χρήση διαφορετικών εξαρτημάτων, η επεκτασιμότητα η οποία με την ραγδαία αύξηση του πλήθους των συσκευών δεν είναι δυνατή η παρακολούθηση της κάθε συσκευής. Λύση σε αυτά τα προβλήματα με την χρήση πιστοποιημένων εφαρμογών, δημιουργία ασφαλούς API και ανάλυση των δεδομένων [27]. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συνδεσιμότητα και την επικοινωνία στο πλαίσιο του ΔτΠ. Ορισμένες από αυτές περιλαμβάνουν:

- Wi-Fi
- Bluetooth
- Zigbee και Z-Wave
- 4G/5G
- Συσκευές RFID (Radio-Frequency Identification)

Τεχνολογίες Διαμοιρασμού Δεδομένων:

- MQTT
- CoAP

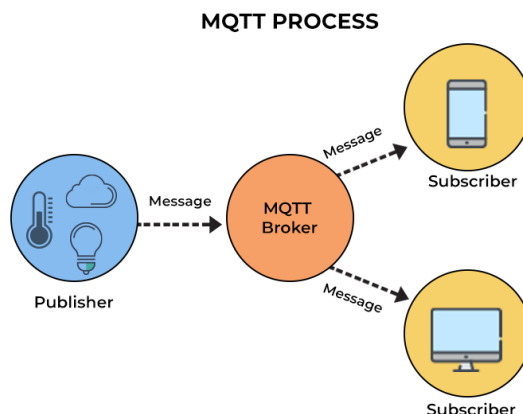
Τεχνολογίες Αισθητήρων και Ενσωματωμένων Συστημάτων:

- Αισθητήρες
- RFID Tags

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η απόσταση επικοινωνίας, η κατανάλωση ενέργειας, ο όγκος των δεδομένων και οι απαιτήσεις ασφαλείας.

3.3.1 MQTT

Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) πρωτόκολλο δημιουργήθηκε από την IBM το 1999 το οποίο βασίζεται στο μοντέλο Publisher Subscriber. Σχεδιάστηκε ώστε να αποστέλλονται δεδομένα με ακρίβεια σε δίκτυα τα οποία διαθέτουν μεγάλη χρονική καθυστέρηση και χαμηλό εύρος φάσματος. Στην Εικόνα 3.8 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός MQTT συστήματος [28].



Εικόνα 3.8 Αρχιτεκτονική MQTT

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου MQTT χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη την πλευρά του πελάτη και του Broker. Η πλευρά του πελάτη αποτελείται από τις παρακάτω ιδιότητες:

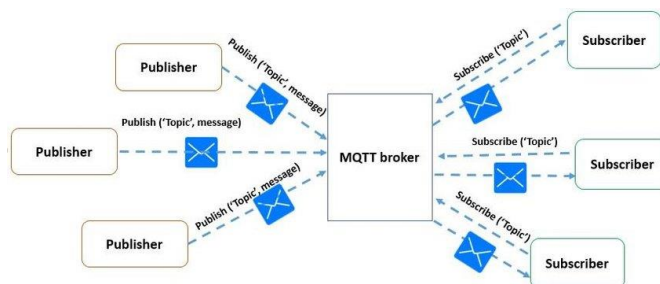
- Είναι είτε Publisher είτε Subscriber ή και τα δύο ταυτόχρονα
- Δημοσίευση μηνυμάτων στους ενδιαφερομένους χρήστες
- Εγγραφή σε οποιοδήποτε θέμα που επιθυμείτε η λήψη μηνυμάτων
- Απεγγραφή από ένα θέμα ώστε να εγγραφεί σε ένα άλλο
- Αποσύνδεση από τον Broker

Ο Broker αποτελεί το κύριο τμήμα της αρχιτεκτονικής Pub/Sub, διότι είναι ο συνδετικός σύνδεσμος ανάμεσα στους Publishers και στους Subscribers. Είναι υπεύθυνοι για την διαδικασία της εγγραφής, την διενέργεια συνεδριών, την διατήρηση μηνυμάτων και γενικότερα της διατήρησης της ασφάλειας υλοποιώντας της διαδικασία έγκρισης και πιστοποίησης. Από την πλευρά του Broker ελέγχεται η διανομή της πληροφορίας και ευθύνεται κυρίως για την λήψη μηνυμάτων από τους Publishers ώστε να φιλτραριστούν κατάλληλα, να αποφασιστεί ποιοι ενδιαφέρονται για την λήψη αυτών και την αποστολή των μηνυμάτων σε όλους τους εγγεγραμμένους χρήστες. Οι ιδιότητες που διαθέτουν οι Brokers είναι:

- Δέχονται τα μηνύματα των πελατών
- Λήψη δημοσιοποιημένων μηνυμάτων των χρηστών
- Επεξεργασία διαφορετικών αιτημάτων όπως η εγγραφή και απεγγραφή χρηστών από ένα θέμα
- Δημοσιοποίηση των μηνυμάτων των εκδοτών προς τους ενδιαφερόμενους χρήστες

Το πρωτόκολλο Publisher Subscriber λειτουργεί ως εξής: Δημοσιοποιούνται από τον Publisher τα μηνύματα σε θέματα τα οποία ονομάζονται topics που διαθέτουν την ιδιότητα χαρακτηρισμού του αποσπελλόμενου μηνύματος. Για την λήψη των μηνυμάτων αυτών από οποιοδήποτε ενδιαφερόμενο Subscriber πρέπει να εγγραφεί στο συγκεκριμένο θέμα. Με την εγγραφή στα θέματα

διασφαλίζεται ότι στα δεδομένα αυτά διατίθεται πρόσβαση μόνο στο κάθε εγγεγραμμένο Subscriber του κάθε θέματος. Από την άλλη πλευρά οι Subscribers μπορούν να δημοσιοποιήσουν μηνύματα σε θέματα με τέτοιο τρόπο ώστε και άλλοι Subscribers να διαθέτουν την δυνατότητα πρόσβασης στα μηνύματα αυτού του θέματος. Τα θέματα αποτελούνται από δύο ειδικούς χαρακτήρες μπαλαντέρ οι οποίοι δείχνουν στον MQTT Broker την επιθυμία εγγραφής σε ένα θέμα. Με την χρήση του χαρακτήρα μπαλαντέρ '+' υποδηλώνεται η επιλογή ενός συγκεκριμένου θέματος ενώ με την χρήση του χαρακτήρα '#' υποδηλώνεται ότι ο εγγεγραμμένος ακούει όλα τα θέματα που υπάρχουν στον Broker. Στην Εικόνα 3.9 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του μοντέλου Publisher Subscriber [28].



Εικόνα 3.9 Αρχιτεκτονική Pub/Sub

Οι ιδιότητες που διατίθενται στο MQTT πρωτόκολλο είναι:

- Διατήρηση μηνυμάτων (Retain messages)
- Διασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας QoS (Quality of Service)
- Μήνυμα διαθήκης (Last will message)
- Ελαφρύ πρωτόκολλο (lightweight protocol) κατάλληλο για επικοινωνίες χαμηλής ρυθμού μετάδοσης (π.χ. Δορυφορικές επικοινωνίες)

Τα μηνύματα διαγράφονται από τον Broker εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η διανομή τους σε όλους τους πελάτες. Εξαιρέση αποτελούν τα διατηρημένα μηνύματα. Στα θέματα (topics) που υπάρχουν διατηρημένα μηνύματα οι νέοι Subscribers θα ενημερωθούν με τα μηνύματα αυτά εφόσον εκκινήσουν μια νέα συνεδρία. Η διασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας χρησιμοποιείται για την ύπαρξη ενός προτύπου στην αποστολή και παράδοση των δεδομένων ανάμεσα σε Publisher και Subscriber. Τα επίπεδα που υποστηρίζονται είναι τρία και είναι:

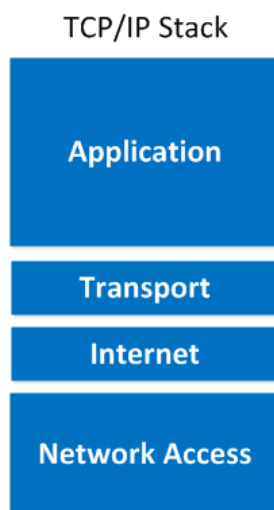
- QoS 0: Το μήνυμα αποστέλλεται το πολύ μια φορά και δεν παρέχονται εγγυήσεις για την παράδοση του μηνύματος
- QoS 1: Το μήνυμα στέλνεται τουλάχιστον μια φορά και μπορεί να αποσταλθεί περισσότερες φορές αλλάζοντας την τιμή του duplicate flag από 0 σε 1
- QoS 2: Σε αυτό το επίπεδο το μήνυμα αποστέλλεται ακριβώς μια φορά με την χρήση της χειραψίας 4-way handshake

Η επιλογή του QoS εξαρτάται από την μέθοδο αποστολής δεδομένων αν αυτή είναι συνεχής ή όχι και στην ύπαρξη καθυστερήσεων. Κατά την διαδικασία συσχέτισης Broker με Subscriber εκείνη μονιμοποιείται ακόμα και όταν η τιμή της δεν είναι σωστή. Σε αυτή την περίπτωση τα μηνύματα που διαθέτουν το υψηλότερο QoS αποστέλλονται με την εδραίωση της σύνδεσης. Αρκετές φορές ένας πελάτης ενημερώνει τον Broker με την χρήση ενός μηνύματος τερματισμού το οποίο διανέμεται στο θέμα ή στα θέματα τα οποία υπάρχει το ενδεχόμενο αποσύνδεσης. Το μήνυμα αυτό ονομάζεται μήνυμα διαθήκης και είναι σημαντικά διότι διαθέτουν δικλείδες ασφαλείας από τις οποίες ενημερώνεται το σύστημα για την διακοπή λειτουργίας.

3.3.1.1 MQTT over TCP

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT χρησιμοποιεί για την αποστολή μηνυμάτων μεταξύ συσκευών M2M το επίπεδο TCP. Το TCP αποτελείται από μια πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας τα οποία χρησιμοποιούνται για την σύνδεση συσκευών μέσω διαδικτύου. Οι εφαρμογές που υποστηρίζονται από το πρωτόκολλο TCP είναι: το πρωτόκολλο HTTP και το πρωτόκολλο Transport Layer Security (TLS). Η ιδιότητα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ο καθορισμός της μεταφοράς των δεδομένων παρέχοντας επικοινωνία από άκρο σε άκρο από την οποία αναγνωρίζονται οι τρόποι με τους οποίους πρέπει να χωριστούν, την λήψη της κατάλληλης διεύθυνσης, της μετάδοσης, της δρομολόγησης και άφιξης των πακέτων στον τελικό προορισμό τους. Απαιτείται ελάχιστη κεντρική διαχείριση και είναι σχεδιασμένο ώστε τα δίκτυα να ανακτώνται αυτόματα μετά την ύπαρξη διαφόρων σφαλμάτων. Επιπλέον το πρωτόκολλο αυτό διαχειρίζεται τον ορισμό των καναλιών επικοινωνίας σε ένα δίκτυο, την δημιουργία πακέτων τα οποία περιέχουν το μήνυμα προτού την μετάδοση του και στην συναρμολόγηση του. Το επίπεδο αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά επίπεδα που απεικονίζονται στην Εικόνα 3.10 τα οποία είναι [29]:

- Επίπεδο Πρόσβασης δικτύου
- Επίπεδο Διαδικτύου
- Επίπεδο Μεταφοράς
- Επίπεδο Εφαρμογής



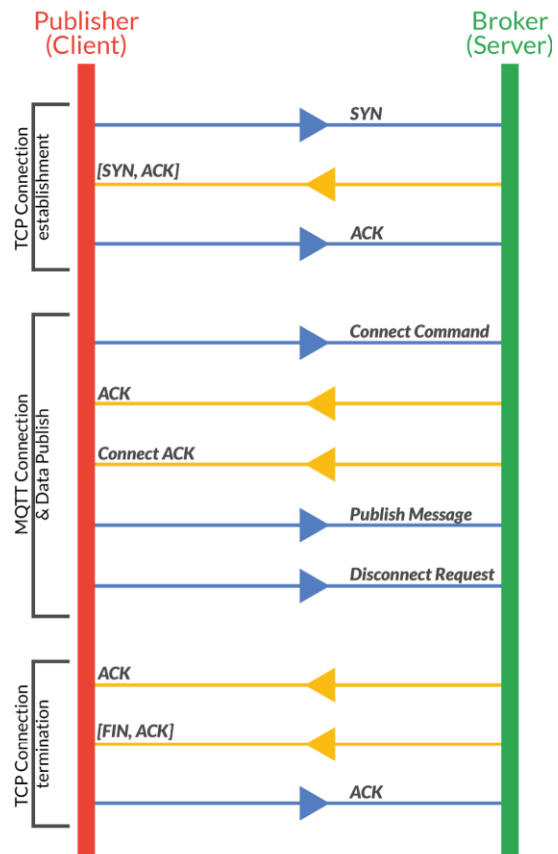
Εικόνα 3.10 TCP/IP Stack

Η επικοινωνία MQTT με την χρήση του πρωτοκόλλου TCP διεξάγεται σε τρία στάδια τα οποία είναι:

- Εγκαθίδρυση της TCP επικοινωνίας
- Δημοσίευση δεδομένων Publisher μέσω του πρωτοκόλλου MQTT
- Ο τερματισμός σύνδεσης

Η δημιουργία TCP/IP πραγματοποιείται με την χρήση της τριπλής χειραψίας. Αρχικά ο Publisher στέλνει το μήνυμα του συγχρονισμού SYN στον Broker. Μετά την επιτυχή λήψη του μηνύματός ο Broker στέλνει ένα μήνυμα συγχρονισμού και επιβεβαίωσης στον εκδότη (SYN, ACK) όπου εκείνος στην συνέχεια θα στείλει ACK. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την αποστολή 3 πακέτων μεταξύ εκδότη και Broker. Ο Publisher ενημερώνει τον Broker ότι επιθυμεί την επικοινωνία μεταξύ τους στέλνοντας το πακέτο στο οποίο οι τιμές των SYN και ACK είναι 1 και 0 αντίστοιχα. Έπειτα μετά τη λήψη του πακέτου αιτήματος σύνδεσης, ο Broker στέλνει το πακέτο επιβεβαίωσης με τιμές του SYN σε 1 και ACK σε 1 ώστε ο Publisher να γνωρίζει ότι ο Broker έλαβε το πακέτο επικοινωνίας από εκείνον και είναι έτοιμος για την εγκαθίδρυση της επικοινωνίας. Τέλος, ο Publisher απαντά στο πακέτο που έλαβε από τον Broker με την αποστολή ενός πακέτου επιβεβαίωσης στο οποίο ορίζονται οι τιμές των SYN και ACK σε 0 και 1 αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο ενημερώνεται ο Broker ότι παραλήφθηκε από τον εκδότη το μήνυμα επιβεβαίωσης που το αποστάλθηκε και μπορεί να διεξαχθεί επικοινωνία. Για την μετάδοση των δεδομένων μεταξύ τους απαιτείται η επιτυχής ολοκλήρωση της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω. Εφόσον η διαδικασία της TCP χειραψίας ολοκληρώθηκε επιτυχώς, το πρώτο πακέτο που αποστέλλεται από τον εκδότη στον Broker είναι το πακέτο της σύνθεσης με το οποίο πραγματοποιείται η σύνδεση του εκδότη με τον Broker. Μετά την παραλαβή του αιτήματος σύνδεσης, ο Broker στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης στον εκδότη γνωστοποιώντας ότι ο Broker έχει λάβει επιτυχώς το μήνυμα που έχει αποστείλει ο Publisher και είναι διαθέσιμος για την διεξαγωγή επικοινωνίας. Μόλις ληφθεί το πακέτο επιβεβαίωσης από τον Broker στον εκδότη τότε εκείνος δημοσιεύει μηνύματα. Μετά τη δημοσίευση, ο Publisher του μηνύματος αποσυνδέεται από τον Broker με την αποστολή του πακέτου που περιέχει το μήνυμα αποσύνδεσης. Η περιγραφόμενη χειραψία διεξάγεται στο επίπεδο QOS 0. Για τον τερματισμό της χειραψίας διεξάγεται η διαδικασία της συμμετρικής απελευθέρωσης. Η σύνθεση τερματίζεται όταν ο Publisher και ο Broker στείλουν και οι δυο πακέτο το οποίο περιέχει το FIN Flag σε 1. Ο Publisher για να τερματίσει την επικοινωνία με τον διακομιστή, στέλνει ένα πακέτο αιτήματος αποσύνδεσης με FIN Flag σε 1, υποδεικνύοντας έτσι ότι επιθυμεί τον τερματισμό της επικοινωνίας. Μετά τη λήψη του πακέτου αιτήματος αποσύνδεσης, ο Broker αποστέλλει δυο διαφορετικά πακέτα. Το πρώτο πακέτο αποτελεί το πακέτο επιβεβαίωσης τερματισμού της επικοινωνίας με περιεχόμενο ACK σε 1 στον πελάτη, ενημερώνοντας τον έτσι ότι έχει λάβει το μήνυμα τερματισμού σύνθεσης. Το δεύτερο πακέτο αποτελεί τον τερματισμό της σύνδεσης και περιέχει τα στοιχεία FIN σε 1 και ACK σε 1 δηλώντας του ότι επιθυμεί και ο ίδιος την διακοπή της επικοινωνίας. Μετά τη λήψη του πακέτου τερματισμού σύνδεσης με FIN Flag σε 1 και ACK σε 1 από τον διακομιστή, ο Publisher καταλαβαίνει ότι ο Broker έστειλε τον τερματισμό από την πλευρά του. Τέλος, ο πελάτης στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης με περιεχόμενο ACK σε 1 στον Broker δηλώνοντας ότι έχει λάβει το αίτημα για τον τερματισμό της σύνδεσης επικοινωνίας MQTT από τον Broker και τερματίζεται η επικοινωνία. Το κανάλι που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή της επικοινωνίας αυτής είναι 1883. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 3.11⁷ :

⁷ "MQTT Protocol Handshake – BytesofGigabytes." Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://bytesofgigabytes.com/mqtt/mqtt-protocol-handshake/>



Εικόνα 3.11 Επικοινωνία MQTT over TCP

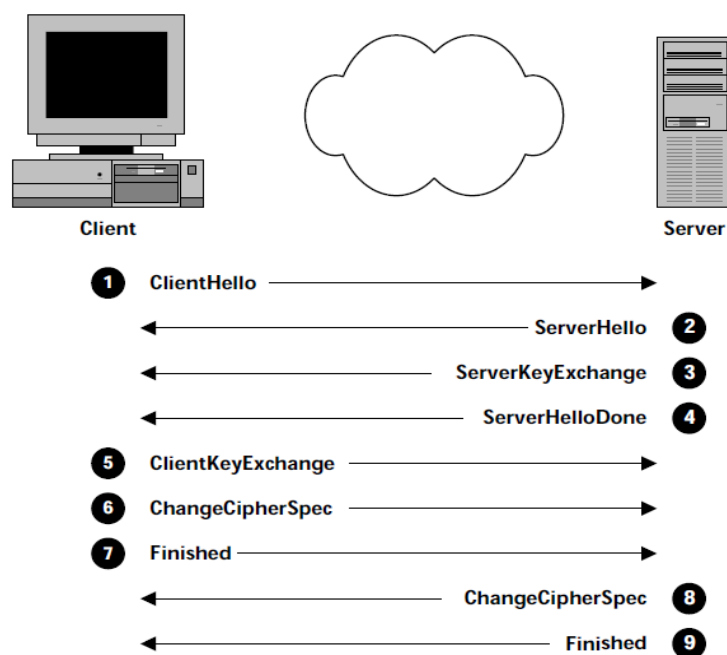
3.3.1.2 MQTT over TLS

Με την χρήση του TCP/IP πρωτοκόλλου δεν παρέχεται ασφάλεια στα δεδομένα που αποστέλλονται από τον εκδότη στον Broker. Έτσι, προτάθηκε η λύση της κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης δεδομένων από άκρο σε άκρο. Το πρωτόκολλο που διαθέτει αυτά τα χαρακτηριστικά είναι το TLS το οποίο τοποθετείται πάνω από το επίπεδο TCP ώστε να διαθέτει ένα παρόμοιο περιβάλλον αλληλεπίδρασης όπως διαθέτουν τα προγράμματα που βρίσκονται στο επίπεδο των εφαρμογών. Ο οργανισμός IETF καθιέρωσε το TLS ως ένα πρωτόκολλο κρυπτογραφίας στο οποίο διατίθενται συγκεκριμένοι αλγόριθμοι κρυπτογραφίας. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας TLS αποτελείται από δυο μέρη:

- Την διεξαγωγή χειραψίας
- Μεταφορά δεδομένων

Κατά την διάρκεια της χειραψίας ο Publisher και ο Broker χρησιμοποιούν ένα δημόσιο κλειδί που έχει κωδικοποιηθεί με έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο κωδικοποίησης ώστε να διαμορφωθούν οι παράμετροι για την δημιουργία του ιδιωτικού κλειδιού. Κατά την διάρκεια της μεταφοράς δεδομένων και οι δύο πλευρές χρησιμοποιούν το ιδιωτικό κλειδί ώστε να κωδικοποιήσουν-αποκωδικοποιήσουν τα δεδομένα που ανταλλάσσουν μεταξύ τους. Ο Publisher εδραιώνει την TLS χειραψία μεταδίδοντας ένα μήνυμα Hello. Σε αυτό το μήνυμα περιλαμβάνεται μια λίστα από αλγόριθμους κωδικοποίησης οι οποίοι διαθέτουν τα χαρακτηριστικά της κωδικοποίησης που υποστηρίζονται από τον Broker. Ο Broker ανταποκρίνεται την αποστολή ενός παρόμοιου μηνύματος στο οποίο δηλώνεται τα χαρακτηριστικά της κρυπτογράφησης. Στην συνέχεια, αποστέλλεται από τον Broker το μήνυμα στο οποίο περιλαμβάνονται το δημόσιο κλειδί και το πιστοποιητικό αυθεντικότητας. Το πιστοποιητικό αυτό αποτελείται από ένα σύνολο δεδομένων τα οποία επαληθεύουν την ταυτότητα του όπως το δημόσιο κλειδί του. Για την επαλήθευση αυτών των δεδομένων χρησιμοποιείται ένας τρίτος παράγοντας ο οποίος ονομάζεται Certificate Authority (CA). Οι CA διασφαλίζουν την ασφάλεια στις διαδικτυακές επικοινωνίες και στη διαχείριση των δημόσιων κλειδιών. Παρέχουν ένα αξιόπιστο μηχανισμό για τον έλεγχο της αυθεντικότητας και της εμπιστευτικότητας των κλειδιών. Οι υπηρεσίες αυτές δημιουργούν πιστοποιητικά τα οποία περιέχουν την ταυτότητα του, την ταυτότητα του Broker και το δημόσιο κλειδί του Broker. Το πιστοποιητικό δημιουργείται με την χρήση αλγορίθμων συγχώνευσης ώστε να δημιουργηθεί ένα αποτύπωμα που περιλαμβάνει όλα αυτά τα στοιχεία. Τέλος, ο CA κωδικοποιεί το αποτύπωμα με την χρήση του ιδιωτικού κλειδιού για την δημιουργία της υπογραφής της πιστοποίησης. Για την επικύρωση αυτού του πιστοποιητικού ο Publisher χρησιμοποιεί το δημόσιο κλειδί που παρέχεται από τον CA και υπολογίζει το αποτύπωμα του πιστοποιητικού. Αν δεν είναι όμοια τα δυο αποτυπώματα μεταξύ τους τότε το πιστοποιητικό έχει αλλοιωθεί και ο Publisher δεν συνδέεται με τον Broker διότι δεν είναι πλέον ασφαλής. Για την διεξαγωγή του ελέγχου αυτού ο Publisher διαθέτει μια λίστα με έμπιστους CA και τα δημόσια κλειδιά τους. Μετά από την πιστοποίηση του Broker χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο δημοσίου κλειδιού ώστε να αποφασίσουν το ιδιωτικό κλειδί. Τέλος, όταν οι δυο πλευρές είναι έτοιμες για την διεξαγωγή επικοινωνίας ολοκληρώνουν την χειραψία με την φράση του τερματισμού και μεταβαίνουν στην επόμενη φάση η οποία είναι η μεταφορά των δεδομένων. Κατά την διάρκεια αποστολής δεδομένων και οι δυο πλευρές σπάνε τα μηνύματα τους σε τμήματα που το μέγεθος τους εξαρτάται από την ρύθμιση της παραμέτρου Maximum Transmission Unit (MTU) και προσαρτούν ένα Message Authentication Codes (MAC)

το οποίο χρησιμοποιείται ως αποτύπωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του περιεχομένου των μηνυμάτων. Για λόγους ασφαλείας το κλειδί αυτό διαφέρει από το ιδιωτικό κλειδί και υπολογίζεται κατά την διάρκεια της χειραψίας. Κατά την αποστολή ενός μηνύματος ο Broker συνδυάζει τα τμήματα των δεδομένων, το MAC και μια επικεφαλίδα τα οποία κωδικοποιεί με την χρήση του ιδιωτικού κλειδιού ώστε να δημιουργηθεί ένα TLS πακέτο. Επιπρόσθετα, ένα χαρακτηριστικό που διατίθεται στο TLS είναι η επανάληψη της συνεδρίας. Με την διεξαγωγή πολλαπλών νέων συνδέσεων στον Broker από τον εκδότη επιβαρύνεται και επιβραδύνεται το σύστημα αποστολής μηνυμάτων. Όποτε η λύση δόθηκε με την χρήση μιας μοναδικής ταυτότητας στην οποία ο Publisher συνδέεται με αυτή στον Broker για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην Εικόνα 3.12 απεικονίζεται η διεξαγωγή της χειραψίας στο TLS [30].



Εικόνα 3.12 Χειραψία TLS

Στο πρωτόκολλο TLS διατίθενται τα έξης χαρακτηριστικά:

- Επεξεργασία της χειραψίας
- Διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων
- Διαχείριση της διαδικασίας

Η πιο υπολογιστικά επίπονη διαδικασία εκ των τριών είναι η χειραψία έπειτα η διαχείριση και κωδικοποίηση-αποκωδικοποίηση του μεγάλου όγκου των δεδομένων και η γενική διαχείριση του συστήματος. Η διαδικασία της χειραψίας χωρίζεται σε τέσσερα μέρη τα οποία είναι: Η ανταλλαγή μηνυμάτων, υπολογισμός του δημοσίου κλειδιού, παραγωγή τυχαίων αριθμών και πιστοποίηση της χειραψίας. Κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων ο Publisher και ο Broker πρέπει να γνωρίζουν τα μηνύματα εκκίνησης και τερματισμού της επικοινωνίας. Για τον υπολογισμό του δημοσίου κλειδιού χρησιμοποιείται για την διανομή είτε για την παραγωγή των χαρακτηριστικών του ιδιωτικού κλειδιού. Επιπλέον, χρησιμοποιείται από τον εκδότη το κλειδί που παρέχεται από ένα Certificate Authority (CA) ώστε να πιστοποιηθεί η αυθεντικότητα του Broker. Χρησιμοποιούνται από τον Broker αλγόριθμοι για την κατασκευή δημοσίων κλειδιών για την αποκρυπτογράφηση ή

για την δημιουργία ιδιωτικών κλειδιών. Ανάλογα με τον τύπο του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στο δημόσιο κλειδί ενδέχεται ο Publisher και ο Broker να δημιουργούν ένα hash τυχαίων αριθμών ώστε να ελαττωθεί η πιθανότητα επιθέσεις από κακόβουλους χρήστες. Για την πιστοποίηση της χειραψίας ο Publisher και ο Broker δημιουργούν ένα αποτύπωμα το οποίο αποτελείται από όλα τα μηνύματα τα οποία έχουν αποσταλεί κατά την διάρκεια της χειραψίας. Έπειτα, κάθε μεριά κωδικοποιεί και στέλνει αυτό το μήνυμα το οποίο αποτελεί μέρος του μηνύματος τερματισμού. Ο αποδέκτης του μηνύματος τερματισμού επιβεβαιώνει την πιστότητα του με την διενέργεια διαφόρων υπολογισμών. Για την ασφαλή αποστολή των δεδομένων μεταξύ εκδότη και Broker διεξάγονται οι λειτουργίες της κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης και της πιστοποίησης του κάθε μηνύματος. Για την διεξαγωγή της κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης κατά την διάρκεια της μεταφοράς χρησιμοποιούν το ιδιωτικό κλειδί ώστε να κωδικοποιήσουν και αποκωδικοποιήσουν τα δεδομένα. Τέλος, για την πιστοποίηση των μηνυμάτων ο αποστολέας υπολογίζει και προσθέτει μια διεύθυνση MAC την οποία ο αποδέκτης πρέπει να επιβεβαιώσει. Για να αποκτήσει πρόσβαση σε έναν Broker που απαιτείται επαλήθευση ταυτότητας ο Publisher πρέπει να διαθέτει ένα πιστοποιητικό και ένα ιδιωτικό κλειδί αποθηκευμένα σε μια μνήμη cache στην οποία συσχετίζονται τα δημόσια με τα ιδιωτικά κλειδιά.

3.3.1.3 MQTT over mTLS

Το MQTT over mTLS ή αλλιώς Mutual TLS είναι μια επέκταση του MQTT στο TLS η οποία προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας. Απαιτείται τόσο από τον MQTT Broker όσο και από τον εκδότη των μηνυμάτων να διαθέτουν και να παρουσιάσουν τα πιστοποιητικά τους κατά τη χειραψία. Στην επικοινωνία με αμοιβαίο TLS διασφαλίζεται η πιστοποίηση των δυο μερών που διεξάγεται η επικοινωνία, παρέχοντας υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και εμπιστοσύνης. Η επικοινωνία διεξάγεται με την χρήση της χειραψίας TLS, κατά την οποία τόσο ο MQTT Broker όσο και ο Publisher παρουσιάζουν και επαληθεύουν τα ψηφιακά τους πιστοποιητικά ο ένας στον άλλο. Με την διεξαγωγή του ελέγχου των πιστοποιητικού διασφαλίζεται η αξιοπιστία των δυο μερών. Με την ολοκλήρωση του αμοιβαίου ελέγχου διεξάγεται η επικοινωνία στο TLS κανάλι. Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ είναι κρυπτογραφημένα και προστατεύονται από υποκλοπή ή παραποίηση. Τα πιστοποιητικά και η επαλήθευση αυτών αποτελούν τον κορμό του mTLS. Ο Publisher και ο Broker διαθέτουν ένα ζεύγος κλειδιών δημόσιου-ιδιωτικού και τα πιστοποιητικά τους, τα οποία υπογράφονται από έναν αξιόπιστο CA. Το MQTT μέσω mTLS χρησιμοποιεί συνήθως την ίδια θύρα με το MQTT μέσω TLS, που είναι 8883. Με την χρήση του αμοιβαίου TLS προστίθεται ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας διασφαλίζοντας την πιστοποίησή και την αυθεντικότητα του Broker και του εκδότη αντίστοιχα. Η εφαρμογή MQTT μέσω mTLS απαιτεί προσεκτική διαχείριση των ψηφιακών πιστοποιητικών τόσο από την πλευρά του πελάτη όσο και από την πλευρά του μεσίτη. Τα πιστοποιητικά πρέπει να λαμβάνονται πάντα από έναν αξιόπιστο CA και τα ιδιωτικά τους κλειδιά πρέπει να αποθηκεύονται με ασφάλεια⁸.

⁸ What is mTLS? | Mutual TLS,” Cloudflare. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.cloudflare.com/learning/access-management/what-is-mutual-tls/>

3.3.2 BLE

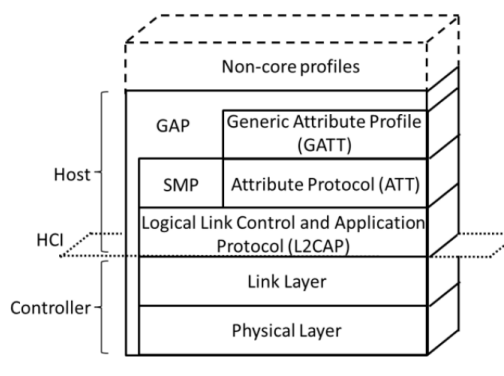
Η τεχνολογία Bluetooth Low Energy (BLE) είναι μια ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία που αναπτύσσεται από τον οργανισμό Bluetooth Special Interest Group (SIG) και αφορά επικοινωνίες μικρών αποστάσεων. Η λύση που προσφέρεται από το BLE είναι για την μετάδοση και επιτήρηση δεδομένων με την χρήση ενός συστήματος χαμηλής κατανάλωσης. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε με βάση το πρότυπο Bluetooth 4.0⁹. Το BLE αναπτύσσονται εφαρμογές οι οποίες επιθυμείτε λύση μονού βήματος οι οποίες προσφέρουν:

- Διαθέτουν μικρές καθυστερήσεις (low latency)
- Απλότητα στην κατασκευή τους
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Η τεχνολογία BLE που χρησιμοποιείται σε αυτή την Διπλωματική Εργασία είναι το BTHome. Το BTHome πρωτόκολλο μια ενεργειακά αποδοτική λύση ανοιχτού κώδικα στην οποία οι συσκευές διαθέτουν την ικανότητα μετάδοσης των δεδομένων, την κρυπτογράφηση τους και λόγω της χαμηλής ενέργειας που απαιτείται για την διάρκεια επικοινωνίας αύξηση της αντοχής της μπαταρίας τους. Ο σχεδιασμός της υλοποιήθηκε πάνω στο BLE πρότυπο και αποτελείται από δύο εκδόσεις την BTHome v1 και την BTHome v2. Η δομή του πρωτοκόλλου BTHome είναι σχεδόν ίδια και στις δύο εκδόσεις, η διαφορά που διαθέτουν είναι κατά την διαδικασία της κρυπτογράφησης του, άλλα όπως προαναφέρθηκε βασίζεται στο BLE πρότυπο. Στην Εικόνα 3.13 παρατίθεται η αρχιτεκτονική του BLE προτύπου. Τα στρώματα από τα οποία αποτελείται είναι [31]:

- Φυσικό στρώμα
- Στρώμα διασύνδεσης
- πρωτόκολλο L2CAP
- πρωτόκολλο ATT και SMP
- πρωτόκολλο GAP και GATT
- πρωτόκολλα που δεν συνθέτουν το BLE πρωτόκολλο

⁹ BTHome: Open standard for broadcasting sensor data over Bluetooth LE,” BTHome. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://bthome.io>



Εικόνα 3.13 Αρχιτεκτονική BLE

Στο BLE πρότυπο αποτελείται από δυο κύρια μέρη των ελεγκτή και τον οικοδεσπότη. Στον ελεγκτή περιλαμβάνονται μόνο δυο στρώματα το φυσικό και το στρώμα διασύνδεσης τα οποία βρίσκονται σε ένα SoC. Την πλευρά του οικοδεσπότη ο οποίος λειτουργεί σε έναν ξεχωριστό επεξεργαστή εφαρμογών αποτελείται από τα άνω στρώματα τα οποία είναι:

- SMP & ATT
- GATT

Η επικοινωνία ανάμεσα στον οικοδεσπότη και τον ελεγκτή πραγματοποιείται από το στρώμα HCI στο οποίο περιλαμβάνεται το L2CAP. Τέλος, οι λειτουργίες οι οποίες δεν ανήκουν στο πρότυπο Bluetooth μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον οικοδεσπότη όταν αυτό απαιτείται. Στο φυσικό στρώμα ορίζεται η συχνότητα μετάδοσης των δεδομένων η οποία πραγματοποιείται στα 2,4 GHz και ορίζονται σαράντα κανάλια επικοινωνίας με κενό διάστημα καναλιού ανά 2 MHz. Στο BLE διατίθενται δυο RF κανάλια:

- Το κανάλι δημοσιοποίησης
- Το κανάλι δεδομένων

Το κανάλι δημοσιοποίησης δεδομένων χρησιμοποιείται για την εύρεση των συσκευών, την μετάδοση των δεδομένων και την δημιουργία σύνδεσης μεταξύ των συσκευών. Παράλληλα, το κανάλι δεδομένων χρησιμοποιείται για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για την δημοσιοποίηση των δεδομένων είναι τρία τα οποία βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 και διαθέτουν τεχνολογίες για την αποφυγή και ελαχιστοποίηση των μεταξύ τους αλληλοκαλύψεων που μπορεί να προκύψουν. Για την μετάδοση των δεδομένων τα φυσικά κανάλια χρησιμοποιούν την Gaussian FSK διαμόρφωση λόγω της εύκολης εφαρμογής της. Ο ρυθμός αποστολής δεδομένων στο στρώμα αυτό κυμαίνεται στο 1 Mbps. Τέλος το όριο ανοχής της ευαισθησίας που ανέχεται ο δέκτης βρίσκεται στα -70dbm. Στο στρώμα διασύνδεσης πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών όπου μία αποστέλλει δεδομένα στην άλλη και η άλλη τα λαμβάνει με την χρήση της διαδικασίας μετάδοσης δεδομένων. Για την διεξαγωγή της επικοινωνίας αυτής απαιτείται η σύνδεση μεταξύ των δυο αυτών συσκευών η οποία πραγματοποιείται με τον παρακάτω τρόπο: Ανακοινώνεται από τον μια συσκευή στα κανάλια μετάδοσης ότι επιθυμείτε σύνδεση με μια άλλη συσκευή, η άλλη συσκευή ορίζεται ως ο ευκίνητος της σύνδεσης. Όταν βρεθεί από τον εκκίνητη η επιθυμητή συσκευή αποστέλλεται ένα μήνυμα για την εδραίωση της επικοινωνίας μεταξύ τους. Η επικοινωνία τους πραγματοποιείται στα

φυσικά κανάλια κατά την οποία διατίθεται το αναγνωριστικό και στην συνέχεια ορίζεται η σχέση master slave μεταξύ αυτών. Οι ιδιότητες που διαθέτει ο master είναι η διαχείριση πολλαπλών συνδέσεων από διαφορετικούς slaves, ενώ ο κάθε slave συνδέεται με έναν και μόνο master. Η ιδιότητα της εξοικονόμησης ενέργειας προκύπτει από την λειτουργία ύπνου που τοποθετούνται οι slave και ενεργοποιούνται μόνο όταν αποσταλθεί πακέτο από τον master. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την χρήση πολυπλεξίας TDMA ενώ οι slave γνωρίζουν τον αλγόριθμο hop ώστε να γνωρίζουν την κατάσταση της σύνδεσης. Οι παράμετροι που διαθέτουν την διαχείριση της σύνδεσης μεταδίδονται με το μήνυμα που ζητά την σύνδεση και διαθέτει την ιδιότητα της ενημέρωσης. Με την εδραίωση της επικοινωνίας κάθε φορά που αποστέλλεται ένα αρχείο από τον master ο slave υποχρεούται να στείλει απάντηση αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει. Το στρώμα L2CAP αποτελεί την πιο απλοποιημένη και βελτιστοποιημένη μορφή το πρωτοκόλλου που διαθέτει το ίδιο όνομα και βασίζεται στο Bluetooth. Σκοπός του είναι η πολυπλεξία των δεδομένων προς τα τρία ανώτερα στρώματα τα οποία ελέγχουν τα σήματα που προέρχονται από το προηγούμενο στρώμα. Το L2CAP διαχειρίζεται με την πλέον βέλτιστη μέθοδο για την αποστολή αυτών των δεδομένα αυτών των υπηρεσιών χωρίς την επαναποστολή τους λόγω του αρκετά μικρού μεγέθους το οποίο 32 byte. Στο στρώμα ATT ορίζεται η επικοινωνία μεταξύ δυο συσκευών στο πρότυπο λειτουργίας server client πάνω ακριβώς από το στρώμα του L2CAP καναλιού. Ο server διαθέτει μια δομή δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα που διαχειρίζονται από τον GATT το οποίο βρίσκεται από πάνω από το ATT. Οι ρόλοι αυτοί καθορίζονται από GATT και δεν εξαρτώνται από την ιδιότητα master slave. Στο client διατίθεται πρόσβαση στα χαρακτηριστικά του server με την αποστολή μηνυμάτων που απαντώνται από τον server. Για την εξοικονόμηση πόρων αποστέλλονται από τον server στον client οι τύποι των μη επιθυμητών μηνυμάτων οι οποίοι είναι: η αποστολή ειδοποιήσεων για τις οποίες δεν υπάρχει επαλήθευση και ενδείξεις οι οποίες ζητούν στον client να αποστείλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης. Επιπλέον, ο client αποστέλλει μηνύματα εντολών στον server ο οποίος με την σειρά του καταγράφει τις ιδιότητες που του έχουν αποσταλεί. Η δομή που ακολουθείται στα αιτήματα και στις επιβεβαιώσεις είναι το σχήμα αναμονής. Στο GATT ορίζεται το framework το οποίο χρησιμοποιείται από το ATT για την ανίχνευση των συσκευών παράλληλα με την ανταλλαγή των χαρακτηριστικών από μια συσκευή σε μια άλλη. Τα χαρακτηριστικά αποτελούν ένα σύνολο δεδομένων στο οποίο παρέχονται τιμές και διάφορες ιδιότητες που σχετίζονται με υπηρεσίες. Τέλος, το υψηλότερο στρώμα της BLE αρχιτεκτονικής είναι το GAP στο οποίο ορίζονται οι ρόλοι των συσκευών, οι λειτουργίες και οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται για τα την καθιέρωση σύνδεσης και ασφάλειας των υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, στον GAP διατίθενται τέσσερις βασικοί ρόλοι:

- Μεταδότης
- Παρατηρητής
- Περιφερειακός
- Κεντρικός

Κατά την διάρκεια της μετάδοσης μεταδίδονται μόνο τα δεδομένα από τα κανάλια δημοσιοποίησης και δεν υποστηρίζεται η σύνδεση με άλλες συσκευές. Ο ρόλος του παρατηρητή αποτελεί είναι συμπληρωματικός του ρόλου του μεταδότη. Ο κεντρικός ρόλος ανατίθεται στις συσκευές οι οποίες αναλαμβάνουν την καθιέρωση επικοινωνίας και την διαχείριση του των πολλαπλών συνδέσεων ενώ ο περιφερειακός ρόλος σχεδιάστηκε για τις συσκευές που συνδέονται σε αυτές που διαθέτουν

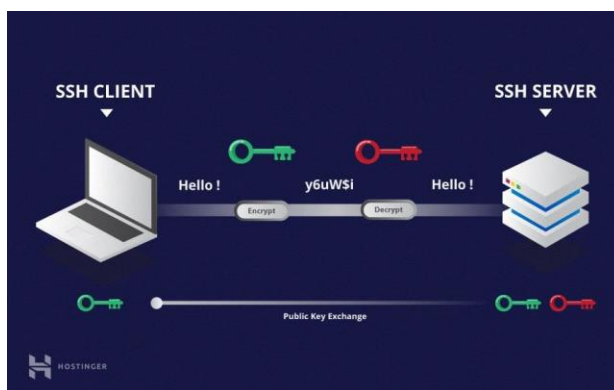
κεντρικό ρόλο. Συνεπώς, οι ρόλοι αυτοί πρέπει να γνωρίζουν τις σχέσεις master slave ανάμεσα στις συσκευές. Η δομή του BLE stack προσφέρει ποικίλες υπηρεσίες οι οποίες μπορούν να προστατεύσουν τα δεδομένα κατά την διάρκεια αποστολής τους από την μια συσκευή προς την άλλη. Οι δυο δημοφιλέστερες υπηρεσίες ασφαλείας που υποστηρίζονται από το πρωτόκολλο BLE είναι η LE ασφάλεια 1 και LE ασφάλεια 2. Στο επίπεδο ασφαλείας 1 παρέχεται ασφάλεια στο στρώμα διασύνδεσης ενώ η 2 παρέχει ασφάλεια στο στρώμα ATT. Στο στρώμα διασύνδεσης υποστηρίζονται τεχνικές κωδικοποίησης και πιστοποίησης που βασίζονται στους αλγορίθμους CCM και 128bit AES block cipher [31].

3.3.3 SSH

Το πρωτόκολλο SSH είναι μια λύση λογισμικού που προσφέρεται για την ασφάλεια του δικτύου με την κωδικοποίηση των δεδομένων που αποστέλλονται από το έναν υπολογιστή στο δίκτυο όπου ο παραλήπτης τους απαιτείται να διαθέτει το ίδιο πρωτόκολλο για την αποκωδικοποίησή τους. Αυτό το πρωτόκολλο κατατάσσεται στις λύσεις διαφανούς κωδικοποίησης κατά την οποία η χρήστες δεν γνωρίζουν ότι οι επικοινωνίες τους είναι κωδικοποιημένες. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι κωδικοποίησης οι οποίοι διαθέτουν υψηλή αποτελεσματικότητα ώστε να χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες εφαρμογές. Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται βασίζεται στο πρότυπο client/server. Η εγκατάσταση του λογισμικού πραγματοποιείται από τον διαχειριστή του συστήματος ο οποίος απορρίπτει ή αποδέχεται τις εισερχόμενες συνδέσεις. Στην συνέχεια, οι χρήστες μπορούν να εκτελέσουν το λογισμικό του SSH σε άλλους υπολογιστές ώστε να αποστέλλουν αιτήματα εισόδου, αποστολής αρχείων ακόμα και εκτέλεση εντολών εξ αποστάσεως. Οι κύριοι χρήστες του λογισμικού αυτού είτε είναι clients, είτε servers είτε και τα δύο. Στο SSH περιγράφεται η διεξαγωγή ασφαλούς επικοινωνίας σε ένα δίκτυο και διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Πιστοποίηση
- Κωδικοποίηση
- Ακεραιότητα

Η πιστοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία καθορίζεται η ταυτότητα του client και του server. Με την πραγματοποίηση εισόδου του χρήστη σε έναν απομακρυσμένο υπολογιστή ζητείται από το πρωτόκολλο η απόδειξη της ταυτότητας του η οποία αν δεν αναγνωρίζεται από το λογισμικό αυτό του αρνείται η πρόσβαση σε αυτό τον υπολογιστή. Η κωδικοποίηση χρησιμοποιείται ώστε τα δεδομένα ακόμα και αν υποκλαπούν από κάποιον κακόβουλο χρήστη να μην μπορεί να τα καταλάβει χωρίς να διαθέτει το ειδικό κλειδί αποκωδικοποίησης αυτών. Η ακεραιότητα στην μετάδοση των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι έτσι διασφαλίζεται η ακεραία άφιξη των δεδομένων χωρίς την ύπαρξη αλλοιώσεων από κάποιο κακόβουλο χρήστη. Στο πρωτόκολλο αυτό διατίθεται η ιδιότητα εντοπισμού αλλοιώσεων. Εν συντομία διασφαλίζεται η πιστότητα της σύνδεσης του δικτύου μεταξύ υπολογιστών και την αυθεντικότητα της σύνδεσης και στις δυο πλευρές. Στην Εικόνα 3.14 απεικονίζεται η βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου SSH¹⁰.



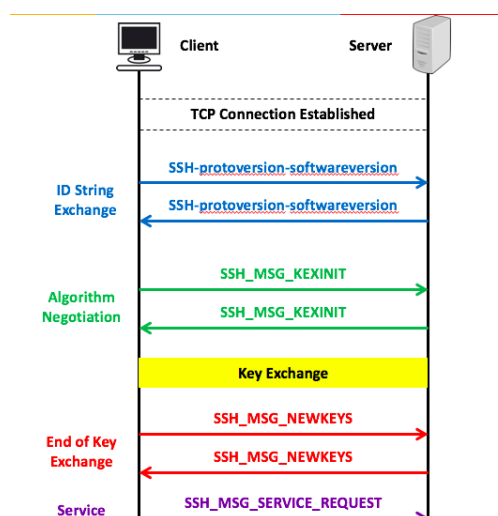
Εικόνα 3.14 Το Πρωτόκολλο SSH

¹⁰ "What Is SSH? How Does SSH Work? - Huawei." Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/SSH.html>

Το πρωτόκολλο SSH διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά τα οποία είναι:

- i) Ασφαλή είσοδο σε απομακρυσμένες συσκευές
- ii) Ασφαλή μεταφορά αρχείων
- iii) Παροχή ασφαλείας για την εκτέλεση απομακρυσμένων εντολών
- iv) Καναλοποίηση (Tunneling)

Για την επίτευξη σύνδεσης σε πολλαπλούς υπολογιστές στο διαδίκτυο χρησιμοποιούνται προγράμματα τα οποία κατά την εδραίωση επικοινωνίας μετέδιδαν το όνομα του χρήστη και τον κωδικό πρόσβασης σε απλή μορφή κειμένου την οποία οποιοσδήποτε κακόβουλος χρήστης του διαδικτύου μπορούσε να την εντοπίσει σχετικά εύκολα. Με την χρήση του λογισμικού SSH αρχικά πραγματοποιείται η πιστοποίηση του εκάστοτε που επιθυμεί πρόσβαση στην συσκευή με την χρήση κωδικοποιημένης σύνδεσης. Έπειτα, σε αυτήν την σύνδεση καταχωρούνται το όνομα χρήστη και ο κωδικός πρόσβασης ώστε να είναι και αυτά κωδικοποιημένα. Όταν επαληθεύεται από τον server η ορθότητα των στοιχείων αυτών τότε δημιουργείται μια κωδικοποιημένη συνεδρία μεταξύ client και server. Για την μεταφορά αρχείων συνήθως χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο FTP ή SCP τα οποία όμως δεν αποτελούν ασφαλή μέθοδο για την μεταφορά αρχείων. Στο πρωτόκολλο αυτό διατίθεται η επιλογή κωδικοποίησης των δεδομένων αυτόματα με την πληκτρολόγηση μιας και μόνο εντολής και αποκωδικοποίηση τους πραγματοποιείται όταν φτάσουν στον προορισμό τους. Τέλος, παρέχεται η λειτουργία της ασφαλούς απομακρυσμένης εκτέλεσης εντολών. Όταν ο χρήστης επιθυμεί να τρέξει και να παρακολουθήσει το αποτέλεσμα της ίδια εντολή σε πολλαπλούς υπολογιστές χρησιμοποιούνται εντολές οι οποίες δεν διαθέτουν παροχή ασφαλείας. Το SSH πρωτόκολλο παρέχει ασφάλεια μέσω της κωδικοποιημένης αποστολής των εντολών αυτών ενώ παράλληλα διασφαλίζεται και η ακεραιότητα τους μέσω της χρήσης προτύπων πιστοποίησης. Με την λειτουργία της καναλοποίησης δημιουργούνται ασφαλή κανάλια επικοινωνίας για την μετάδοση δεδομένων δικτύου μέσω SSH καθίσταται δυνατή από τη λειτουργικότητα για διάνοιξη σήραγγας που παρέχεται από το SSH. Ο τρόπος κατά τον οποίο πραγματοποιείται η χειραψία του πρωτοκόλλου SSH απεικονίζεται στην Εικόνα 3.15 [32]:



Εικόνα 3.15 Χειραψία SSH

Ο server λαμβάνει το αίτημα για την πραγματοποίηση αυτής της σύνδεσης από το client σε μια θύρα στην οποία χρησιμοποιείται ως αρχικό πρωτόκολλο σύνδεσης το TCP. Όταν πιστοποιείται από τους δύο πραγματοποιείται επικοινωνία με την χρήση του SSH πρωτοκόλλου μεταβαίνουν

στην θύρα 22 ή 830 στην οποία υποστηρίζεται η κωδικοποιημένη επικοινωνία SSH. Ο SSH server αποστέλλει στο SSH client τις εκδόσεις που υποστηρίζονται και ο client απαντά ποια έκδοση επιθυμεί να χρησιμοποιηθεί. Τέλος, ο server ελέγχει αν υπάρχει συμφωνία στην έκδοση ώστε να πραγματοποιηθεί και τότε η διαπραγμάτευση θεωρείται επιτυχής. Στην συνέχεια ανταλλάσσονται αλγόριθμοι, συμπεριλαμβανομένου του αλγόριθμου ανταλλαγής κλειδιών για τη δημιουργία δημοσίων και ιδιωτικών κλειδιών, την ψηφιακή υπογραφή και τον έλεγχο ταυτότητας και ο αλγόριθμος συμμετρικής κρυπτογράφησης για την κρυπτογράφηση δεδομένων για την προστασία της ακεραιότητας των δεδομένων. Ο διακομιστής SSH και ο πελάτης υποστηρίζουν πολλαπλούς αλγόριθμους κάθε τύπου και επομένως πρέπει να διαπραγματευτούν και να καθορίσουν τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε τύπο. Η διαδικασία είναι η παρακάτω: Κοινοποιούνται οι υποστηριζόμενοι αλγόριθμοι μεταξύ server και client και έπειτα ακολουθεί η διαδικασία διαπραγμάτευσης για την χρήση του αλγορίθμου που διαθέτουν και οι δύο. Στο πρωτόκολλο SSH διατίθεται μηχανισμοί πιστοποίησης του χρήστη οι οποίοι βασίζονται στην χρήση κλειδιών. Αρχικά, δημιουργούνται κλειδιά τα οποία είναι κωδικοποιημένα, και χρησιμοποιούνται για την πιστοποίηση των χρηστών που πραγματοποιείται με την αποκωδικοποίηση του από τον εκάστοτε ενδιαφερόμενο με την χρήση μια μυστικής φράσης που είναι γνωστή μόνο σε εκείνων. Μαζί με την χρήση του λογισμικού πιστοποίησης που διατίθεται στο SSH ο χρήστης συνδέεται μόνο στους υπολογιστές που διαθέτουν την πιστοποίηση από το λογισμικό χωρίς την χρήση κωδικών πρόσβασης. Το πρώτο βήμα για την καθιέρωση επικοινωνίας είναι η καταχώρηση των δημοσίων κλειδιών στους απομακρυσμένους υπολογιστές ώστε οι πελάτες να διαθέτουν πρόσβαση με την χρήση του SSH πρωτοκόλλου. Το δεύτερο βήμα είναι η χρήση του τοπικού λογισμικού SSH και το τρίτο βήμα αποτελεί η επιλογή του κλειδιού που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της εγκαθίδρυσής επικοινωνίας. Με την πραγματοποίηση των παραπάνω βημάτων ξεκινά η διεξαγωγή επικοινωνίας μεταξύ ενός client και server. Έπειτα πραγματοποιείται η διαδικασία της πιστοποίησης η οποία είναι η επαλήθευση της ταυτότητας του client του server. Ο πελάτης πιστοποιεί την ταυτότητα του SSH server και ο server επαληθεύει τον client ζητώντας του την πιστοποίηση που διαθέτει. Με την χρήση των διαδικασιών αυτών διασφαλίζεται η γνησιότητα και η ταυτότητα τους. Η διαδικασία πιστοποίησης του server πραγματοποιείται με την παροχή του κλειδιού που διαθέτει και την επαλήθευση αυτού από έναν οργανισμό που καταγράφονται όλοι οι πιστοποιημένοι servers. Στην περίπτωση των clients διεξάγεται με την κοινοποίηση ενός κωδικού πρόσβασης στον server. Τα δύο τελευταία βήματα για την εγκαθίδρυση επικοινωνίας είναι:

- Αίτημα συνεδρίας
- Αλληλεπίδραση συνεδρίας

Μετά τον επιτυχή έλεγχο της ταυτότητας του server, ο client στέλνει ένα αίτημα περιόδου λειτουργίας στον διακομιστή, ζητώντας από τον διακομιστή να παρέχει έναν συγκεκριμένο τύπο υπηρεσίας. Δηλαδή, ο πελάτης SSH ζητά να δημιουργήσει μια περίοδο λειτουργίας με τον διακομιστή, ο οποίος στη συνέχεια ανταποκρίνεται στο αίτημα του πελάτη. Τέλος, μετά τη δημιουργία μιας συνεδρίας, πραγματοποιείται από τον server και των client ανταλλαγή δεδομένων στην συνεδρία. Τα δεδομένα που αποστέλλονται αναμεταξύ τους κρυπτογραφούνται και αποκρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας το κλειδί συνεδρίας [32].

3.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλυθήκαν οι τεχνολογίες τις Νεφούπολογιστικής, των βάσεων δεδομένων καθώς και οι επιμέρους τεχνολογίες επικοινωνιών και διασφάλισης δεδομένων. Οι υπηρεσίες IaaS διαθέτουν δυο κύριους χρήστες τους παρόχους και τους χρήστες. Από την πλευρά των παρόχων διατίθεται η παροχή των εικονικών μηχανημάτων, είναι υπεύθυνοι για την διαχείριση της χωρητικότητάς και της συντήρησης των βάσεων δεδομένων. Επιπλέον, παρέχονται υπηρεσίες για την εξισορρόπηση του φόρτου στο διαδίκτυο καθώς και διευκόλυνση στην κλωνοποίηση των εικονικών μηχανημάτων καθώς και στην παροχή ασφάλειας των δεδομένων που βρίσκονται στην βάση δεδομένων. Από το μέρος του καταναλωτή διατίθεται προσβασιμότητα στην εφαρμογή ανεξαρτήτως τοποθεσίας και συσκευής καθώς ευελιξία στην επεκτασιμότητα, αυτοματοποιημένες και εικονικές εφαρμογές, τοποθέτηση εφαρμογών σε σταθερές εκδόσεις χωρίς την ανησυχία για πραγματοποίηση μη επιθυμητών αναβαθμίσεων. Τέλος, διατίθεται στους καταναλωτές η οικονομική ευελιξία στην χρήση των δυνατοτήτων των υπηρεσιών αυτών ανάλογα με την χρήση των πόρων. Η χρήση της εικονοποίησης προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα: Την μεταφερσιμότητα, την αύξηση της διαθεσιμότητας των υπηρεσιών, ευκολία στην αποκατάσταση καταστροφών, εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας και απομόνωση της εφαρμογής. Όμως για την παροχή της υπηρεσίας αυτής αρχικά επενδύεται ένα μεγάλο χρηματικό ποσό λόγω της παροχής δυνατών φυσικών υποδομών για την υποστήριξη της. Επιπλέον, απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την χρήση τους. Τα πλεονεκτήματα που υπάρχουν από την χρήση των docker containers είναι η φορητότητα, δεν επηρεάζεται η απόδοση τους κατά την μεταφορά τους, αποτελεσματικότερη χρήση πόρων από ότι η τεχνολογία των υπερεπόπτων και παρέχεται ένα σταθερό συνεχές και διαρκώς βελτιούμενο περιβάλλον. Υπάρχουν αρκετές διαφορές τόσο στην αρχιτεκτονική όσο και στο υλικό των σχεσιακών και με των μη σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Οι μη σχεσιακές βάσεις δεδομένων βασίζονται στην κατακεντημένη αρχιτεκτονική. Η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής αυτής είναι από τις πιο δύσκολες επειδή δεν ελέγχονται εύκολα τα δεδομένα. Το κύριο πλεονέκτημα τους αποτελεί η ορίζονται επεκτασιμότητα με την προσθήκη περισσότερων server σε cluster αποθήκευσης δεδομένων. Επιπλέον, το κόστος δημιουργίας τους είναι αρκετά χαμηλό ώστε αντί να αναβαθμίζεται η Random Access Memory (RAM) σε ένα σύστημα μπορούν να δημιουργούνται μικρότερα κατακεντημένα δίκτυα. Η κύρια διαφορά που εμφανίζεται στις TSDB και στις σχεσιακές βάσεις δεδομένων είναι ο χρήστης λαμβάνει ευκολότερα απαντήσεις στα ερωτήματα που θέτει. Παρατηρείται ότι η δημοφιλία των TSDB αυξάνεται ολοένα και περισσότερο λόγω της ανόδου του ΔτΠ επειδή στην τεχνολογία αυτή παράγονται δεδομένα τα οποία επεξεργάζονται με γνώμονα την χρονική σειρά στην οποία λαμβάνονται από την εκάστοτε βάση δεδομένων. Τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν οι TSDB είναι: Η τεράστια επεκτασιμότητα και απόδοση την οποία διαθέτουν, την μείωση κόστους συντήρησης και υλοποίησης αυτής της λύσης σε σύγκριση με τις άλλες, την ελαχιστοποίηση της μειωμένης διαθεσιμότητας, την βελτιστοποίηση στην λήψη αποφάσεων σε μια επιχείρηση λόγω της ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, η TSDB χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση συστημάτων λογισμικού όπως μια εικονική συσκευή ή μια εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο, ως εφαρμογή προβλέψεων δεδομένων και την χρήση τους σε ευφυή συστήματα. Η InfluxDB αποτελεί την πιο δημοφιλή λύση στην χρήση χρονικών βάσεων δεδομένων σύμφωνα με την ιστοσελίδα db-engines. Η InfluxDB χρησιμοποιείται σε αυτή την ΔΕ διότι τα δεδομένα που επεξεργάζονται είναι χρονική σειράς και η συγκεκριμένη βάση διαχειρίζεται με τον βέλτιστο τρόπο τέτοιου είδους δεδομένα. Λύνονται προβλήματα λόγω του λογισμικού ανοιχτού κώδικα και χρησιμοποιείται σαν SaaS προσφέροντας υψηλή διαθεσιμότητα, επεκτασιμότητα και παροχή προηγμένων λειτουργιών ανάκτησης δεδομένων. Η λύση που

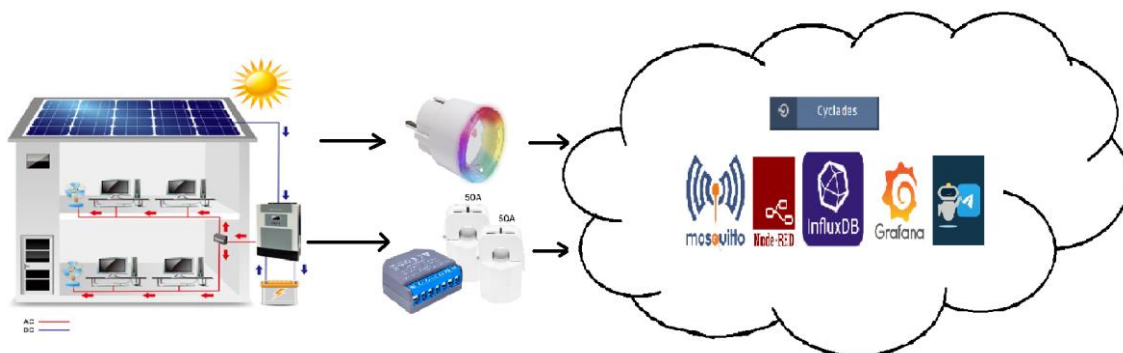
προσφέρεται είναι ολιστική διότι στην InfluxDB περιλαμβάνονται προγράμματα τα οποία βοηθούν στην επεξεργασία και στην εισαγωγή δεδομένων. Επιπλέον, συνεργάζεται με αρκετά προγράμματα απεικόνισης όπως το Grafana το οποίο χρησιμοποιείται στην ανάλυση και απεικόνιση δεδομένων χρονικής σειράς. Υποστηρίζεται η γραφή προγραμμάτων σε πολλές γλώσσες προγραμματισμού όπως η .NET και η Python. Η εγκατάσταση της είναι εύκολη, γρήγορη και πραγματοποιείται και στο docker. Τα ερωτήματά πραγματοποιούνται με παρόμοιο τρόπο όπως και στην SQL όπως και η συνεχής υποστήριξη τους υποστηρίζοντας τεχνικές υπό-δειγματοληψίας οι οποίες ελαττώνουν την πυκνότητα των δεδομένα προσφέροντας μεγαλύτερη ταχύτητα και μειώνοντας της υποδομές που απαιτούνται για την επεξεργασία αυτών. Επιπρόσθετα, παρέχονται υπηρεσίες οι οποίες διαθέτουν απεριόριστα πεδία για την ομαδοποίηση τους, διατίθεται αυτόματη λήξη διότι τα δεδομένα είναι χρονικής σειράς. Τέλος, παρέχεται εκτενείς βιβλιογραφία για την υλοποίηση βασικών λειτουργιών στην βάση δεδομένων και διατίθεται γραφικό περιβάλλον στο διαδίκτυο για τους χρήστες που δεν διαθέτουν την εξοικείωση με την χρήση του περιβάλλοντος γραμμής εντολών. Όμως, η InfluxDB εκτός από πλεονεκτήματα διαθέτει και αρκετά μειονεκτήματα όπως η επεκτασιμότητα διατίθεται μόνο στις εκδόσεις που είναι επί πληρωμή και η μέγιστη συλλογή δεδομένων στην ελεύθερη έκδοση διαρκεί μόνο έναν μήνα. Όλες οι τεχνολογίες επικοινωνιών διαθέτουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τόσο ως προς την χρήση όσο και ως προς την ασφάλεια. Η χρήση της τεχνολογίας MQTT πραγματοποιείται από ενσωματωμένα συστήματα τα οποία διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική χωρητικότητα και βρίσκονται συνδεδεμένες σε δίκτυα που διαθέτουν χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Η χρήση του MQTT over TCP είναι αρκετά δύσκολη διότι διαθέτει περιπλοκή διαχείριση, μη διακριτές υπηρεσίες, οι αλληλεπιδράσεις και τα πρωτόκολλα. Επιπλέον, είναι ευάλωτο σε επιθέσεις συγχρονισμού, επιθέσεις DDoS και δεν διαθέτει ιδιαίτερα υψηλή ασφάλεια. Παρόλο που ο MQTT δεν διαθέτει υψηλά επίπεδα ασφάλειας με τον συνδυασμό του με το πρωτόκολλο TLS προσφέρεται ασφάλεια με την κρυπτογράφηση των δεδομένων, την χρήση προγραμμάτων πιστοποίησης και αυθεντικότητας του αποστολέα και του παραλήπτη των δεδομένων σε συγκεκριμένη πόρτα ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων 8883. Επιπρόσθετα, η χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT over mutual TLS προσφέρει την μέγιστη ασφάλεια διότι διατίθεται κρυπτογράφηση στο κανάλι επικοινωνίας διασφαλίζοντας την ασφάλεια των δεδομένων. Ακόμη, διασφαλίζεται η ταυτότητα του εκδότη και του Broker με την διάθεση πιστοποιητικών και στα δύο μέρη αποτρέποντας έτσι επιθέσεις τύπου man-in-the-middle. Τέλος, στο MQTT over mTLS προστατεύει από την πλαστοπροσωπία από κακόβουλους χρήστες διότι δεν επιτρέπει την σύνδεση τους εκτός και αν διαθέτουν πιστοποιητικό αυθεντικότητας από έναν επίσημο CA. Το BLE αποτελεί ένα πρωτόκολλο το οποίο είναι ελαφρύ και σχετικό εύκολο στην εφαρμογή του. Παρέχει εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων στις εγκατεστημένες συσκευές διότι αποστέλλουν δεδομένα σε συγκεκριμένους χρόνους που ορίζεται από τον χρήστη. Επιπλέον, με την παροχή των δύο security mode διατίθεται ασφάλεια τόσο στο στρώμα διασύνδεσης όσο και στο στρώμα ATT. Τέλος, το BLE πρωτόκολλο υποστηρίζει πιστοποίηση και κωδικοποίηση καθιστώντας το έτσι ασφαλής λύση για την μεταφορά ευαίσθητων δεδομένων. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SSH παρέχει ασφάλεια όταν πραγματοποιείται είσοδος σε μια απομακρυσμένη συσκευή με την χρήση δημόσιου και ιδιωτικού κλειδιού. Έπειτα, διασφαλίζεται η ασφαλής μεταφορά των δεδομένων και των αρχείων από έναν απομακρυσμένο υπολογιστή σε έναν άλλο. Τέλος, το SSH διαχειρίζεται επιτυχώς τις απειλές που μπορούν να προκύψουν από επιθέσεις κρυφακούσματος, αλλαγής διεύθυνσης και ενδεχομένης κλοπής της σύνδεσης.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Σχεδιασμός Ευφυούς Συστήματος Εποπτείας και Διαχείρισης

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του ευφυούς συστήματος εποπτείας, διαχείρισης καθώς και η ανάλυση των μερών του. Αρχικά, κατασκευάζεται και αναλύεται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος. Στην συνέχεια, περιγράφεται η εικονική μηχανή στην οποία βρίσκονται οι εφαρμογές που το αποτελούν. Στο Εικονικό μηχάνημα βρίσκονται οι εφαρμογές με τις οποίες πραγματοποιείται η εποπτεία και την διαχείριση του συστήματος οι οποίες είναι: Η βάση δεδομένων InfluxDB, το πρόγραμμα απεικόνισης και δημιουργίας ειδοποιήσεων Grafana, ο mosquitto MQTT Broker, το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την μετάβαση των δεδομένων από τον Broker στην βάση δεδομένων Node-RED και το πρόγραμμα που διαχειρίζεται την ασφάλεια ο Nginx Proxy manager. Έπειτα περιγράφεται η λειτουργία των συσκευών που αποτελούν το σύστημα οι οποίες είναι: Η έξυπνη πρίζα Shelly Plus Plug S και το Shelly EM που κατασκευάζονται από την εταιρία Shelly. Τέλος, εξάγονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό της εφαρμογής και της λειτουργίας των συσκευών με τις εφαρμογές στο εικονικό μηχάνημα.

4.1 Διάγραμμα Ευφυούς Συστήματος

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα δεν διαχειρίζεται με τον βέλτιστο τρόπο την παραγόμενη ενέργεια. Ομοίως, από την πλευρά της οικίας ο χρήστης δεν γνωρίζει την παραγόμενη ενέργεια, την καταναλισκόμενη ενέργεια ή ακόμα και την παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας. Για αυτό τον λόγο, στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας σχεδιάστηκε ένα σύστημα ευφυούς ελέγχου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Μπλοκ Διάγραμμα Ευφυούς συστήματος

Αρχικά, διεξάγεται η εποπτεία της παραγόμενης ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος με την χρήση αισθητήρων καταγραφής της παραγόμενης τάσης DC και AC και την θερμοκρασία με την χρήση μια έξυπνης συσκευής που διαθέτουν τα μέρη του συστήματος όπως: οι μπαταρίες και ο αντιστροφέας. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται με την χρήση έξυπνης διάταξης με αμπεροτσιμπίδες (clamps) στον γενικό πίνακα του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και στις μπαταρίες. Τα δεδομένα της παραγόμενης ενέργειας αποστέλλονται στο εικονικό μηχάνημα στο

οποίο διενεργείται η απαραίτητη επεξεργασία των δεδομένων ώστε ο χρήστης να γνωρίζει αν διαθέτει επαρκή ενέργεια για την τροφοδότηση της οικίας του ή για την φόρτιση των μπαταριών. Με την παρουσία ταυτοχρονισμού η πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται στην οικία ή χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών. Για την βέλτιστη κατανάλωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να καταγράφεται σε πραγματικό χρόνο η καταναλισκόμενη ενέργεια της οικίας. Αυτό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση έξυπνων πριζών στην οικία ώστε να λαμβάνονται δεδομένα από όλες τις συσκευές που καταναλώνουν ρεύμα. Έπειτα, τα δεδομένα από την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια αποστέλλονται σε έναν MQTT Broker ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε έναν εικονικό μηχάνημα. Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Node-RED το οποίο αποτελεί τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στον Broker και στην βάση δεδομένων που αποστέλλονται τα δεδομένα. Επειδή, τα δεδομένα αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο και η επεξεργασία τους απαιτεί την χρήση timestamps χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων InfluxDB η οποία αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή σε αυτές τις βάσεις. Επιπρόσθετα, για την δημιουργία ειδοποιήσεων και απεικονίσεων (dashboards) των δεδομένων αυτών χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Grafana το οποίο συνεργάζεται άριστα με την βάση δεδομένων InfluxDB. Επιπλέον, δημιουργούνται ειδοποιήσεις με την χρήση των απεικονίσεων οι οποίες αποστέλλονται στο κινητό του χρήστη ώστε να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του συστήματος. Τέλος, με την γνώση των δεδομένων αυτών ενεργοποιούνται αυτοματισμοί όπως το άνοιγμα του κλιματιστικού το οποίο βρίσκεται συνδεδεμένο σε μία έξυπνη πρίζα και μέσω του δικτύου του Wi-Fi ώστε να αξιοποιείται βέλτιστα η παραγόμενη περίσσια ενέργεια.

4.2 Έξυπνοι Μετρητές Ενέργειας

Οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας χρησιμοποιούνται για την καταγραφή και τον έλεγχο των καταναλώσεων των ηλεκτρικών συσκευών που βρίσκονται σε μια οικία. Για την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες για τη μέτρηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, με πιο δεδομένη εκείνη που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Hall. Το φαινόμενο Hall εμφανίζεται με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου κάθετα στην ροή του ρεύματος. Έπειτα, το μαγνητικό πεδίο ασκεί μια δύναμη στους φορείς ηλεκτρονίων εντός του αγωγού, μετατοπίζοντας και συσσωρεύοντας του φορείς σε μια συγκεκριμένη πλευρά του αγωγού. Στους έξυπνους μετρητές ενέργειας, ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι με την μορφή της αμπεροτσιμπίδας (clamp). Όταν το ρεύμα διέρχεται μέσα από τον αγωγό και επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο, ο αισθητήρας Hall ανιχνεύει τη δημιουργούμενη ηλεκτρική τάση την τάση Hall. Η τάση Hall είναι ευθέως ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αποτελώντας τον θεμελιώδη μηχανισμό λειτουργίας για τους αισθητήρες που χρησιμοποιούν το φαινόμενο αυτό. Αυτοί οι αισθητήρες αξιοποιούν αυτό το φαινόμενο για να διευκολύνουν την ακριβή και αποτελεσματική ανίχνευση και μέτρηση των μαγνητικών πεδίων σε διάφορες εφαρμογές [33]. Η χρήση του φαινομένου Hall σε έξυπνους μετρητές ενέργειας προσφέρει τη δυνατότητα ακριβούς μέτρησης του ρεύματος χωρίς την ανάγκη για άμεση φυσική επαφή με τον αγωγό. Επιπρόσθετα, με την χρήση των έξυπνων μετρητών, υλοποιούνται λειτουργίες, όπως η διεξαγωγή απομακρυσμένων μετρήσεων και ελέγχου λειτουργίας των συσκευών. Σε αυτή την ΔΕ χρησιμοποιούνται δύο έξυπνοι μετρητές ενέργειας της εταιρίας Shelly οι οποίοι είναι: Η έξυπνη πρίζα Shelly Plus Plug S και συσκευή Shelly EM με την προσθήκη δυο αμπεροτσιμπίδων (clamps) των 50A έκαστος.

4.2.1 Shelly Plus Plug S

Για την μέτρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας της οικίας χρησιμοποιούνται έξυπνες πρίζες της εταιρίας Shelly. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτή την ΔΕ είναι το Shelly Plus Plug το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2 και διαθέτει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Μέτρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο σε Wh
- Μέτρηση της έντασης του ρεύματος σε πραγματικό χρόνο σε A
- Μέτρηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην πρίζα σε βαθμούς κελσίου °C
- Μέτρηση της τάσης του ρεύματος σε V

Επιπλέον, η πρίζα διαθέτει επιλογές για την σύνδεση στο διαδίκτυο με την χρήση :

- Σύνδεση σε MQTT server με την εισαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων
- Σύνδεση με την χρήση BLE
- Σύνδεση σε δίκτυο Wi-Fi

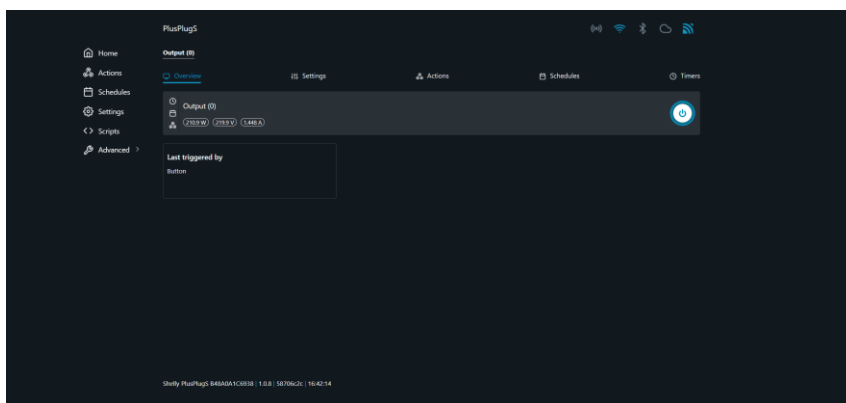
Τα χαρακτηριστικά που διαθέτει το μοντέλο αυτό είναι αυτά τα παρακάτω:

- Διαχειρίζεται φορτία με μέγιστη ένταση 12A
- Διατίθεται ενδείξεις LED που σχετίζονται με την κατανάλωση του ρεύματος
- Διαθέτει το ολοκληρωμένο ESP32 το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε συσκευές για την υλοποίηση αυτοματισμών με την χρήση script προγραμμάτων.



Εικόνα 4.2 Πρίζα Shelly Plus Plug S

Η πρίζα διαθέτει περιβάλλον αλληλεπίδρασης σε περιβάλλον φυλλομετρήτη ούτως ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.3:

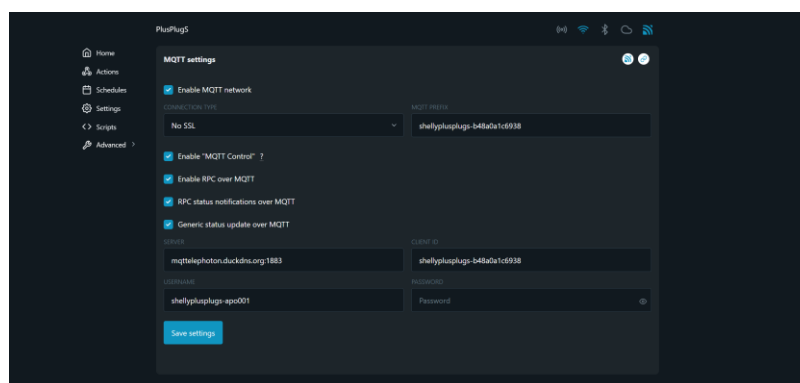


Εικόνα 4.3 Περιβάλλον Ρύθμισης Shelly Plus Plug S

Επιπλέον παρέχεται από την Shelly η δυνατότητα ρύθμισης της έξυπνης πρίζας εκτός από το γραφικό περιβάλλον με την χρήση προγραμμάτων Scripts τα οποία χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή των πιστοποιητικών στην πρίζα και την σύνδεση της απευθείας στον MQTT Broker που έχει κατασκευαστεί στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας. Στο Παράρτημα Α παρατίθενται τα script τα οποία χρησιμοποιούνται για την σύνδεση της έξυπνης πρίζας στον Broker. Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζονται τα στοιχεία που χρειάζονται για την σύνδεση σε έναν MQTT Broker τα οποία είναι¹¹:

- Το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ Broker και πρίζας
- Το όνομα του θέματος που θα έχει στο MQTT Broker
- Στον server στο οποίο συνδέεται στην περίπτωση μας στον `mqttelephoton.duckdns.org:1883`
- Το όνομα της συσκευής
- Τα στοιχεία πρόσβασης στον server δηλαδή τον κωδικό πρόσβασης και το όνομα του χρήστη

Για την εφαρμογή των παραπάνω ρυθμίσεων απαιτείται η επανεκκίνηση της συσκευής η οποία πραγματοποιείται μετά την αποθήκευση των ρυθμίσεων.

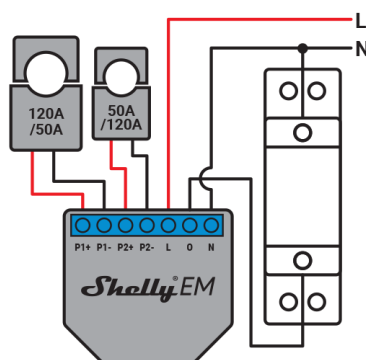


Εικόνα 4.4 Περιβάλλον Ρύθμισης Πρίζας Shelly

¹¹ MQTT | Shelly Technical Documentation.” Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://shelly-api-docs.shelly.cloud/gen2/ComponentsAndServices/Mqtt>

4.2.2 Shelly EM

Το Shelly EM (energy meter), είναι μία συσκευή η οποία χρησιμοποιείται στη παρούσα υλοποίηση, για την καταμέτρηση της παραγόμενης ενέργειας του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και για την κατάσταση των μπαταριών. Για την πραγματοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων, χρησιμοποιούνται δυο συσκευές Shelly EM και δύο επαγωγικές αμπεροτσιμπίδες των 50A οι οποίες χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall για την διεξαγωγή μετρήσεων. Με την χρήση τους προσφέρεται ένα επίπεδο προστασίας στην ίδια την συσκευή αλλά και στο δίκτυο του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς δεν χρειάζεται να γίνει καμία επέμβαση στους αγωγούς της καλωδίωση του συστήματος. Επιπλέον, διαθέτει λειτουργία προστασίας για την υπερκατανάλωση και την υπερφόρτιση των συσκευών στις οποίες είναι συνδεδεμένες. Αυτές οι λειτουργίες δεν χρησιμοποιούνται από την παρούσα ΔΕ διότι το Shelly EM συνδέεται στον αντιστροφέα του μονοφασικού συστήματος και στο σύστημα των μπαταριών. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της συσκευής. Στην πρώτη συσκευή συνδέεται οι αμπεροτσιμπίδες p1 και p2 στην έξοδο των string των φωτοβολταϊκών πάνελ pv1 και pv2 αντίστοιχα. Στην δεύτερη συσκευή συνδέονται στην έξοδο του αντιστροφέα το p1 και στην είσοδο των μπαταριών το p2¹².



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα Συνδεσμολογίας Shelly EM

¹² "Shelly EM + 2x 50A Clamp," Easy Smart Home Automation. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.shelly.com/en/products/shop/shelly-em-120a/shelly-em-2x-50a>

4.3 Υπηρεσίες Νεφοϋπολογιστικής

Η εγκατάσταση των εφαρμογών που αποτελούν το ευφρές σύστημα εποπτείας και διαχείρισης πραγματοποιείται σε ένα εικονικό μηχάνημα που έχει παραχωρηθεί για τις ανάγκες της ΔΕ από την υποδομή Okeanos-Knossos του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας και Έρευνας (ΕΔΥΤΕ Α.Ε – GRNET S.A). Η πλατφόρμα αυτή δημιουργήθηκε για την κάλυψη των αναγκών υπολογιστικών υποδομών της ακαδημαϊκής κοινότητας. Ο ~Okeanos-Knossos προσφέρει την υποδομή ως υπηρεσία Cyclades (Infrastructure as a Service – IaaS) όπου δημιουργούνται εικονικά μηχανήματα τα οποία διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Επιλογή λειτουργικών συστημάτων
- Επιλογή του αριθμού των πυρήνων CPU και RAM ανά εικονικό μηχάνημα
- Συνεχή σύνδεση στο διαδίκτυο
- Δημιουργία ιδιωτικών δικτύων
- Απομακρυσμένη σύνδεση μέσω φυλλομετρητή
- Παροχή τοίχους προστασίας
- Εισαγωγή αρχείων

Για την απομακρυσμένη διαχείριση η πλατφόρμα Cyclades διαθέτει ένα γραφικό περιβάλλον στο οποίο παρατηρείται η κατάσταση και τα στοιχεία των εικονικών μηχανημάτων που έχουν δημιουργηθεί από τον χρήστη. Ο χρήστης οποιαδήποτε στιγμή μπορεί να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών δυνατοτήτων σε κάθε εικονικό μηχάνημα καθώς και να διαχειριστεί την λειτουργία τους. Το εικονικό μηχάνημα που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της ΔΕ διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στην Εικόνα 4.6:

- Επεξεργαστή τεσσάρων πυρήνων
- 4 GB μνήμη RAM
- Σκληρό δίσκο με χωρητικότητα 30 GB
- Λειτουργικό σύστημα Ubuntu 22.04.4 LTS
- Διεύθυνση δικτύου snf-39158.ok-kno.grnetcloud.net ή 83.212.81.135[34]

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



Εικόνα 4.6 Πίνακας Ελέγχου Εικονικού Μηχανήματος

Με την δημιουργία του εικονικού μηχανήματος χρησιμοποιείται για την σύνδεση του το πρωτόκολλο επικοινωνίας SSH όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.7. Για την πραγματοποίηση της σύνδεσης αυτής ανοίγεται μια τερματική κονσόλα όπου πληκτρολογούνται από τον χρήστη οι εντολή `ssh <username>@<όνομα DNS(elephoton.duckndns.org ή IP>`.

```
user@snf-39158: ~
<1> user@snf-39158:~$ ssh user@elephoton.duckndns.org
Welcome to Ubuntu 22.04.3 LTS (GNU/Linux 5.15.0-89-generic x86_64)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com
 * Management:    https://landscape.canonical.com
 * Support:       https://ubuntu.com/advantage

System information as of Sat Mar  2 04:12:49 PM EET 2024

System load:          0.07275390625
Usage of /:           40.1% of 29.39GB
Memory usage:        31%
Swap usage:          0%
Processes:           164
Users logged in:     0
IPv4 address for br-202fa56f54a1: 172.27.0.1
IPv4 address for br-ae2aa4d780aa: 172.18.0.1
IPv4 address for docker0:      172.17.0.1
IPv6 address for eth0:         2001:648:2ffe:501:cc00:12ff:fe70:9945
IPv4 address for eth1:        83.212.81.135

Expanded Security Maintenance for Applications is not enabled.

53 updates can be applied immediately.
To see these additional updates run: apt list --upgradable

Enable ESM Apps to receive additional future security updates.
See https://ubuntu.com/esm or run: sudo pro status

*** System restart required ***
Last login: Sat Mar  2 16:12:50 2024 from 85.74.5.138
user@snf-39158:~$
```

Εικόνα 4.7 Απομακρυσμένη Είσοδος στο Εικονικό μηχανήμα

4.3.1 Nginx Proxy Manager

Για την εγκατάσταση των εφαρμογών χρησιμοποιείται όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα εικονικό μηχάνημα στην πλατφόρμα IaaS Okeanos-Knossos. Το εικονικό μηχάνημα είναι προσβάσιμο από μια IPv4 στατική διεύθυνση μέσω SSH πρωτοκόλλου. Οι υπηρεσίες που εξυπηρετούνται από το πρωτόκολλο http, δεν θεωρούνται πλέον ασφαλείς, διότι δεν διατίθεται καμία μορφή κρυπτογράφησης των δεδομένων στις συνεδρίες των χρηστών. Αντίθετα, οι σελίδες που προσφέρονται μέσω https θεωρούνται ασφαλείς καθώς κάνουν χρήση του πρωτοκόλλου SSL/TLS. Για αυτό τον σκοπό έχει δημιουργηθεί μια μικροϋπηρεσία reverse proxy, ώστε να προστατευτούν όλες οι υπόλοιπες μικροϋπηρεσίες που υλοποιούνται σε αυτό το σύστημα, από πιθανές κακόβουλες ενέργειες. Η εγκατάσταση του Nginx Proxy Manager στο εικονικό μηχάνημα πραγματοποιείται με την χρήση της τεχνολογίας Docker και πιο συγκεκριμένα με την δημιουργία ενός docker-compose.yml αρχείου, το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα Γ. Τα πλεονεκτήματα που διαθέτει η χρήση του είναι¹³ :

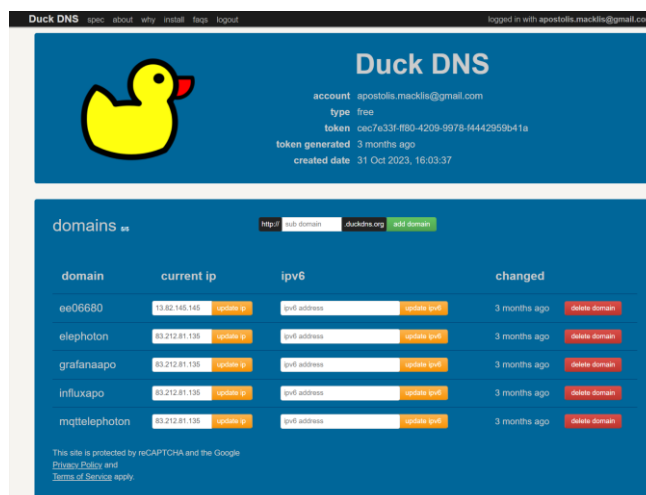
- Ο έλεγχος του φορτίου του δικτύου για την ίση κατανομή των πόρων στους πελάτες, βελτιστοποιώντας την ταχύτητα, την επίδοση και την χωρητικότητα του.
- Ελέγχονται δεδομένα που διακινούνται και πραγματοποιείται SSL κρυπτογράφηση
- Προσφέρεται η δυνατότητα σύνδεσης σε πολλαπλούς server, μέσω μίας κοινής διεύθυνσης URL.

¹³ "Nginx Proxy Manager." Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://nginxproxymanager.com/>

4.3.2 Δημιουργία DNS

Για την απομακρυσμένη πρόσβαση στις υπηρεσίες που δημιουργούνται για την υλοποίηση αυτής της ΔΕ, χρησιμοποιείται η υπηρεσία δυναμικού DNS, DuckDNS. Για την χρήση της υπηρεσίας αυτής πρέπει να πραγματοποιηθεί εγγραφή. Μετά την ολοκλήρωση της εγγραφής δημιουργούνται 5 domain names τα οποία χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση reverse proxy. Οι διευθύνσεις που δημιουργήθηκαν είναι και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.8¹⁴:

- <https://influxapo.duckdns.org/>
- <https://grafanaapo.duckdns.org/>
- <https://elephoton.duckdns.org/>
- <https://mqtelephoton.duckdns.org/>
- <https://npmelephoton.duckdns.org/>



Εικόνα 4.8 Περιβάλλον Εφαρμογής DuckDNS

¹⁴ Duck DNS - why." Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.duckdns.org/why.jsp>

4.3.3 Mosquitto MQTT Broker

Σε αυτή την ΔΕ χρησιμοποιείται ο Mosquitto MQTT Broker. Είναι ένας Broker ανοιχτού κώδικα και υλοποιούνται οι εκδόσεις 5.0, 3.1.1 και 3.1 του πρωτοκόλλου MQTT. Επιπλέον, λόγω του ελαφριού πρωτοκόλλου χρησιμοποιείται σε πολλές συσκευές. Το πρωτόκολλο MQTT παρέχει μια ελαφριά μέθοδο εκτέλεσης μηνυμάτων χρησιμοποιώντας το μοντέλο Publisher/Subscriber. Η τεχνολογία αυτή είναι βέλτιστη για ανταλλαγή μηνυμάτων στο ΔτΠ με την χρήση της επικοινωνίας M2M. Στον Mosquitto Broker παρέχει επίσης μια βιβλιοθήκη C για την υλοποίηση πελατών MQTT. Το Mosquitto Broker αποτελεί μέρος του Eclipse Foundation και αναπτύσσεται από την εταιρία Cedalo¹⁵. Η έξυπνη πρίζα δημοσιεύει στον Broker τα δεδομένα της για την δημιουργία ενός θέματος το οποίο χρησιμοποιείται για την λήψη των δεδομένων από το πρόγραμμα γέφυρας δεδομένων. Για την ρύθμιση του Broker χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.9 και στο παράρτημα Γ.



```
<1> user@snf-39158:~$ cat /etc/docker/daemon.json
{
  "services": {
    "mqtt": {
      "image": "eclipse-mosquitto:2.0.15",
      "restart": "unless-stopped",
      "environment": [
        "VIRTUAL_HOST=${BROKER_HOST}",
        "PUID=1000",
        "PGID=1000",
        "TZ=Europe/Athens"
      ],
      "ports": [
        "1883:1883",
        "8883:8883",
        "9883:9883"
      ],
      "volumes": [
        "./mosquitto.conf:/mosquitto/config/mosquitto.conf",
        "./pwfile:/etc/mosquitto/pwfile"
      ]
    }
  }
}
```

Εικόνα 4.9 Ρύθμιση Mosquitto MQTT Broker

¹⁵ "Eclipse Mosquitto," Eclipse Mosquitto. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://mosquitto.org/>

4.3.4 Node-RED

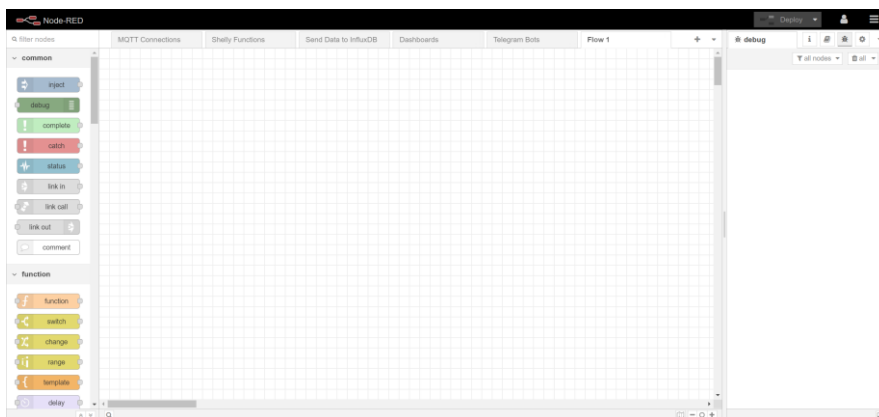
Τα δεδομένα που στέλνει η έξυπνη πρίζα στον MQTT Broker χρειάζονται επεξεργασία ώστε να υλοποιηθούν διάφορες εφαρμογές. Για αυτό το λόγο ο Broker στέλνει τα δεδομένα της πρίζας για επεξεργασία στο πρόγραμμα Node-RED, το οποίο είναι ένα προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο μπορούν να συνδεθούν συσκευές, διαδικτυακές υπηρεσίες και API. Είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που δημιουργήθηκε από την εταιρία IBM και διαθέτει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Δημιουργία απεικονίσεων
- Δημιουργία ροών
- Επεξεργασία δεδομένων
- Συνθετικός κρίκος ανάμεσα σε εφαρμογές που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μεταξύ τους

Το Node-RED διαθέτει την ιδιότητα κατασκευής ροών με την επιλογή έτοιμων προγραμμάτων που παρέχονται από την εταιρία. Επιπλέον, διατίθενται κόμβοι οι οποίοι συνδυάζονται ώστε να επιτευχθούν ροές οι οποίες υλοποιούν διάφορες λειτουργίες που θέλει να πραγματοποιήσει ο χρήστης. Η κατασκευή αυτών των ροών πραγματοποιείται με την λειτουργία drag and drop. Η αποθήκευση των ροών γίνεται στην γλώσσα JSON η οποία όντας αρκετά ελαφριά μπορεί να εξάγεται και να εισάγεται εύκολα σε άλλες συσκευές. Η γλώσσα λειτουργίας του βασίζεται στην Node.js. Η δημιουργία μιας ροής στον Node-RED πραγματοποιείται από τα παρακάτω βήματα:

- Προσθήκη ενός κόμβου inject
- Προσθήκη ενός κόμβου debug στον οποίο απεικονίζεται το payload του μηνύματος
- Προσθήκη ενός κόμβου Function όπου γράφεται κώδικας στην γλώσσα javascript για την επεξεργασία των δεδομένων
- Υλοποίηση συνδέσεων των κόμβων της ροής
- Εκτέλεση κώδικα πατώντας το πλήκτρο Deploy

Η λειτουργία του πραγματοποιείται τοπικά ανοίγοντας την πόρτα 1880. Στην αυτή την ΔΕ έχει δημιουργηθεί DNS ώστε να υπάρχει απομακρυσμένη πρόσβαση στο πρόγραμμα στην διεύθυνση <https://elephoton.duckdns.org/> όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.10 [34]. Τέλος, η εγκατάσταση του προγράμματος γέφυράς στο εικονικό μηχάνημα πραγματοποιείται με την χρήση του docker και με την δημιουργία ενός docker-compose αρχείου το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.



Εικόνα 4.10 Το Πρόγραμμα Node-RED

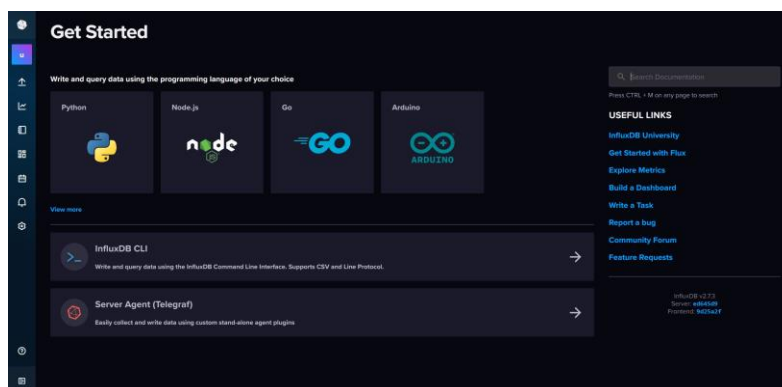
4.3.5 InfluxDB

Η InfluxDB είναι μια “SQL like” βάση δεδομένων αποθήκευσης δεδομένων χρονοσειρών (timeseries) η οποία διαχειρίζεται δεδομένα τα οποία διαθέτουν ένα αναγνωριστικό timestamp. Η βάση αυτή ανήκει στην κατηγορία των “Non-SQL” βάσεων δεδομένων λόγω της διαφορετικής δομής της. Η είσοδος στην σελίδα που βρίσκεται το UI της InfluxDB πραγματοποιείται ανοίγοντας έναν φυλλομετρητή και πληκτρολογώντας την παρακάτω διεύθυνση αν τρέχει η υπηρεσία τοπικά: localhost:8086 εναλλακτικά την IP διεύθυνση που βρίσκεται η υπηρεσία μαζί με την πόρτα της π.χ.: 192.168.1.3:8086 ή στην περίπτωση μας την ιστοσελίδα: <https://influxapo.duckdns.org/> και καταχωρώντας το όνομα χρήστη και τον κωδικό πρόσβασης. Η βάση αυτή αποτελεί μια υπηρεσία SaaS και υλοποιείται στην πόρτα 8086. Η είσοδος στην βάση απεικονίζεται στην Εικόνα 4.11. Η εγκατάσταση της βάσης δεδομένων στο εικονικό μηχάνημα πραγματοποιείται με την χρήση του docker και με την δημιουργία ενός docker-compose αρχείου το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.



Εικόνα 4.11 Είσοδος στην InfluxDB

Μετά από το παράθυρο εισόδου στην εφαρμογή εμφανίζεται η βάση δεδομένων και η λειτουργίες που διαθέτει απεικονίζονται στην Εικόνα 4.12:

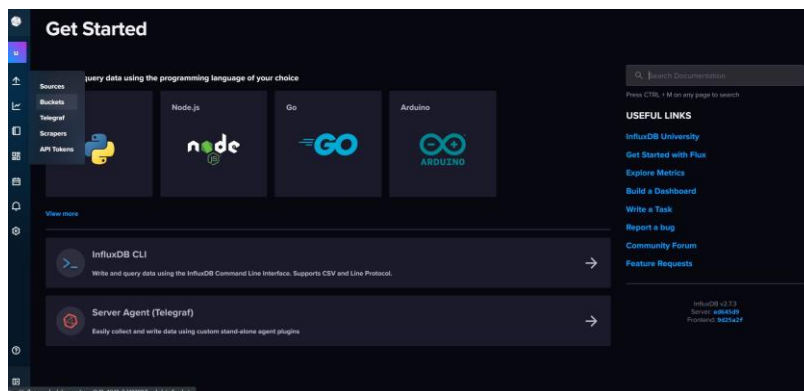


Εικόνα 4.12 Βάση Δεδομένων InfluxDB

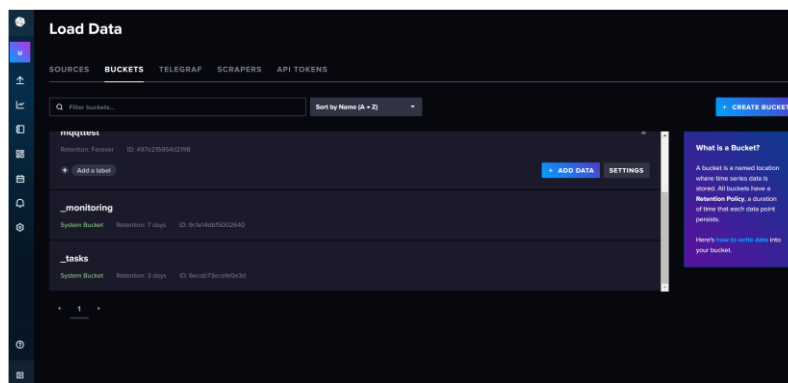
Για την δημιουργία της βάσης δεδομένων, δημιουργείται ένα bucket στο οποίο αποστέλλονται τα δεδομένα και δημιουργούνται τα κατάλληλα query από τον χρήστη. Για να την δημιουργία του επιλέγουμε την επιλογή buckets όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 4.13. Στο παράθυρο αυτό εμφανίζονται όλοι οι buckets που υπάρχουν στην βάση. Τα ονόματα των προεπιλεγμένων buckets ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Απόστολος Κλής

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

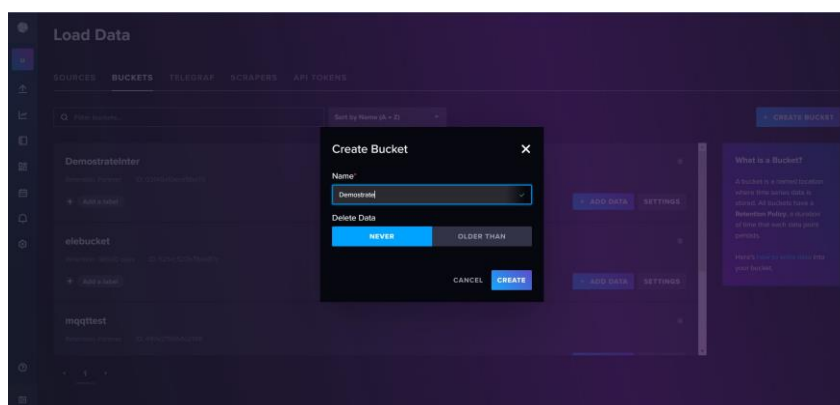
είναι `_monitoring` και `_tasks`. Δημιουργούμε έναν νέο bucket επιλέγοντας το κουμπί CREATE BUCKET όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.14. Τέλος ανοίγει το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 4.15 και ο χρήστης ορίζει το όνομα του bucket και τον χρόνο που επιθυμεί να διατηρεί τα δεδομένα. Στην ΔΕ ο χρόνος διατήρησης των δεδομένων είναι τριάντα ημέρες.



Εικόνα 4.13 Δημιουργία Bucket στην InfluxDB



Εικόνα 4.14 Μενού Bucket InfluxDB



Εικόνα 4.15 Επιλογή Χρόνου Διατήρησης Δεδομένων και Όνομα Bucket InfluxDB

Τα δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται στο Bucket με το όνομα ShellyPlugaro001 αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας την δομή και τα χαρακτηριστικά της βάσης δεδομένων τα οποία είναι :

- **Measurement:** Είναι ο τύπος της μέτρησης που αποστέλλεται στην βάση δεδομένων είναι υποχρεωτική και ο τύπος της είναι string (αλφαριθμητικό).
- **Tag_key-Tag_value:** Αποτελούν πεδία τα οποία συμβάλλουν στην αναγνώριση και τον διαχωρισμό μιας μέτρησης από μια άλλη και οι τιμή που παίρνουν είναι αλφαριθμητικού και έχουν προαιρετικό ρόλο.
- **Field_key-Field_value:** Είναι το πεδίο της μέτρησης το οποίο πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα πεδίο από τα δύο που προσφέρονται. Η τιμή που λαμβάνουν τα keys είναι σε μορφή αλφαριθμητικού ενώ η μορφή των value είναι είτε ακέραιος, δεκαδικός, δυαδικός είτε αλφαριθμητικό.
- **timestamp:** Είναι αναγνωριστικό των μετρήσεων οι οποίες προϋποθέτουν την ύπαρξη χρονικής σειράς ώστε να αναγνωριστούν από την βάση δεδομένων. Η σειρά αυτή είναι σημαντική διότι καθορίζει την σχέση των μετρήσεων ανάλογα με τον χρόνο διεξαγωγής τους. Το timestamp δίνεται είτε από τον χρήστη είτε το τοποθετεί η βάση μόνη της. Ο χρόνος μετρείται με το πρότυπο unix nanosecond και είναι ο τοπικός χρόνος του μηχανήματος.

Στην Εικόνα 4.16 απεικονίζεται η δομή του bucket που έχει δημιουργηθεί για τους σκοπούς της ΔΕ και διαθέτει τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Στο πεδίο του time καταγράφεται το timestamp δηλαδή ο χρόνος ο οποίος συνδέεται με αυτή την μέτρηση. Έπειτα στο πεδίο των τιμών καταγράφονται οι τιμές των μετρήσεων που αποστέλλονται στην βάση. Στο πεδίο field καταγράφεται το είδος της τιμής. Στο πεδίο των μετρήσεων καταχωρούνται οι μετρήσεις που καταγράφονται από την έξυπνη πρίζα και το αποτέλεσμα των συναρτήσεων οι οποίες είναι:

- Η τάση του ρεύματος
- Η ένταση του ρεύματος
- Η Θερμοκρασία
- Η τιμή του ρεύματος
- Η στιγμιαία κατανάλωση ενέργειας
- Η συνολική κατανάλωση ενέργειας
- Η συνολική ενέργεια σε Wh που καταναλώνεται στο χρονικό διάστημα του λεπτού

_time	_value	_field	_measurement
2024-02-24 10:30:00 GMT+2		3.50 value	Current
2024-02-24 10:30:10 GMT+2		4.05 value	Current
2024-02-24 10:30:50 GMT+2		2.75 value	Current
2024-02-24 10:31:10 GMT+2		1.46 value	Current
2024-02-24 10:32:10 GMT+2		1.46 value	Current
2024-02-24 10:32:20 GMT+2		2.75 value	Current

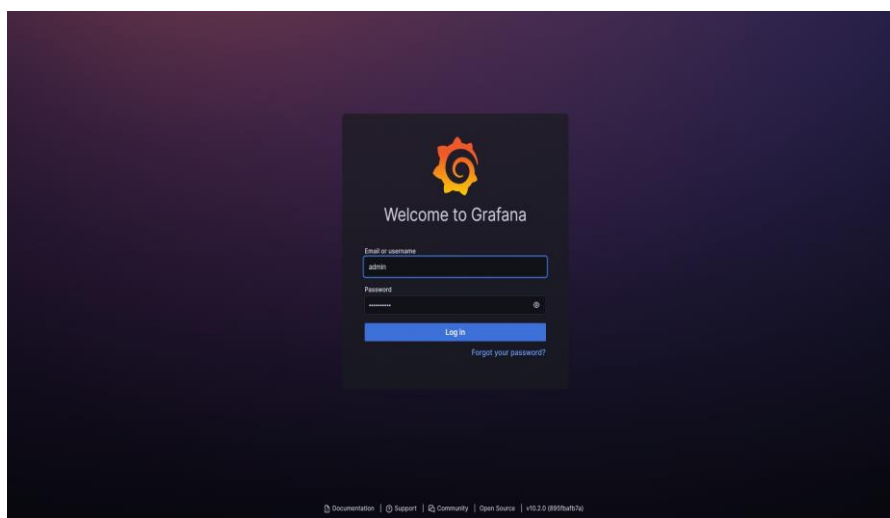
Εικόνα 4.16 Δομή Bucket InfluxDB

4.3.6 Grafana

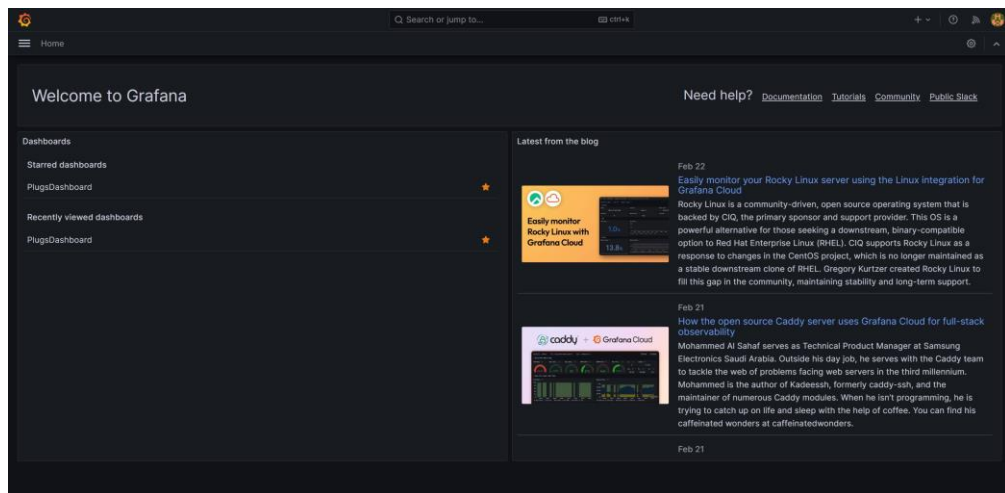
Το Grafana είναι ένα εργαλείο απεικόνισης query δεδομένων ανοιχτού κώδικα το οποίο με τις κατάλληλες ρυθμίσεις δημιουργούνται ειδοποιήσεις και απεικονίζονται τα δεδομένα κάθε query. Ανήκει στις υπηρεσίες SaaS. Δημιουργήθηκε από τον Torkel Ödegaard το 2014. Η δομή του είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να υποστηρίζεται η απεικόνιση δεδομένων τις παρακάτω βάσεις:

- SQL
- Prometheus
- TSDB (InfluxDB)

ανεξάρτητα από τον χώρο αποθήκευσης αυτών των δεδομένων. Στην Εικόνα 4.17 απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον του Grafana το οποίο βρίσκεται στην πόρτα 3000. Σε αυτή την ΔΕ έχει δημιουργηθεί μια ιστοσελίδα με την χρήση της υπηρεσίας δυναμικού DNS duckdns και το Grafana υλοποιείται στην σελίδα αυτή χωρίς να είναι εκτεθειμένη η πόρτα αυτή για λόγους ασφάλειας. Για την είσοδο στο UI του Grafana πληκτρολογείτε σε έναν φυλλομετρητή η παρακάτω διεύθυνση: localhost:3000 ή αν βρίσκεται σε άλλο μηχάνημα εντός του δικτύου: 192.168.1.8:3000 ή στην συγκεκριμένη περίπτωση η διεύθυνση <https://grafanaaro.duckdns.org/>. Τα στοιχεία είσοδου είναι Username admin password admin. Στην συνέχεια ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο μας ζητείται να αλλαχθεί το password. Πληκτρολογείτε το νέο password και κάνουμε login με username: admin και το password που μόλις ορίστηκε από τον χρήστη. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την Εικόνα 4.18.



Εικόνα 4.17 Είσοδος στο Grafana



Εικόνα 4.18 Το Πρόγραμμα Grafana

Τα κύρια χαρακτηριστικά που διατίθενται σε αυτό το πρόγραμμα είναι:

- Απεικόνιση δεδομένων
- Ενοποίηση δεδομένων
- Επεκτασιμότητα (Scalability)
- Δημιουργία Ειδοποιήσεων (Alerting)
- Δημιουργία Απεικονίσεων (Dashboards)

Η απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιείται με την βοήθεια των queries και των dashboards. Επιπλέον οι απεικονίσεις χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ειδοποιήσεων οι οποίες αποστέλλονται στον χρήστη με την μορφή μηνύματος στην εφαρμογή Telegram

4.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν το περιβάλλον και τα μέρη που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό του ευφυούς συστήματος εποπτείας. Αρχικά, υλοποιήθηκε το διάγραμμα της εφαρμογής όπου παρουσιάστηκαν ο τρόπος λειτουργίας και τα μέρη που την αποτελούν. Στην συνέχεια υλοποιήθηκε ένα εικονικό μηχάνημα στην υπηρεσία Okeanos-Knossos ώστε να πραγματοποιείται απομακρυσμένη σύνδεση και πρόσβαση των εφαρμογών από οποιοδήποτε μέρος. Έπειτα, αναλύθηκε η χρήση των μετρητών ενέργειας, τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν, καθώς και τα δεδομένα που αποστέλλονται στον Mosquitto MQTT Broker. Περιγράφεται και αναλύεται η λειτουργία του Broker για την λήψη των δεδομένων από τους έξυπνους μετρητές και την δημιουργία θεμάτων στα οποία αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένα τείχος προστασίας και reverse proxy για την παροχή ασφάλειας στις ιστοσελίδες που κατασκευάστηκαν για αυτή την ΔΕ. Δημιουργήθηκαν DNS για την ασφαλή και απομακρυσμένη πρόσβαση των υπηρεσιών που υλοποιήθηκαν στον εικονικό μηχάνημα. Ακόμη, περιγράφηκε η εγκατάσταση των εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το σύστημα με την χρήση του docker-compose που παρατίθεται στο Παράρτημα Γ. Έπειτα, αναλύθηκε η χρήση του προγράμματος γέφυρας Node-RED για την δημιουργία διαγραμμάτων ροής και επεξεργασίας των δεδομένων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε αποθήκευση των δεδομένων χρονοσειρών που στέλνονται από τους έξυπνους μετρητές στην βάση δεδομένων InfluxDB. Εκεί, αποθηκεύονται τα δεδομένα για την διατήρησή τους και την μελλοντική απεικόνισή τους. Τέλος, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά, η ιδιότητες της εφαρμογής απεικόνισης και ειδοποιήσεων Grafana ώστε στο επόμενο κεφάλαιο να περιγράψει η λειτουργία του συστήματος.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Αποτελέσματα Λειτουργίας του Ευφυούς Συστήματος

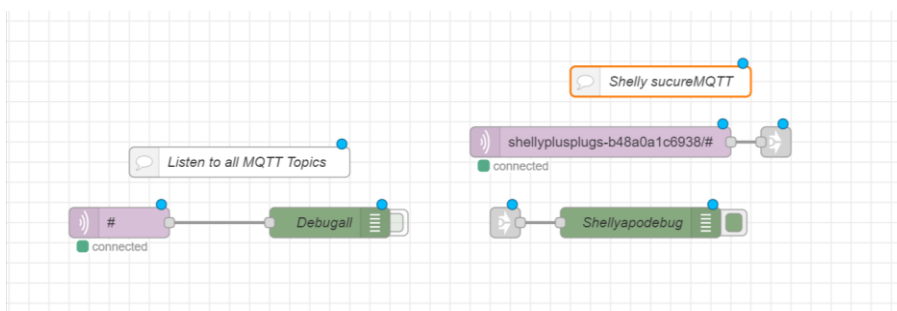
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργία, η δημιουργία απεικονίσεων, η δημιουργία ειδοποιήσεων και η αποστολή αυτών σε ένα κανάλι στην εφαρμογή Telegram ώστε να ενημερώνονται οι χρήστες της οικίας. Στην συνέχεια, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την λειτουργία του ευφυούς συστήματος. Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία αποστολής δεδομένων από τον MQTT Broker στο πρόγραμμα Node-RED. Στην συνέχεια τα δεδομένα επεξεργάζονται κατάλληλα και δημιουργούνται ροές με σκοπό την δημιουργία νέων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση και εποπτεία του συστήματος. Έπειτα, μεταφέρονται στην βάση δεδομένων όπου δημιουργούνται απεικονίσεις. Επιπλέον, τα δεδομένα μεταφέρονται από την βάση δεδομένων στο πρόγραμμα δημιουργίας απεικονίσεων και ειδοποιήσεων, Grafana. Εκεί με την δημιουργία των κατάλληλων ερωτημάτων-αναζητήσεων (queries) από την βάση δεδομένων δημιουργούνται απεικονίσεις και ειδοποιήσεις οι οποίες ενημερώνουν τον χρήστη σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση του συστήματος. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας και αποστολής των ειδοποιήσεων στους χρήστες του συστήματος με την χρήση της εφαρμογής Telegram και εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το κεφάλαιο αυτό.

5.1 Δημιουργία Ροών

Για την λειτουργία του ευφυούς συστήματος εποπτείας αρχικά αποστέλλονται τα δεδομένα της έξυπνης πρίζας στον Mosquitto MQTT Broker που υλοποιήθηκε στο εικονικό μηχάνημα. Επειδή δεν είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων από τον Broker απευθείας στην βάση δεδομένων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Node-RED ως γέφυρα δεδομένων. Για τον εντοπισμό του θέματος στο οποίο εκπέμπονται τα δεδομένα της έξυπνης πρίζας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Από την Εικόνα 5.1 την εισαγωγή του θέματος με πρόθεμα τον ειδικό χαρακτήρα “#” ώστε να ληφθούν όλα τα δεδομένα που δημοσιοποιούνται σε αυτό το θέμα
- Πραγματοποίηση εγγραφής με τον ειδικό χαρακτήρα “#” και με την χρήση ενός κόμβου debug ώστε να εντοπιστούν όλα τα θέματα που υπάρχουν στον Broker

Έπειτα πραγματοποιείται εγγραφή στο θέμα που δημοσιεύονται τα δεδομένα της πρίζας το οποίο είναι: shellyplusplugs-b48a0a1c6938. Για την επαλήθευση χρησιμοποιείται ο κόμβος debug με ο οποίος συνδέεται το θέμα με την χρήση ενός link-in κόμβου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στην Εικόνα 5.1.

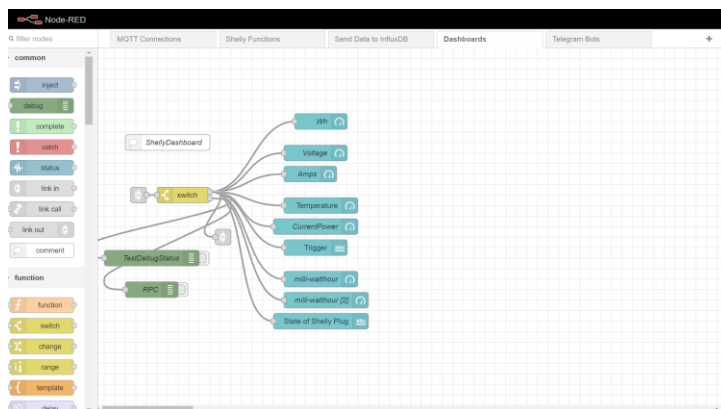


Εικόνα 5.1 Εγγραφή στο θέμα της έξυπνης πρίζας

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

Στην συνέχεια αντλούνται τα δεδομένα της έξυπνης πρίζας με την χρήση του κόμβου switch και με την χρήση του κόμβου debug απεικονίζονται στην μορφή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2 και στην Εικόνα 5.3 αντίστοιχα. Με την άντληση των δεδομένων από την έξυπνη πρίζα δημιουργείται η απεικόνιση της Εικόνα 5.4 η οποία περιέχει τα παρακάτω:

- Την κατάσταση και τον τρόπο ενεργοποίησης
- Την συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια σε Wh
- Την στιγμιαία καταναλισκόμενη ενέργεια σε W
- Την Θερμοκρασία
- Την στιγμιαία τάση και ένταση
- Την στιγμιαία καταναλισκόμενη ενέργεια εκφρασμένη σε mWh

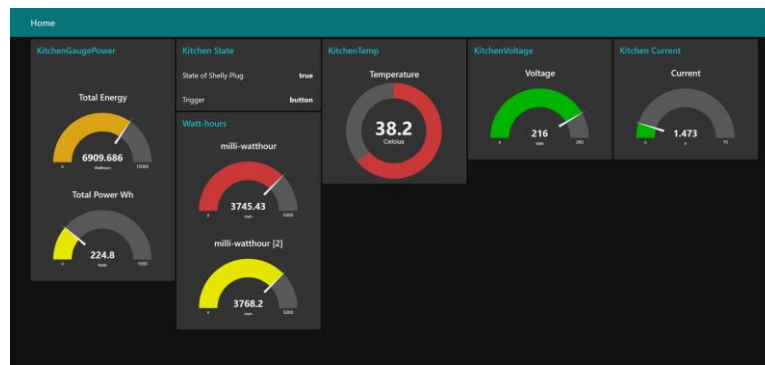


Εικόνα 5.2 Διαχωρισμός δεδομένων στο Node-RED

```
shellyplusplugs-b48a0a1c6938/status/switch:0 :  
msg.payload : Object
```

```
▼ object  
  id: 0  
  source: "button"  
  output: true  
  apower: 9.1  
  voltage: 224.2  
  current: 0.091  
  ▼ aenergy: object  
    total: 7161.457  
    ▶ by_minute: array[3]  
      minute_ts: 1708945319  
  ▼ temperature: object  
    tC: 37.9  
    tF: 100.3
```

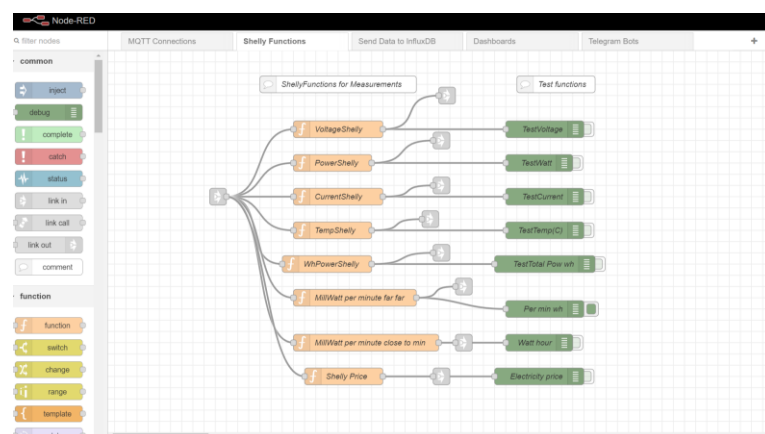
Εικόνα 5.3 Δεδομένα θέματος έξυπνης πρίζας



Εικόνα 5.4 Απεικόνιση Node-RED

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της απεικόνισης στην Εικόνα 5.4 προέρχονται από την έξυπνη πρίζα χωρίς να έχουν υποστεί κάποια είδους επεξεργασία. Έπειτα, τα δεδομένα επεξεργάζονται με την χρήση του κόμβου function όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5 για την υλοποίηση των συναρτήσεων που παρατίθενται στο Παράρτημα Β όπου αφορούν:

- Την κατάσταση και τον τρόπο ενεργοποίησης
- Την συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια σε Wh
- Την στιγμιαία καταναλισκόμενη ενέργεια σε W
- Την Θερμοκρασία
- Την στιγμιαία τάση και ένταση
- Την τιμή της καταναλισκόμενης ενέργειας σε ευρώ
- Την στιγμιαία καταναλισκόμενη ενέργεια εκφρασμένη σε mWh

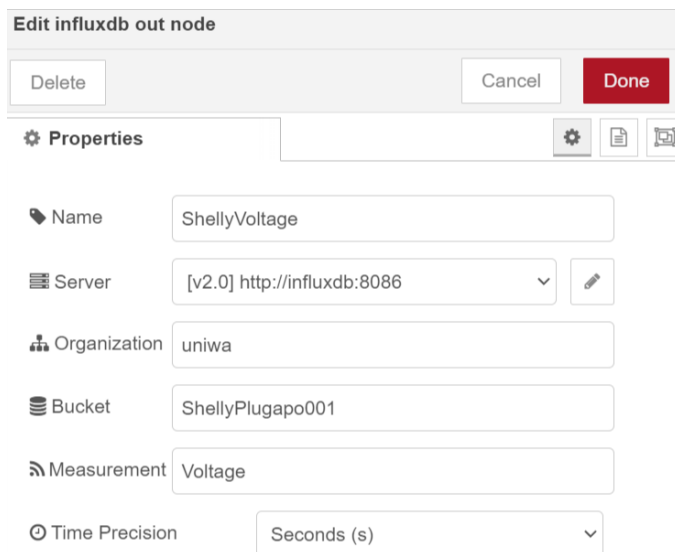


Εικόνα 5.5 Επεξεργασία δεδομένων με την χρήση Function στο Node-RED

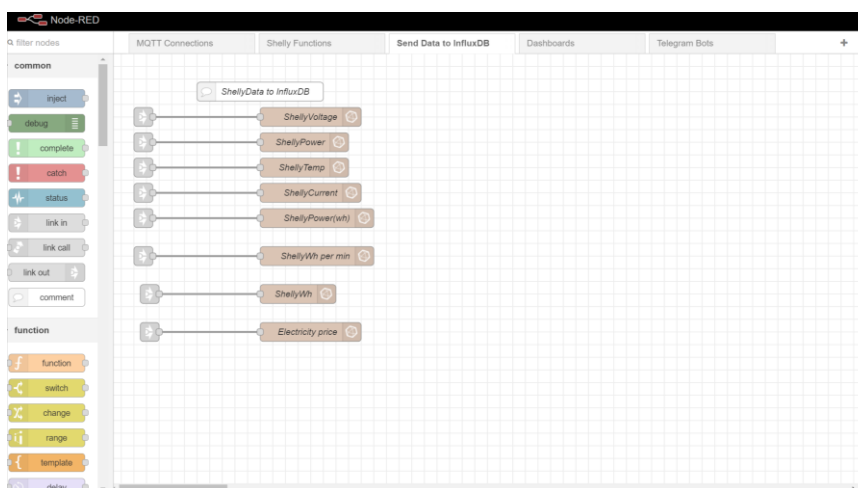
Επιπλέον, για την αποστολή των δεδομένων στην InfluxDB η οποία πραγματοποιείται στην Εικόνα 5.7 χρησιμοποιείται ο κόμβος InfluxDB out στον οποίο πρέπει να καταχωρηθούν τα παρακάτω στοιχεία όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6:

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

- Το όνομα της μέτρησης
- Τα στοιχεία του server της βάσης δεδομένων μαζί με το API token
- Ο οργανισμός που ανήκει
- Ο προορισμός τους δηλαδή το Bucket
- Ο τύπος της μέτρησης
- Η ακρίβεια της μέτρησης



Εικόνα 5.6 Ρύθμιση InfluxDB out κόμβου

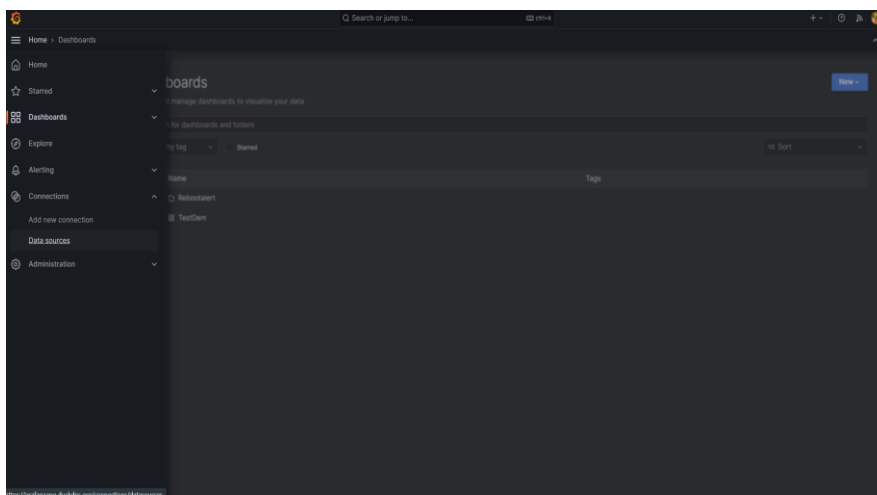


Εικόνα 5.7 Αποστολή δεδομένων στην InfluxDB μέσω Node-RED

Τέλος, για την αποστολή των δεδομένων στην InfluxDB η οποία πραγματοποιείται στην Εικόνα 5.7 χρησιμοποιείται ο κόμβος InfluxDB out στον οποίο πρέπει να καταχωρηθούν τα παρακάτω στοιχεία όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6:

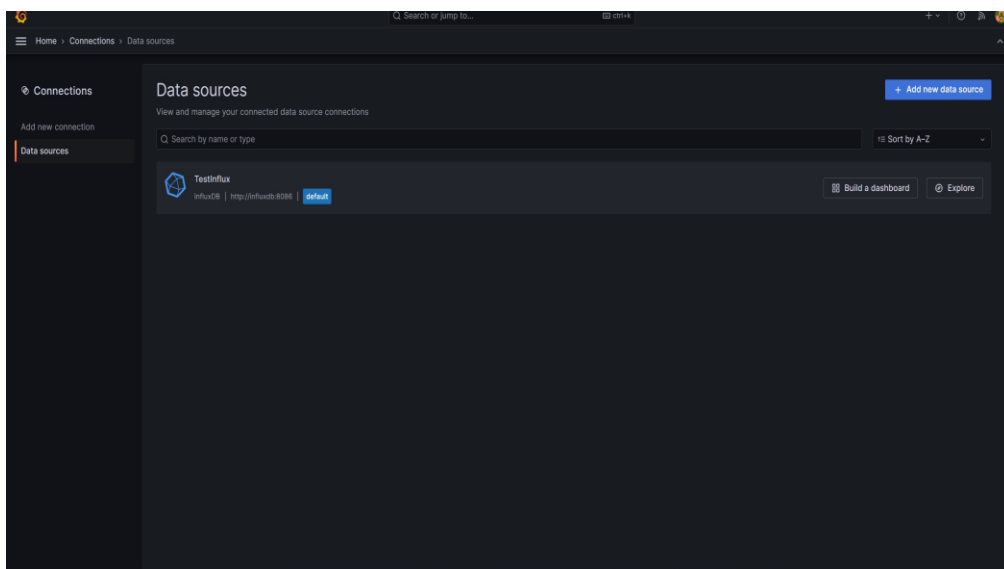
5.2 Δημιουργία Απεικονίσεων

Για την δημιουργία απεικονίσεων (dashboards) στο πρόγραμμα Grafana εισάγεται η βάση δεδομένων από την οποία αντλούνται τα δεδομένα για την δημιουργία των απεικονίσεων. Για την δημιουργία χρησιμοποιείται η επιλογή του μενού connections όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8¹⁶.



Εικόνα 5.8 Μενού Grafana Datasource

Έπειτα, επιλέγεται το μενού Data Sources. Για την προσθήκη επιλέγεται η εντολή “+ Add new data source” όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 5.9

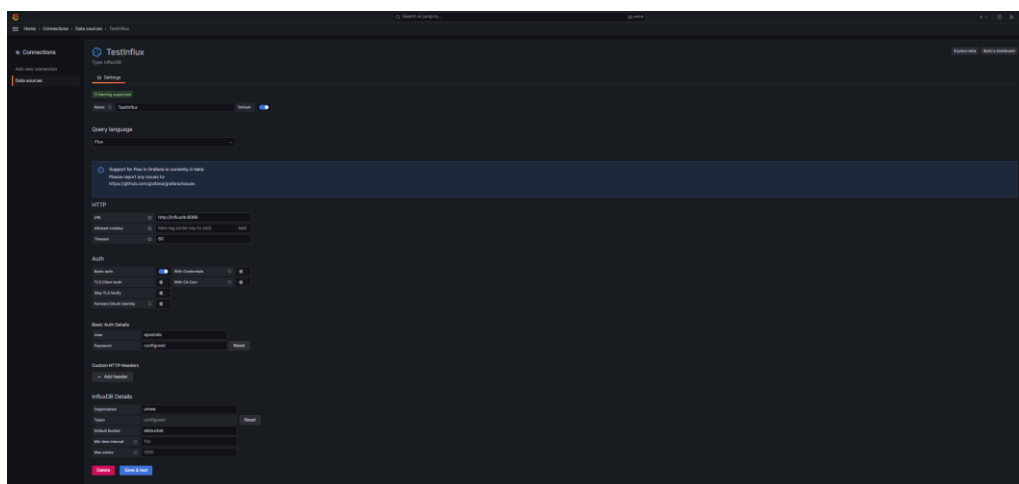


Εικόνα 5.9 Δημιουργία Grafana Data Source

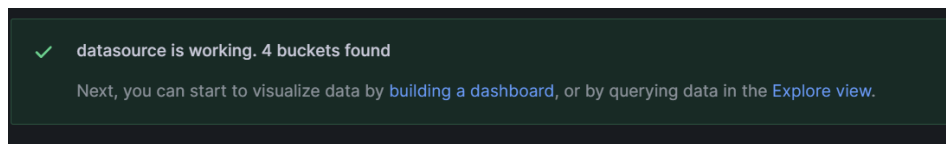
¹⁶ “Dashboards | Grafana documentation,” Grafana Labs. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/dashboards/>

Η διαδικασία για την δημιουργία μιας νέας πηγής δεδομένων είναι η παρακάτω:

- Πληκτρολογείτε το username και το password που το οποίο χρησιμοποιείται για την είσοδο στην InfluxDB
- Στο InfluxDB Details, εισάγονται το όνομα του οργανισμού, το API TOKEN που δημιουργείται στην InfluxDB και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για το Grafana και εισάγεται ο προεπιλεγμένος bucket του συστήματος
- Με την επιλογή Save & Test εμφανίζεται το παρακάτω μήνυμα όπως και στην Εικόνα 5.10 και Εικόνα 5.11 αντίστοιχα



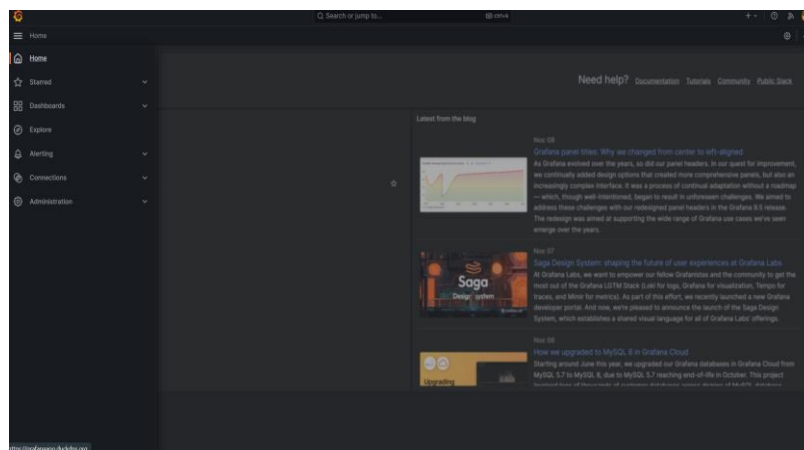
Εικόνα 5.10 Εισαγωγή Data Source InfluxDB στο Grafana



Εικόνα 5.11 Μήνυμα επιτυχούς εγκατάστασης Grafana Data Source

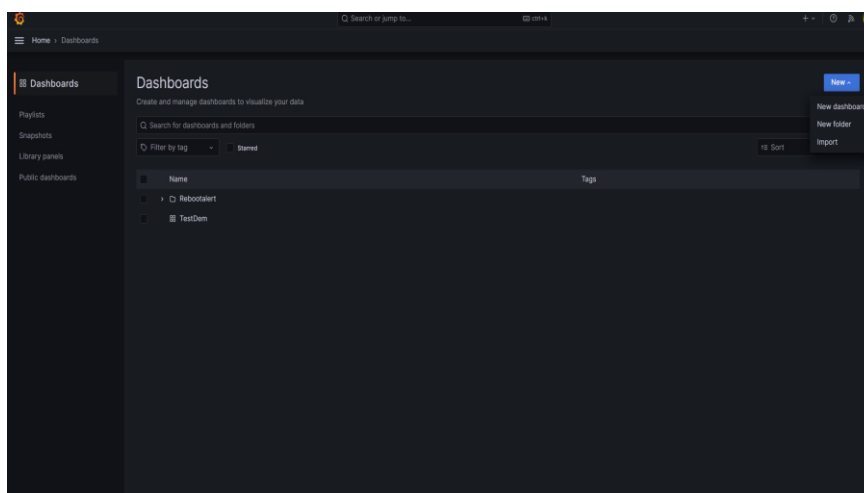
Μετά την δημιουργία του Data Source ο χρήστης μπορεί πλέον να δημιουργήσει ένα dashboard. Για την δημιουργία του πατάμε το κουμπί του αρχικού μενού και την επιλογή dashboards όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.12.

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



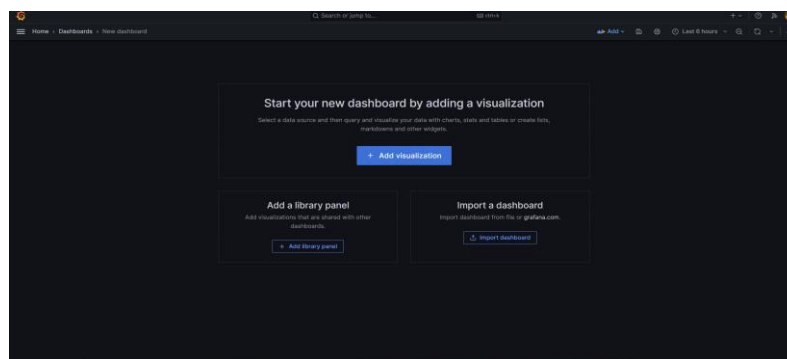
Εικόνα 5.12 Δημιουργία dashboard στο Grafana

Μετά την επιλογή που πραγματοποιήθηκε εμφανίζεται αυτό το παράθυρο και πατάμε το “New” και έπειτα “New dashboard” όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 5.13



Εικόνα 5.13 Εισαγωγή Νέου Grafana Dashboard

Στην συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνα 5.14 και πατάμε το +Add visualization

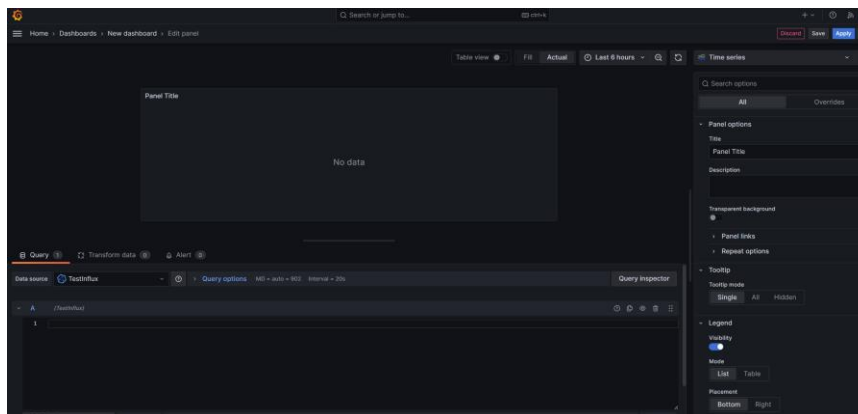


Εικόνα 5.14 Προσθήκη Απεικόνισης στο Grafana

Έπειτα, επιλέγεται στο “Select data source” την βάση που έχει δημιουργηθεί στα προηγούμενα βήματα. Εμφανίζεται αυτό το παράθυρο στο οποίο εισάγεται το query από την βάση δεδομένων την

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

οποία θα επιλεγεί ώστε να απεικονιστεί. Στο δεξί μέρος βρίσκονται οι ρυθμίσεις οι οποίες μπορούν να διαμορφώσουν το γράφημα όπως το χρώμα, οι άξονες, οι μονάδες μέτρησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.15.



Εικόνα 5.15 Grafana Dashboard

Σε αυτή την ΔΕ δημιουργήθηκαν τρία κύρια dashboard το ShellyInfo, ShellyPlusPlug Alerts και το Solar panel. Στο ShellyInfo διατίθενται οι πληροφορίες που αποστέλλονται από την πρίζα οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 5.16:

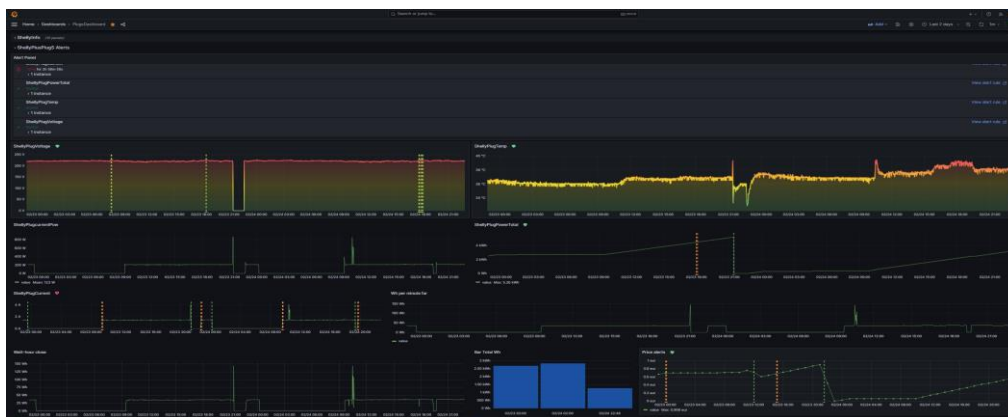
- Η τιμή της καταναλισκόμενης ενέργειας
- Η συνολική κατανάλωση ενέργειας
- Η στιγμιαία τάση
- Η στιγμιαία ένταση
- Η Θερμοκρασία
- Το ωραίο γράφημα της τιμής της καταναλισκόμενης ενέργειας
- Την στιγμιαία καταναλισκόμενη ενέργεια
- Την ώρα του συστήματος
- Ωριαίο γράφημα θερμοκρασίας

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



Εικόνα 5.16 Grafana Dashboard ShellyInfo

Στο dashboard ShellyPlusPlug Alerts απεικονίζονται τα γραφήματα καθώς και η λίστα το ειδοποιήσεων που έχουν δημιουργηθεί για τον έλεγχο και την αποστολή ειδοποιήσεων στον χρήστη όπου απεικονίζονται στην Εικόνα 5.17.



Εικόνα 5.17 Grafana Dashboard ShellyPlusPlug Alerts

Στην απεικόνιση Solar Panel της Εικόνα 5.18 απεικονίζεται:

- Η τάση και το ρεύμα των δύο φωτοβολταϊκών string
- Το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας
- Η παραγόμενη τάση εξόδου
- Το παραγόμενο ρεύμα εξόδου

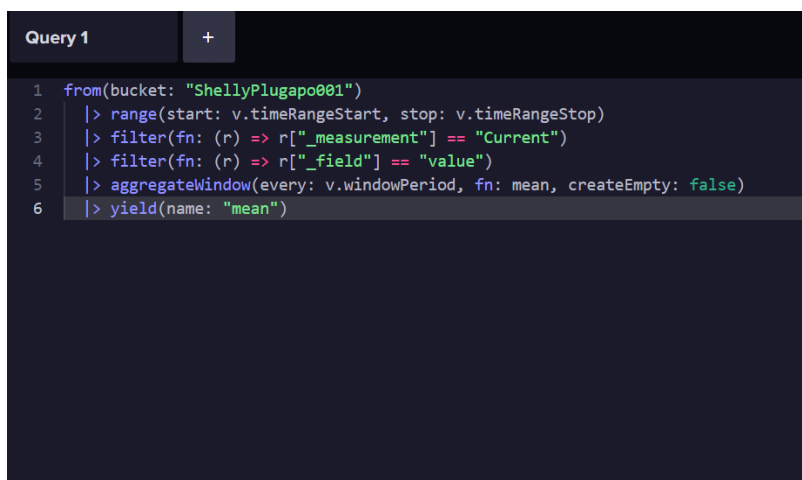
Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



Εικόνα 5.18 Grafana Dashboard Solar Panel

5.3 Δημιουργία και Αποστολή Ειδοποιήσεων

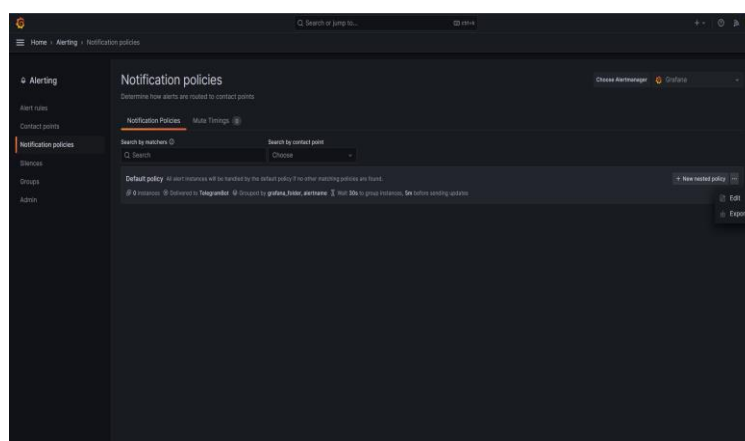
Μετά την δημιουργία των απεικονίσεων για τα επεξεργασμένα δεδομένα που αποστέλλονται από την βάση δεδομένων στο Grafana μπορούν να δημιουργηθούν πληθώρα ειδοποιήσεων ώστε ο χρήστης του συστήματος να ειδοποιείται για οποιαδήποτε μεταβολή σε αυτό. Για την δημιουργία ειδοποιήσεων στο Grafana δημιουργούνται queries για τα ζητούμενα δεδομένα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.19.



```
Query 1 +
1 from(bucket: "ShellyPlugapo001")
2   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
3   |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "Current")
4   |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "value")
5   |> aggregateWindow(every: v.windowPeriod, fn: mean, createEmpty: false)
6   |> yield(name: "mean")
```

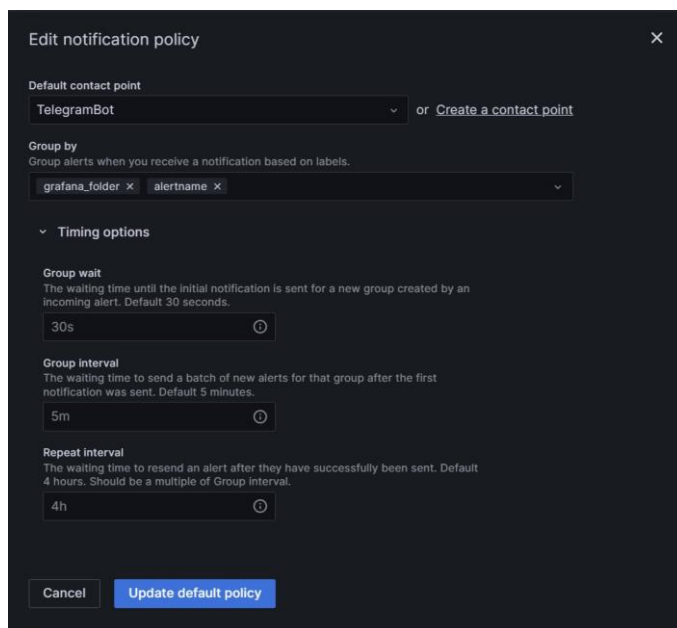
Εικόνα 5.19 Δημιουργία Query

Πριν την δημιουργία των ειδοποιήσεων ρυθμίζεται το Notification policy ώστε να γνωρίζει η εφαρμογή την εφαρμογή αποστολής των ειδοποιήσεων. Σε αυτή την ΔΕ χρησιμοποιείται η πολιτική η οποία αποστέλλει τις ειδοποιήσεις στους χρήστες σε ένα κανάλι της εφαρμογής Telegram με την χρήση ενός bot. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται στην Εικόνα 5.20 ενώ στην Εικόνα 5.21 ρυθμίζονται ο χρόνος αποστολής των ειδοποιήσεων, ο φάκελος στον οποίο ανήκουν και με ποιον τρόπο στέλνονται αυτές, στην περίπτωση μας με την χρήση ενός Telegram bot.



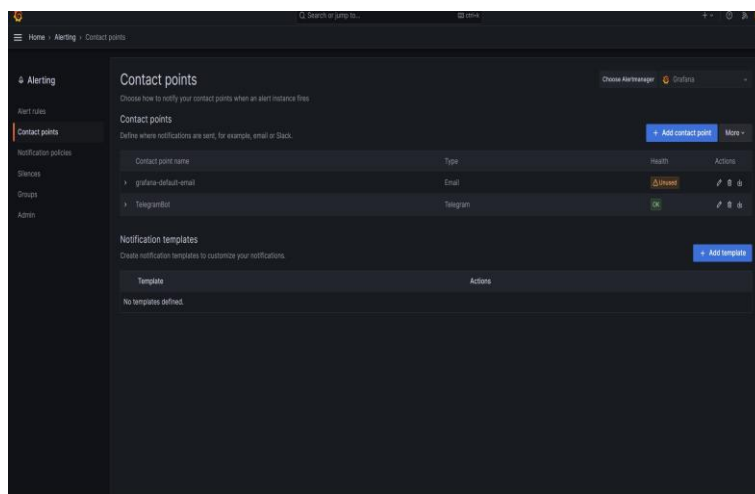
Εικόνα 5.20 Δημιουργία Πολιτικής Ειδοποίησης στο Grafana

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες



Εικόνα 5.21 Χρονικό Όριο Πολιτικής Ειδοποιήσεων Grafana

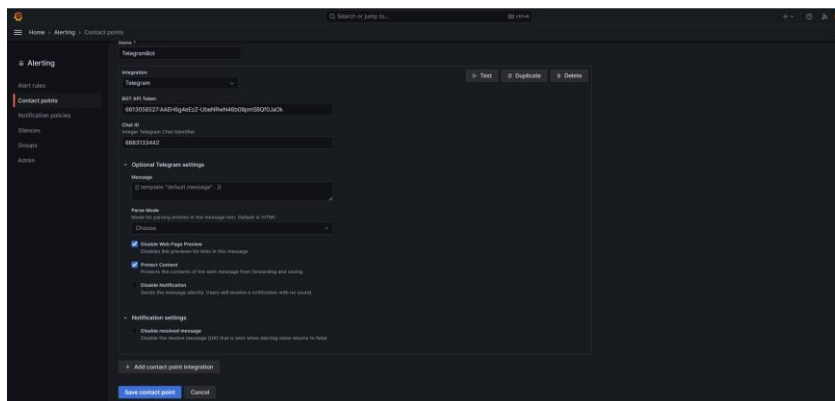
Στην συνέχεια ρυθμίζεται κατάλληλα το σημείο επαφής (contact point) που έχει δημιουργηθεί μαζί με τους φάκελους και με τις επιλογές όπου προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να αποσταλούν οι ειδοποιήσεις στην Εικόνα 5.22.



Εικόνα 5.22 Δημιουργία Grafana Contact Point

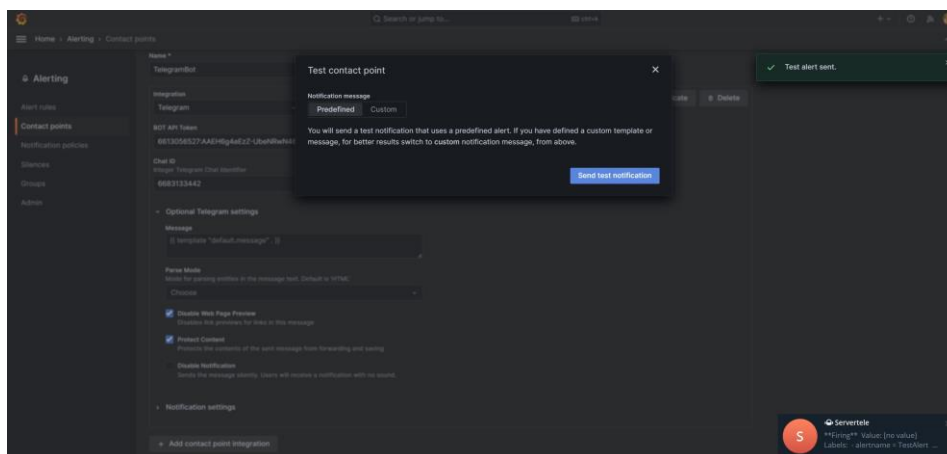
Επιλέγεται το μέσο αποστολής των ειδοποιήσεων Integration στην περίπτωση μας το telegram όπως φαίνεται στην εικόνα και συμπληρώνονται τα στοιχεία του bot που έχουν δοθεί από το BotFather και το RawDataBot ή το GetmyidBot στην Εικόνα 5.23.

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

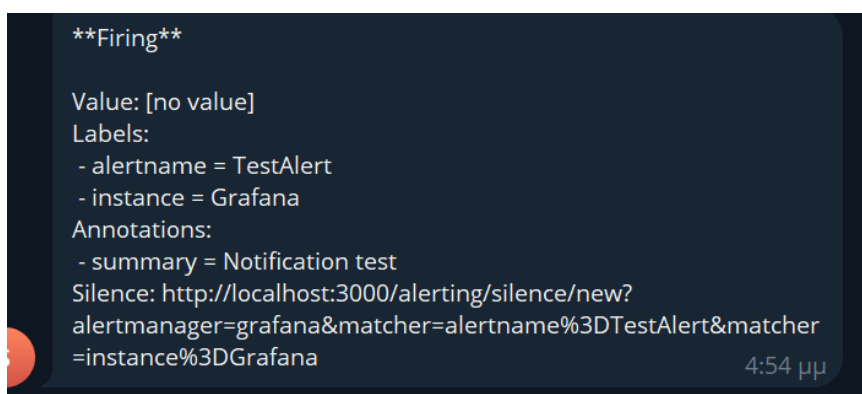


Εικόνα 5.23 Ρύθμιση Grafana Telegram Contact Point

Για την επαλήθευση της καταχώρησης των σωστών παραμέτρων διατίθεται η ικανότητα δοκιμής με την επιλογή send test notification όπως παρατηρείται στην Εικόνα 5.24. Τέλος, με την σωστή καταχώρηση των στοιχείων του bot αποστέλλεται το δοκιμαστικό μήνυμα που εμφανίζεται στην Εικόνα 5.25.



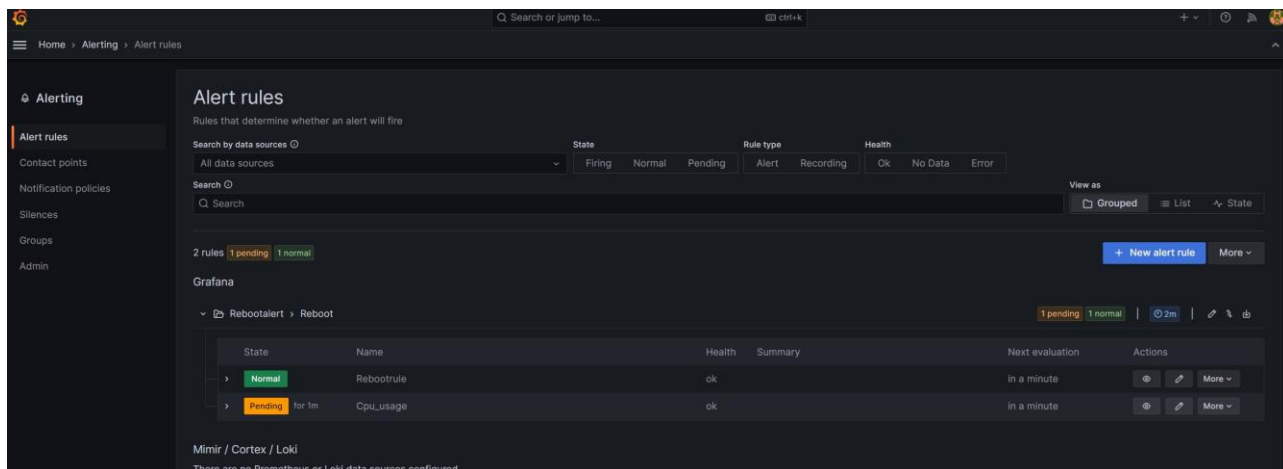
Εικόνα 5.24 Επαλήθευση Grafana Contact point



Εικόνα 5.25 Μήνυμα Επαλήθευσης Telegram

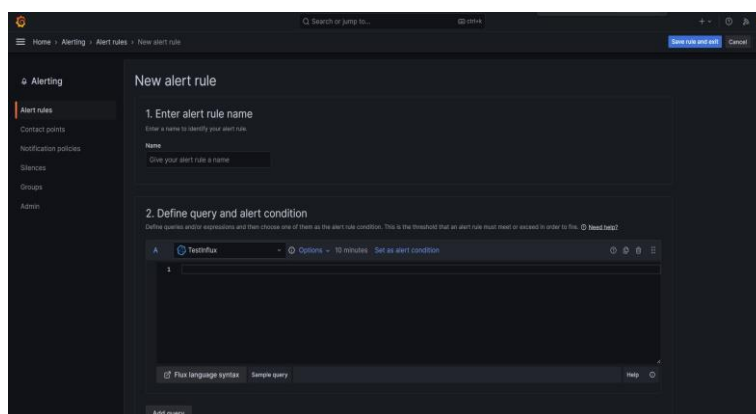
Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

Στην συνέχεια δημιουργείτε ένας νέος κανόνας ειδοποίησης πατώντας την επιλογή “+New alert rule” για την δημιουργία νέου κανόνα ειδοποίησης όπου γράφεται ή αντιγράφεται το query από την βάση δεδομένων InfluxDB που επιθυμείτε η επιτήρηση. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.26 Δημιουργία Κανόνα Ειδοποίησης στο Grafana

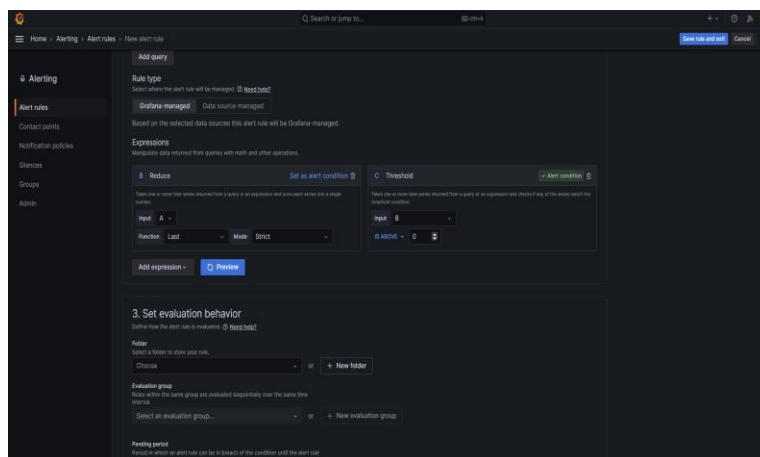
Το επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση του παραθύρου που εμφανίζεται στην Εικόνα 5.27. Καταχωρείται το όνομα της ειδοποίησης καθώς και το query που έχει δημιουργηθεί στην Εικόνα 5.19.



Εικόνα 5.27 Εισαγωγή Query για την Δημιουργία Ειδοποίησης στο Grafana

Για την σύγκριση δεδομένων που διαθέτουν την δομή χρονοσειράς χρησιμοποιείται η έκφραση reduce ώστε να μετατραπούν σε μοναδικό αριθμό και χρησιμοποιείται η έκφραση threshold για την πραγματοποίηση συγκρίσεων. Έπειτα δημιουργείται ένας νέος φάκελος που διαθέτει την πολιτική αξιολόγησης:

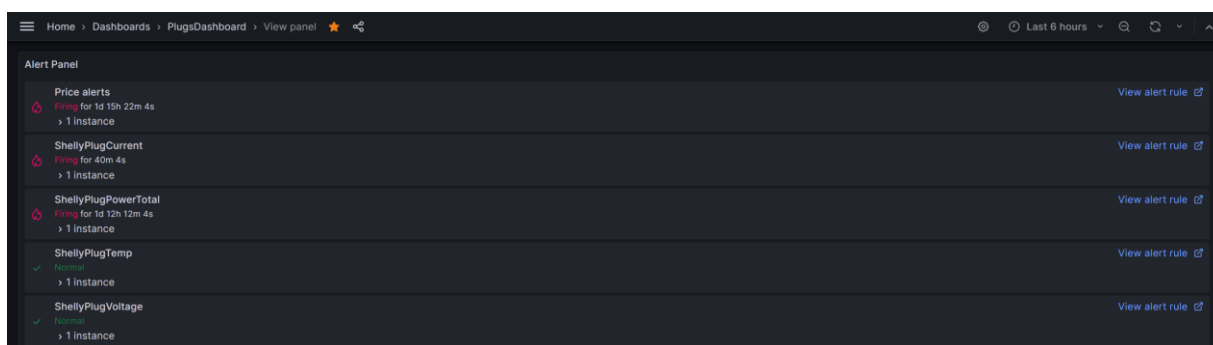
- Το ελάχιστο χρονικό όριο που χρειάζεται ώστε η ειδοποίηση να θεωρείται αληθής
- Το χρονικό περίοδο επαναξιολόγησης της κατάστασης



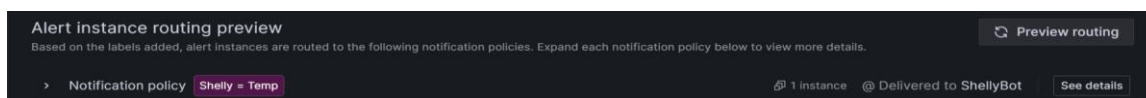
Εικόνα 5.28 Ρύθμιση Κανόνα Ειδοποίησης στο Grafana

Επιπλέον, επιλέγεται ένα new evaluation group το οποίο ονοματίζουμε και ορίζεται η χρονική περίοδος αξιολόγησης. Στην Εικόνα 5.30 εφόσον έχουν υλοποιηθεί τα παρακάτω βήματα πατώντας την επιλογή «preview routing» φαίνεται η διαδρομή της ειδοποίησης¹⁷. Τέλος, δημιουργείται ένα dashboard το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 5.29. Σε αυτό περιλαμβάνονται οι ειδοποιήσεις που έχουν υλοποιηθεί στην παρούσα ΔΕ οι οποίες είναι:

- Ειδοποίηση για το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας
- Ειδοποίηση για την υπέρβαση του ορίου της συνολικής στιγμιαίας καταναλισκόμενης ισχύος
- Ειδοποίηση για την υπέρβαση του ορίου της στιγμιαίας θερμοκρασίας
- Ειδοποίηση για την υπέρβαση της ημερήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας



Εικόνα 5.29 Grafana Dashboard Ειδοποιήσεων



Εικόνα 5.30 Διαδρομή Ειδοποίησης στο Grafana

¹⁷ “Alerting | Grafana documentation,” Grafana Labs. Accessed: March 21, 2024. [Online]. Available: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/alerting/>

5.3.1 Telegram Bot

Μετά την κατασκευή των ειδοποιήσεων στο πρόγραμμα Grafana, υλοποιείται ένα bot στην εφαρμογή Telegram. Στο Grafana οι ειδοποιήσεις αποστέλλονται είτε με την χρήση mail είτε με την χρήση ενός bot. Σε αυτή την ΔΕ επιλέχθηκε η δημιουργία ενός Telegram Bot με όνομα ShellyGrafanaalert το οποίο μεταφέρει τις ειδοποιήσεις του Grafana σε ένα Telegram group. Για την δημιουργία του Telegram bot ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Μετάβαση στην εφαρμογή Bot Father για την δημιουργία ενός Bot
- Με την εντολή **/start** ξεκινά η δημιουργία του bot
- Με την εντολή **/newbot ShellyGrafanaalert** δημιουργείται το bot με το όνομα ShellyGrafanaalert
- Κατά την διάρκεια της επιλογής του ονόματος επιλέγεται όνομα το οποίο δεν το έχει κάποιο άλλο bot αλλιώς εμφανίζεται το μήνυμα “Sorry, the username is already taken. Please try something different”. Μόλις βρεθεί ένα μη κατειλημμένο username εμφανίζεται το μήνυμα Done!. Έπειτα παρέχεται το HTTP API το οποίο το αντιγράφεται και φυλάσσεται σε ένα αρχείο. Η διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 5.31



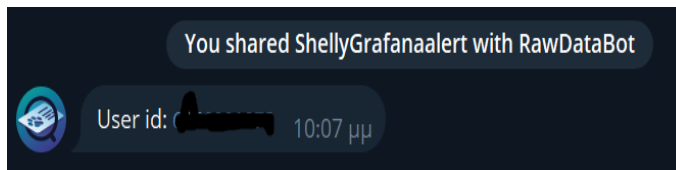
Εικόνα 5.31 Δημιουργία Bot από την Εφαρμογή Bot Father

- Έτσι θα είναι η πρώτη εικόνα που θα αντικρίσει ο χρήστης στο Telegram bot πληκτρολογώντας την εντολή **/start** το bot ξεκινά και είναι έτοιμο για χρήση όπως στην Εικόνα 5.32



Εικόνα 5.32 Εκκίνηση Bot

- Εύρεση id για την αποστολή τοπικά στο bot όπως στην Εικόνα 5.33



Εικόνα 5.33 Ταυτότητα Bot

- Εύρεση id για την αποστολή σε Group

Έπειτα, δημιουργήθηκε μια εφαρμογή από την οποία αποστέλλονται ειδοποιήσεις σε μια ομάδα στην εφαρμογή Telegram όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.34 και Εικόνα 5.35. Στη Εικόνα 5.34 απεικονίζεται η δομή της ειδοποίησης όταν εκείνη υπερβαίνει τα όρια που έχουν τεθεί στο Grafana ενώ στην Εικόνα 5.35 απεικονίζεται η δομή της ειδοποίησης όταν πλέον η ειδοποίηση δεν είναι πλέον σε ισχύ. Επιπλέον, διαθέτουν το όνομα της ειδοποίησης, την τιμή σύγκρισης με την τιμή που υπερβαίνει και τα γραφήματα που επηρεάζονται από την συνθήκη αυτή.

```
**Firing**  
  
Value: B=1.461, C=1  
Labels:  
- alertname = ShellyPlugCurrent  
- Shelly = Current  
- grafana_folder = ShellyPlugapo  
Annotations:  
Source: http://localhost:3000/alerting/grafana/aba1983a-ed96-45f9-a671-5bcd468e47d5/view?orgId=1  
Silence: http://localhost:3000/alerting/silence/new?alertmanager=grafana&matcher=Shelly%3DCurrent&matcher=alertname%3DShellyPlugCurrent&matcher=grafana_folder%3DShellyPlugapo&orgId=1  
Dashboard: http://localhost:3000/d/ae695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1  
Panel: http://localhost:3000/d/ae695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1&viewPanel=2  
4:36 μμ
```

Εικόνα 5.34 Μήνυμα Ειδοποίησης

```
**Resolved**  
  
Value: B=0.042, C=0  
Labels:  
- alertname = ShellyPlugCurrent  
- Shelly = Current  
- grafana_folder = ShellyPlugapo  
Annotations:  
Source: http://localhost:3000/alerting/grafana/aba1983a-ed96-45f9-a671-5bcd468e47d5/view?orgId=1  
Silence: http://localhost:3000/alerting/silence/new?alertmanager=grafana&matcher=Shelly%3DCurrent&matcher=alertname%3DShellyPlugCurrent&matcher=grafana_folder%3DShellyPlugapo&orgId=1  
Dashboard: http://localhost:3000/d/ae695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1  
Panel: http://localhost:3000/d/ae695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1&viewPanel=2  
3:38 μμ
```

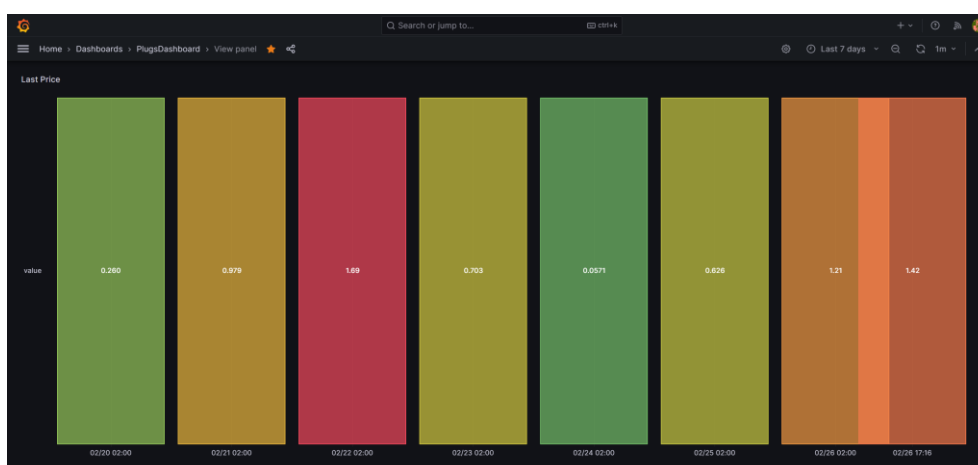
Εικόνα 5.35 Μήνυμα Λήξης Ειδοποίησης

5.4 Αποτελέσματα Λειτουργίας

Η εφαρμογή του ευφυούς συστήματος εποπτείας και διαχείρισης υλοποιήθηκε πιλοτικά στην κουζίνα μιας οικίας η οποία είναι ίσως το πιο ενεργοβόρο δωμάτιο. Παρατηρήθηκε ο χρόνος λειτουργίας, η καταναλισκόμενη ενέργεια και το οικονομικό αντίκτυπο που έχουν οι συσκευές αυτού του δωματίου όπως φαίνεται στα διαγράμματα στην και αντίστοιχα. Στην Εικόνα 5.36 απεικονίζεται η μέση ημερήσια καταναλισκόμενη ενέργεια της έξυπνης πρίζας στην οποία είναι συνδεδεμένος ένας αφυγραντήρας με χρόνο λειτουργίας σχεδόν 7 ωρών. Στη Εικόνα 5.37 απεικονίζεται το κόστος της μέσης ημερήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με τιμή 0,18€/kWh η οποία είναι η τιμή που διατίθεται αυτή την στιγμή σε ένα μέσο σταθερό τιμολόγιο στην Ελλάδα. Επιπρόσθετα, υπάρχει χρωματικός κώδικας με την τιμή που έχει τεθεί ως όριο, ώστε ο χρήστης να αναγνωρίζει γρηγορότερα την κατάσταση της τιμής που παρακολουθεί. Ακόμη, με την ύπαρξη υπέρβασης του ορίου αποστέλλεται μήνυμα στην ομάδα του Telegram στην οποία είναι εγγεγραμμένος όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.38.



Εικόνα 5.36 Ημερήσια Μέση Καταναλισκόμενη Ενέργεια



Εικόνα 5.37 Κόστος Ημερήσιας Καταναλισκόμενης Ενέργειας

```
**Firing**  
Value: B=1.3187006672727268, C=1  
Labels:  
- alertname = Price alerts  
- Shelly = Price  
- grafana_folder = ShellyPlugapo  
Annotations:  
Source: http://localhost:3000/alerting/grafana/f216feba-b6c8-42c8-a86f-5db089511eda/view?orgId=1  
Silence: http://localhost:3000/alerting/silence/new?alertmanager=grafana&matcher=Shelly%3DPrice&matcher=alertname%3DPrice+alerts&matcher=grafana_folder%3DShellyPlugapo&orgId=1  
Dashboard: http://localhost:3000/d/aee695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1  
Panel: http://localhost:3000/d/aee695c3-623d-4c9f-bb1b-502fda32e3c2?orgId=1&viewPanel=25  
2:22 μμ
```

Εικόνα 5.38 Ειδοποίηση Υπέρβασης Κόστους Ενέργειας

Η χρήση της έξυπνης πρίζας όμως διαθέτει αρκετά μειονεκτήματα όταν υπάρχει διακοπή ρεύματος οι μετρήσεις της χάνονται και διεξάγονται από την αρχή. Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι χρήση της έξυπνης πρίζας δεν καταγράφει μόνο την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα δωμάτιο αλλά προσέφερε και ένα μέσο παρακολούθησης των επιμέρους καταναλώσεων των συσκευών.

5.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η λειτουργία της ευφυούς εφαρμογής. Σχεδιάστηκαν οι κατάλληλες ροές στο πρόγραμμα γέφυρα Node-RED ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες λειτουργίες της εφαρμογής: η εγγραφή στο θέμα μετάδοσης των δεδομένων του MQTT Broker, ο διαχωρισμός των δεδομένων μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί μια πρώτη απεικόνιση των δεδομένων στο πρόγραμμα Node-RED στην διεύθυνση <https://elephoton.duckdns.org/ui/>. Έπειτα τα δεδομένα επεξεργάζονται με την χρήση functions και στην συνέχεια μεταφέρονται για αποθήκευση στην βάση δεδομένων InfluxDB. Στην βάση δεδομένων δημιουργούνται τα απαραίτητα Buckets για την δημιουργία queries τα οποία είναι απαραίτητα για την δημιουργία απεικονίσεων και ειδοποιήσεων. Έπειτα, περιγράφεται η δημιουργία dashboards στην εφαρμογή Grafana. Η δημιουργία των απεικονίσεων είναι απαραίτητη για την εποπτεία και την δημιουργία ειδοποιήσεων. Επιπλέον, αναλύθηκε η διαδικασία δημιουργίας ειδοποιήσεων που πραγματοποιούνται στο σύστημα. Επιπλέον, περιγράφηκε και υλοποιήθηκε η δημιουργία ενός Telegram bot που συνδέεται με τις ειδοποιήσεις που δημιουργούνται στο Grafana για την αποστολή τους σε μια ομάδα στην οποία διαθέτουν πρόσβαση οι χρήστες της αυτόνομης φωτοβολταϊκής οικίας. Τέλος, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα τις λειτουργίας της ευφυούς εφαρμογής με την απεικόνιση διαγραμμάτων της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας και της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση και η τεχνοοικονομική μελέτη μια αυτόνομης φωτοβολταϊκής οικίας με την χρήση του συστήματος PVGIS. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των επιμέρους τμημάτων που το αποτελούν, του παρόντος νομικού πλαισίου της εγκατάστασης και λειτουργίας των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση των μερών του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Επίσης, υλοποιήθηκε η οικονομοτεχνική μελέτη με την οποία υπολογίστηκε ο χρόνος απόσβεσης του συστήματος καθώς και το κέρδος καθόλη την διάρκεια της λειτουργίας του. Ο χρόνος απόσβεσης είναι 17 χρόνια διότι το σύστημα έχει σχεδιαστεί με την χρήση ακριβών μερών τα οποία διασφαλίζουν την αποδοτικότητα και την εύρυθμη λειτουργία του. Ωστόσο, το ίδιο σύστημα μπορεί να υλοποιηθεί φθηνότερα με την χρήση μη επώνυμων και δοκιμασμένων λύσεων και με την μείωση της αυτονομίας του. Έπειτα, αναλύθηκαν οι τεχνολογίες και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εφαρμογής. Μέσα, από αυτή την μελέτη επιλέχθηκε η βάση δεδομένων InfluxDB για την αποθήκευση των δεδομένων χρονοσειρών όντας η πιο διαδεδομένη λύση. Χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν τα πλεονέκτημα (α) των τεχνολογιών της Νεφοϋπολογιστικής, (β) του Διαδικτύου των Πραγμάτων, (γ) των VMs, (δ) των containers και (ε) των βάσεων δεδομένων. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία οι οποίες διασφαλίζουν την ασφαλή μεταφορά και απρόσκοπτη επικοινωνία. Στην συνέχεια υλοποιήθηκε ένα εικονικό μηχάνημα στην υπηρεσία Okeanos-Knossos ώστε να πραγματοποιείται απομακρυσμένη σύνδεση και πρόσβαση των μικροϋπηρεσιών από οποιοδήποτε μέρος. Έπειτα, αναλύθηκε η χρήση των μετρητών ενέργειας, τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν, καθώς και τα δεδομένα που αποστέλλονται στον Mosquitto MQTT Broker. Περιγράφεται και αναλύεται η λειτουργία του Broker για την λήψη των δεδομένων από τους έξυπνούς μετρητές και την δημιουργία θεμάτων στα οποία αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένα τοίχος προστασίας και reverse proxy για την παροχή ασφάλειας στις ιστοσελίδες που κατασκευάστηκαν για αυτή την ΔΕ. Δημιουργήθηκαν DNS για την ασφαλή και απομακρυσμένη πρόσβαση των υπηρεσιών που υλοποιήθηκαν στον εικονικό μηχάνημα. Ακόμη, εγκαταστάθηκαν οι απαραίτητες μικροϋπηρεσίες με την χρήση του docker-compose. Η χρήση της έξυπνης πρίζας όμως διαθέτει αρκετά μειονεκτήματα όταν υπάρχει διακοπή ρεύματος οι μετρήσεις της χάνονται και διεξάγονται από την αρχή. Το πρόβλημα λύνεται με την χρήση της βάσης δεδομένων InfluxDB. Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι χρήση της έξυπνης πρίζας δεν καταγράφει μόνο την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα δωμάτιο αλλά προσέφερε και ένα μέσο παρακολούθησης των επιμέρους καταναλώσεων των συσκευών. Οι χρήστες και ένοικοί της οικίας διαθέτουν διαρκής ενημέρωση για την καταναλισκόμενη ενέργεια της οικίας τους αλλά και για την παραγόμενη ενέργεια σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς, μελλοντικά μπορούν να γίνουν πολλές βελτιώσεις και προσθήκες όπως: (α) χρήση του συστήματος PVSYST για την σχεδίασή του συστήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια, (β) χρήση πριζών Shelly Smart Plug Plus S σε όλα τα δωμάτια της οικίας, (γ) εμπλουτισμός των αυτοματισμών που χρησιμοποιούνται και χρήση της τεχνολογίας BLE, (δ) ενσωμάτωση αισθητήρων ασφαλείας στον χώρο των μπαταριών και του πίνακα του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και (ε) Μεταφορά των δεδομένων από τον MQTT Broker στην InfluxDB με την χρήση του προγράμματος Telegraf.

Βιβλιογραφία

- [1] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world:-A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016.
- [2] A. Saleem, K. Mehmood, and F. Rashid, "The Efficiency of Solar PV System," Jul. 2019.
- [3] M. Boxwell, *The Solar Electricity Handbook-2017 Edition: A simple, practical guide to solar energy—designing and installing solar photovoltaic systems*. Greenstream Publishing, 2017.
- [4] N. Rathore, N. L. Panwar, F. Yettou, and A. Gama, "A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 42, no. 10, pp. 1200–1217, 2021.
- [5] G. Koudouris, P. Dimitriadis, T. Iliopoulou, N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, "Investigation on the stochastic nature of the solar radiation process," *Energy Procedia*, vol. 125, pp. 398–404, 2017.
- [6] T. Majaw, R. Deka, S. Roy, and B. Goswami, "Solar charge controllers using MPPT and PWM: A review," *ADBU J. Electr. Electron. Eng. AJEEE*, vol. 2, no. 1, pp. 1–4, 2018.
- [7] D. B. Snyman and J. H. Enslin, "Novel technique for improved power conversion efficiency in systems with battery back-up," *Renew. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 349–357, 1994.
- [8] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 793–813, 2013.
- [9] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 637–648, 2015.
- [10] M. A. G. De Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de A. e Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2012.
- [11] A. Jossen, J. Garche, and D. U. Sauer, "Operation conditions of batteries in PV applications," *Sol. Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 759–769, 2004.
- [12] M. Ponnusamy, H. Rajaguru, and R. Singaravelu, "An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems," *Int J Comput Appl*, vol. 82, pp. 975–8887, 2013.
- [13] M.-K. Tran, A. DaCosta, A. Mevawalla, S. Panchal, and M. Fowler, "Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA," *Batteries*, vol. 7, no. 3, p. 51, 2021.
- [14] M. Glavin and W. Hurley, "Battery management system for solar energy applications," presented at the Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, IEEE, 2006, pp. 79–83.
- [15] X. Wang, P. Adelman, and T. Reindl, "Use of LiFePO₄ batteries in stand-alone solar system," *Energy Procedia*, vol. 25, pp. 135–140, 2012.

- [16] Y. Tsuchiya, T. A. Swai, and F. Goto, "Energy payback time analysis and return on investment of off-grid photovoltaic systems in rural areas of Tanzania," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 42, p. 100887, 2020.
- [17] R. Dogga and M. Pathak, "Recent trends in solar PV inverter topologies," *Sol. Energy*, vol. 183, pp. 57–73, 2019.
- [18] R. Mallwitz and B. Engel, "Solar power inverters," presented at the 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, IEEE, 2010, pp. 1–7.
- [19] H. Guda and U. Aliyu, "Design of a stand-alone photovoltaic system for a residence in Bauchi," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 34–44, 2015.
- [20] M. Šúri, T. A. Huld, and E. D. Dunlop, "PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 55–67, 2005.
- [21] N. M. Kumar, "Simulation tools for technical sizing and analysis of solar PV systems," presented at the Proceedings of the 6th World Conference on Applied Sciences, Engineering and Technology (WCSET-2017), 2017, pp. 218–222.
- [22] S. Bhardwaj, L. Jain, and S. Jain, "Cloud computing: A study of infrastructure as a service (IAAS)," *Int. J. Eng. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 60–63, 2010.
- [23] M. Chakraborty and A. P. Kundan, *Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software*. Berkeley, CA: Apress, 2021. doi: 10.1007/978-1-4842-6888-9.
- [24] J. L. Harrington, *Relational database design and implementation*. Morgan Kaufmann, 2016.
- [25] S. N. Z. Naqvi, S. Yfantidou, and E. Zimányi, "Time series databases and influxdb," *Stud. Univ. Libre Brux.*, vol. 12, 2017.
- [26] S. A. Kumar, T. Vealey, and H. Srivastava, "Security in internet of things: Challenges, solutions and future directions," presented at the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, 2016, pp. 5772–5781.
- [27] H. HaddadPajouh, A. Dehghantanha, R. M. Parizi, M. Aledhari, and H. Karimipour, "A survey on internet of things security: Requirements, challenges, and solutions," *Internet Things*, vol. 14, p. 100129, 2021.
- [28] D. Soni and A. Makwana, "A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot)," presented at the International conference on telecommunication, power analysis and computing techniques (ICTPACT-2017), 2017, pp. 173–177.
- [29] G. C. Kessler, "An overview of TCP/IP protocols and the internet," *InterNIC Doc. Dec*, vol. 29, p. 42, 2004.
- [30] S. Thomas, *SSL and TLS essentials*. New York, Wiley, 2000. Accessed: Mar. 17, 2024. [Online].
- [31] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology," *sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 11734–11753, 2012.
- [32] D. J. Barrett and R. E. Silverman, *SSH, the Secure Shell: the definitive guide*. O'Reilly Media, Inc., 2001.

[33] C. Chien, *The Hall effect and its applications*. Springer Science & Business Media, 2013. Accessed: Mar. 17, 2024.

[34] R. K. Kodali and A. Anjum, “IoT based home automation using node-red,” presented at the 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), IEEE, 2018, pp. 386–390.

Παράρτημα Α - Shelly MQTT Scripts

// Ενεργοποίηση MQTT

```
#!/bin/bash

source .envmyshelly

printf "\nEnable BLE\n"

curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Mqtt.SetConfig", "params":{"config":{"enable":true, "server":"https://mqtttelephoton.duckdns.org/"}}}' http://${SHELLY}/rpc

echo

read -r -p "Are you sure? [y/N] " response

case "$response" in
    [yY][eE][sS][yY])
        printf "\n\nReboot Shelly\n"

        curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Shelly.Reboot"}' http://${SHELLY}/rpc

        ;;
    *)
        exit 1

        ;;
esac

echo
```

// Απενεργοποίηση MQTT

```
#!/bin/bash

source .envmyshelly

printf "\nDisable BLE\n"

curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Mqtt.SetConfig", "params":{"config":{"enable":true, "server":" https://mqtttelephoton.duckdns.org "}}}' http://${SHELLY}/rpc

echo

read -r -p "Are you sure? [y/N] " response
```

```
case "$response" in
    [yY] [eE] [sS] |[yY])
        printf "\n\nReboot Shelly\n"
        curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Shelly.Reboot"}' http://${SHELLY}/rpc
        ;;
    *)
        exit 1
        ;;
esac
echo
```

// Ρύθμιση MQTT

```
#!/bin/bash
source .envmyshelly
printf "\n GET CONFIG FOR BLE\n"
curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Mqtt.GetConfig"}' http://${SHELLY}/rpc
echo
```

// Κατάσταση MQTT

```
#!/bin/bash
source .envmyshelly
printf "\nGET STATUS FOR MQTT\n"
curl -X POST -d '{"id":1, "method":"Mqtt.GetStatus"}' http://${SHELLY}/rpc
echo
```

Παράρτημα Β - Συναρτήσεις για την Αντληση Δεδομένων από την Πρίζα ShellyPlusPlug S

//Συνάρτηση στιγμιαίας τάσης

```
var voltage= msg.payload.voltage;  
msg.payload = voltage;  
return msg;
```

//Συνάρτηση συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας

```
var apower = msg.payload.apower;  
msg.payload = apower;  
return msg;
```

//Συνάρτηση καταναλισκόμενου ρεύματος

```
var current = msg.payload.current;  
msg.payload = current;  
return msg;
```

// Εύρεση Θερμοκρασίας Πρίζας

```
Var TempC = msg.payload.temperature.tC;  
msg.payload = TempC;  
return msg;
```

// Εύρεση συνολικής ενέργειας σε kWh

```
var totalkWh= msg.payload.aenergy.total;  
msg.payload = totalkWh;  
return msg;
```

//Εύρεση wh κοντά στο λεπτό

```
var value0= msg.payload.aenergy.by_minute[2]*0.01;  
msg.payload = value0;  
return msg;
```

Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

//Εύρεση wh κοντά στο λεπτό

```
var value0= msg.payload.aenergy.by_minute[0]*0.01;  
msg.payload = value0;  
return msg;
```

// Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας

```
var price= (msg.payload.aenergy.total/1000)*0.26;  
msg.payload = price;  
return msg;
```

Παράρτημα Γ- Το Αρχείο docker-compose.yml

```
version: "3.9"
services:
  npm:
    image: 'jc21/nginx-proxy-manager:2.10.4'
    hostname: 'npm'
    restart: unless-stopped
    ports:
      # Public HTTP Port:
      - '80:80'
      # Public HTTPS Port:
      - '443:443'
      # Admin Web Port:
      #   - '81:81'
  # environment:
    # By default, the services (nginx etc) will run as root user inside the docker container.
    # You can change this behaviour by setting the following environment variables. Not only
    # will they run the services as this user/group, they will change the ownership on the
    # data and letsencrypt folders at startup.
    # PUID: 1000
    # PGID: 1000
    # Uncomment this if IPv6 is not enabled on your host
    # DISABLE_IPV6: 'true'
  volumes:
    - ./data:/data
    - ./letsencrypt:/etc/letsencrypt

  nodered:
    image: 'nodered/Node-RED:3.1.0-18'
    hostname: 'nodered'
    restart: unless-stopped
    environment:
      - TZ=Europe/Athens
```


Έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας με βάση την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε αυτόνομες (off-grid) οικίες

```
# ports:
```

```
# - '1880:1880'
```

```
volumes:
```

```
- nodered-data:/data
```

```
InfluxDB:
```

```
image: 'InfluxDB:2.7.3'
```

```
hostname: 'InfluxDB'
```

```
restart: on-failure:15
```

```
volumes:
```

```
- InfluxDB-data:/var/lib/InfluxDB2:rw
```

```
env_file:
```

```
- .env
```

```
entrypoint: ["/entrypoint.sh"]
```

```
# ports:
```