



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

« Σχεδιασμός συστήματος διαχείρισης συσσωρευτή ιόντων λιθίου »

« Li-ion battery management system design »

Υπό

ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΜΑΚΚΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΡΑΦΑΗΛ

Επιβλέπων καθηγητής: ΝΤΑΦΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2025

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας. Σκοπός της μελέτης είναι η εις βάθος διερεύνηση της λειτουργίας όλων των επιμέρους εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα αυτόνομο σύστημα, όπως οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, ο ρυθμιστής φόρτισης MPPT, ο inverter, η μπαταρία λιθίου, τα busbars, ο battery balancer, ο έξυπνος μετρητής κατανάλωσης (BMV Smart) και το σύστημα παρακολούθησης. Παράλληλα, αναλύεται η ορθολογική επιλογή καλωδίων, διατομών, ασφαλειών και υλικών σύνδεσης, με στόχο την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται στη θεωρητική τεκμηρίωση κάθε τεχνολογικής συνιστώσας, στη συσχέτισή της με τα αντίστοιχα πρότυπα και κανονισμούς εγκατάστασης, καθώς και στην αποτύπωση πιθανών βλαβών και δυσλειτουργιών. Η εργασία εξετάζει αναλυτικά τις τεχνικές απαιτήσεις συντήρησης του συστήματος, τις συνθήκες λειτουργίας και την αναγκαιότητα περιοδικών ελέγχων. Μέσα από τεχνικά διαγράμματα, πίνακες, υπολογισμούς και βιβλιογραφική τεκμηρίωση, παρουσιάζεται ένα πλήρες πλαίσιο σχεδιασμού και λειτουργίας ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύουν τη σημασία της βελτιστοποίησης της ενεργειακής διαχείρισης μέσω συντονισμένης λειτουργίας όλων των επιμέρους συσκευών. Τα συμπεράσματα τονίζουν ότι η μακροχρόνια αξιοπιστία, η απόδοση και η ασφάλεια εξαρτώνται άμεσα από την τεχνικά σωστή εγκατάσταση, τη χρήση κατάλληλων υλικών και την τακτική συντήρηση.

Λέξεις-κλειδιά: αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, MPPT, inverter, μπαταρία λιθίου, smart shunt, battery balancer, busbars, παρακολούθηση συστήματος, συντήρηση.

Abstract

The present thesis focuses on the design, analysis and system evaluation of an off-grid photovoltaic system with the use of next generation energy storage technologies and energy management. The goal of the study is the in-depth exploration of every functioning part of an off-grid system contains, such as the photovoltaic collectors, the MPPT charge controller, the inverter, the Li-Ion battery, the busbars, the battery balancer, the smart energy meter (BMV smart) and the tracking system. Meanwhile, in full capacity analysis of rational choice of cable, cable-size, circuit breakers and connection materials, thus the safety and the system performance being the purpose.

The methodological approach adopted is based on the theoretical substantiation of every technological component, in its correlation with corresponding standards and instalment regulations, including possible malfunctions and faults. This project assesses thoroughly the technical requirements for the systems maintenance, the operating conditions and last but not least the importance of scheduled maintenance and inspections. Through technical diagrams, tables, calculations and bibliographic documentation, a full demonstration of the design and function of an off-grid photovoltaic system is presented.

The results of the study indicate the importance of energy management optimization throughout the coordinated functioning of every single component. In conclusion the long-term reliability, performance and safety of the system depend on the correct technical installation, the use of appropriate materials and also the need of regular maintenance.

Key words: off-grid photovoltaic system, MPPT, inverter, Li-Ion battery, smart shunt, battery balancer, busbars, tracking system, maintenance.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
Κεφάλαιο 1°	6
Επεξήγηση θέματος της εργασίας	6
1.1. Παρουσίαση του Θέματος	6
1.2. Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	6
1.3. Μεθοδολογία	7
1.4. Εφαρμογή του συστήματος	8
Κεφάλαιο 2°	10
Περιγραφή των επιμέρους εξαρτημάτων	10
2.1 Εξήγηση εξαρτημάτων	10
2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ	10
2.3 Ρυθμιστής φόρτισης	14
2.4 Busbars Ζυγοί ρεύματος	16
2.5 Μετατροπέας τάσης inverter	17
2.6 Ενεργειακοί διακόπτες	19
2.7 Συσσωρευτές	20
2.7.1 Η ανάγκη του Battery Balancer	21
2.7.2 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου	22
2.8 Battery Management System	24
Κεφάλαιο 3°	25
Τρόπος λειτουργίας κατόπιν σύνδεσης	25
3.1 Λειτουργία του συστήματος	25
3.2 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια – Μετατροπή Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Ηλεκτρική Ενέργεια	25
3.3 Ρυθμιστής Φόρτισης MPPT – Βελτιστοποίηση και Διαχείριση Ενέργειας	25
3.4 Συσσωρευτές Λιθίου – Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας	26
3.5 Σύστημα Εξισορρόπησης Κυψελών – Battery Balancer	26
3.6 Αντιστροφέας Τάσης (Inverter) – Μετατροπή DC σε AC	26
3.7 Ενεργειακός Διακόπτης – Ασφαλής Απομόνωση και Συντήρηση	27
3.8 Καταναλωτές – Τελική Διάθεση Ηλεκτρικής Ενέργειας	27
3.9 Έξυπνος Μετρητής Ενέργειας – Παρακολούθηση και Ανάλυση	27
Κεφάλαιο 4°	28
Σχεδιάγραμμα σύνδεσης και ηλεκτρικό σχέδιο	28
4.1 Επιλογή και Διάσταση Καλωδίων σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα	28
4.2 Επιλογή και Τοποθέτηση Ασφαλειών σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα	30

4.2.1 Ασφάλειες μεταξύ φωτοβολταϊκών πάνελ και MPPT ρυθμιστή φόρτισης	30
4.2.2 Ασφάλεια μεταξύ ρυθμιστή φόρτισης και μπαταρίας	31
4.2.3 Ασφάλεια στην έξοδο του inverter (AC πλευρά)	31
4.2.4 Ασφάλεια μπαταρίας (Battery Main Fuse)	31
4.2.5 . Ασφάλεια μεταξύ φορτίων DC και συστοιχίας	31
4.3 Συμπεράσματα	32
Κεφάλαιο 5°	32
Net Metering και Net Billing: Ανάλυση και Σύγκριση των Σχημάτων Αυτοπαραγωγής με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	32
5.1 Εισαγωγή στις έννοιες	32
5.2 Net metering	32
5.3 Net Billing	33
5.4 Κύριες διαφορές μεταξύ Net Metering & Net Billing	34
5.5 Συμπεράσματα	35
Κεφάλαιο 6°	36
Συχνές βλάβες	36
6.1 Εισαγωγές στις βλάβες	36
6.2 Βλάβες φωτοβολταϊκών πάνελ σε αυτόνομα συστήματα: αίτια, επιπτώσεις και αντιμετώπιση	36
6.3 Θερμά Σημεία	36
6.4 Ρωγμές και δομικές φθορές	37
6.5 Διάβρωση και Υγρασία	37
6.6 Προβλήματα στη Δίοδο Bypass	37
6.7 Απώλειες από Γήρανση (Degradation Losses)	38
6.8 Επιπτώσεις στην Απόδοση του Συστήματος	38
6.9 Συμπεράσματα	38
6.10 Βλάβες MPPT Ρυθμιστή Φόρτισης σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Αίτια, Ενδείξεις και Διαχείριση	38
6.11 Υπερθέρμανση και Θερμικές Βλάβες	39
6.12 Υπερτάσεις στην Είσοδο (PV Input Overvoltage)	39
6.13 Κακή ή Ασταθής Φόρτιση Μπαταρίας	40
6.14 Βλάβες Επικοινωνίας (Communication Failure)	40
6.15 Βλάβες Εξαιτίας Λανθασμένης Πολικότητας ή Βραχυκυκλώματος	40
6.16 Απώλειες Απόδοσης ή Δυσλειτουργία MPPT Αλγορίθμου	41
6.17 Πιθανές Βλάβες και Δυσλειτουργίες σε Μπαταρίες Λιθίου	42
6.18 Πιθανές Βλάβες στο Smart Shunt	44
6.19 Πιθανές Βλάβες στον Inverter (Αντιστροφέας)	44
6.20 Ανάλυση Πιθανών Βλαβών στο σύστημα παρακολούθησης και στα Busbars	45

6.21 Ανάλυση Πιθανών Βλαβών στον Battery Balancer και στον BMV Smart σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα.....	47
6.22 Ανάλυση Γενικών Ηλεκτρικών Σφαλμάτων σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα	50
Κεφάλαιο 7ο	54
Παρακολούθηση και συντήρηση.....	54
7.1 Παρακολούθηση και Συντήρηση του Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος	54
7.2 Πράξεις Συντήρησης, Υλικά και Εργαλεία Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος	57
Κεφάλαιο 8°	59
Μέτρα προστασίας και ασφαλιστικά	59
8.1 Ασφάλεια της Ηλεκτρολογικής εγκατάστασης	59
8.2 Προστασία από υπερτάσεις	60
8.3 Προστασία των συσσωρευτών	60
8.4 Υποχρεώσεις και πιστοποιήσεις.....	61
Κεφάλαιο 9ο	62
Ενεργειακές ανάγκες μιας κατοικίας.....	62
9.1 Παράγοντες αναγκών κατοικίας.....	62
9.2 Σωστή επιλογή εξοπλισμού	63
9.3 Κόστος εγκατάστασης και επένδυσης.....	65
Κεφάλαιο 10°	67
Νομοθεσία και κίνητρα στην Ελλάδα.....	67
10.1 Επιδοτήσεις και κίνητρα.....	67
10.2 Νομοθεσία	69
10.3 Συμπεράσματα	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	72
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	73
Βιβλιογραφίες	73
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ-ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

Κεφάλαιο 1^ο

Επεξήγηση θέματος της εργασίας

1.1. Παρουσίαση του Θέματος

Η ραγδαία αύξηση της ενεργειακής ζήτησης σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την ανάγκη για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και τον περιορισμό των καυσαερίων του θερμοκηπίου, έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και της βιομηχανίας προς την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί έναν από τους πλέον υποσχόμενους πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης, τόσο λόγω της αφθονίας της όσο και εξαιτίας της δυνατότητας τοπικής αξιοποίησης, χωρίς ανάγκη περίπλοκης διανομής.

1.2. Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Ο βασικός σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η λεπτομερής μελέτη και τεχνική ανάλυση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει σύγχρονα υποσυστήματα, όπως φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (πάνελ), ρυθμιστή φόρτισης MPPT (Maximum Power Point Tracking), μπαταρία λιθίου, μετατροπέα τάσης (inverter), σύστημα εξισορρόπησης φόρτισης (battery balancer), έξυπνο μετρητή (BMV Smart), busbars και βοηθητικά στοιχεία ελέγχου και προστασίας. Σκοπός της εργασίας είναι να κατανοηθεί σε βάθος η λειτουργία κάθε επιμέρους εξαρτήματος του συστήματος, να αξιολογηθεί η ενεργειακή του συμπεριφορά και να αναδειχθούν οι τεχνικές παράμετροι που καθορίζουν την αποδοτικότητα και αξιοπιστία του.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, στόχος της είναι να παρουσιαστεί πλήρως η δομή και η λειτουργία όλων των επιμέρους εξαρτημάτων, αναλύοντας τον ρόλο που διαδραματίζει καθένα από αυτά στην ενεργειακή αλυσίδα, από τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας μέχρι την τελική της κατανάλωση. Παράλληλα, επιδιώκεται η αιτιολόγηση της επιλογής των συγκεκριμένων τεχνολογικών λύσεων με βάση την αποδοτικότητα, τη διάρκεια ζωής, την ευελιξία και την οικονομική βιωσιμότητα. Ένας από τους βασικούς στόχους είναι επίσης η αναλυτική αποτύπωση της ροής ενέργειας μέσα στο σύστημα και η παρουσίαση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συσκευών, συνοδευόμενη από λειτουργικά και ηλεκτρολογικά διαγράμματα.

Η εργασία στοχεύει να εξηγήσει τις τεχνικές επιλογές που έγιναν όσον αφορά τις διατομές των καλωδίων, τα μέσα προστασίας, τα πρότυπα εγκατάστασης, τις πρακτικές γείωσης και τις μεθόδους ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος. Επίσης, ενσωματώνει μελέτη σχετική με την παρακολούθηση της κατάστασης της μπαταρίας, την ισορροπημένη φόρτιση και εκφόρτιση, καθώς και την εξ αποστάσεως διαχείριση και παρακολούθηση του συστήματος μέσω έξυπνων συσκευών. Η καταγραφή και ανάλυση πιθανών βλαβών, τεχνικών δυσλειτουργιών ή σφαλμάτων λειτουργίας αποτελεί ακόμα έναν κρίσιμο στόχο, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα πρόληψης και αποτελεσματικής αποκατάστασης προβλημάτων που μπορούν να επηρεάσουν την ενεργειακή απόδοση ή να προκαλέσουν αστοχίες και σημαντικές φθορές στο σύστημα.

Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην παρουσίαση των πρακτικών συντήρησης, των απαιτούμενων τεχνικών ελέγχου, των εργαλείων και της περιοδικότητας των επιθεωρήσεων, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής, συνεχής και αποδοτική λειτουργία του συστήματος στο πέρασμα του χρόνου. Η εργασία στοχεύει να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο τεχνικό και επιστημονικό εγχειρίδιο αναφοράς για τη σχεδίαση, την κατανόηση, τη συντήρηση και την αποκατάσταση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες.

1.3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολούθησε η παρούσας πτυχιακής εργασίας βασίστηκε κυρίως σε θεωρητική ανάλυση, βιβλιογραφική έρευνα, τεχνικά εγχειρίδια και κατασκευαστικά πρότυπα, σε συνδυασμό με την ερμηνεία πραγματικών τεχνικών σχεδίων ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση μέσω επιστημονικών άρθρων, εγχειριδίων κατασκευαστών (όπως Victron Energy), τεχνικών οδηγών, πρότυπων της IEC και μελετών περιβαλλοντικού και τεχνικού χαρακτήρα. Έμφαση δόθηκε στην απόκτηση αξιόπιστων πληροφοριών για την αρχή λειτουργίας, την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τις τεχνικές παραμέτρους των επιμέρους εξαρτημάτων του συστήματος.

Στη συνέχεια, διαμορφώθηκε η πλήρης αρχιτεκτονική του συστήματος, βασισμένη σε πραγματικό διάγραμμα που αναπαριστά το συνολικό ηλεκτρολογικό κύκλωμα. Οι επιμέρους συνδέσεις, οι διατομές των καλωδίων, οι συνιστώσες ασφαλείας και τα

σημεία μέτρησης αναλύθηκαν λεπτομερώς και εξετάστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα και τις βέλτιστες πρακτικές της αγοράς.

Παράλληλα, αναπτύχθηκαν ενότητες σχετικά με την ανάλυση βλαβών, προβλήματα λειτουργίας και μέτρα αντιμετώπισης για κάθε κρίσιμο υποσύστημα, με στόχο τη συνεισφορά στην πρόληψη και αποκατάσταση δυσλειτουργιών. Η συντήρηση εξετάστηκε τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά, με αναφορά σε απαιτούμενα εργαλεία, διαδικασίες και προτεινόμενα διαστήματα επιθεώρησης.

Η επιλογή του θεωρητικού τρόπου προσέγγισης βασίστηκε στο γεγονός ότι η εργασία αφορά κυρίως μελέτη και τεχνική ανάλυση υπαρκτού σχεδιασμού και όχι πειραματική κατασκευή ή εργαστηριακή δοκιμή, χωρίς να αποκλείεται όμως η πρακτική της εφαρμογή στο παρόν και στο μέλλον.

1.4. Εφαρμογή του συστήματος

Ένα αυτόνομο σπίτι με φωτοβολταϊκά συστήματα και μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί μια σύγχρονη και ολοκληρωμένη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός νοικοκυριού ή μιας κατοικίας χωρίς την εξάρτηση της από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η τεχνολογία αυτή αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια, μια ανεξάντλητη, καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, μετατρέποντάς την σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω των φωτοβολταϊκών πάνελ, ενώ οι μπαταρίες αναλαμβάνουν την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας για χρήση κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις ημέρες με μειωμένη ηλιοφάνεια. Η δυνατότητα αυτή εξασφαλίζει την αδιάκοπη και σταθερή παροχή ενέργειας, ακόμα και σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο ή σε περιπτώσεις διακοπών ρεύματος, προσφέροντας έτσι ένα αίσθημα ασφάλειας και ανεξαρτησίας στους ενοίκους.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της επιλογής είναι πολλαπλά και καλύπτουν οικονομικές, οικολογικές και πρακτικές διαστάσεις. Πρώτον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο μειώνει δραστικά ή ακόμα και μηδενίζει τις χρεώσεις στους λογαριασμούς ρεύματος, ειδικά όταν το σύστημα έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για να καλύπτει τις ανάγκες της κατοικίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Δεύτερον, η χρήση ηλιακής ενέργειας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρύπων, καθιστώντας τη λειτουργία του σπιτιού περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον και σύμφωνη με τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης. Τρίτον, η

ενεργειακή ανεξαρτησία ενισχύει την αυτάρκεια του νοικοκυριού, αποδεσμεύοντάς το από εξωτερικές διακυμάνσεις τιμών στην ενέργεια, από πολιτικές ή γεωπολιτικές κρίσεις που επηρεάζουν την προμήθεια ηλεκτρισμού, καθώς και από την ποιότητα των υποδομών του τοπικού δικτύου.

Επίσης, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος με μπαταρίες μπορεί να αυξήσει σημαντικά την εμπορική αξία του ακινήτου, καθώς θεωρείται πλέον επένδυση με μελλοντική προοπτική, ιδίως σε μια εποχή όπου οι οικολογικές και ενεργειακά αποδοτικές κατοικίες αποκτούν όλο και μεγαλύτερη ζήτηση. Δεν είναι τυχαίο ότι σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, έχουν θεσπιστεί προγράμματα επιδοτήσεων και φορολογικών κινήτρων για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων, ενθαρρύνοντας τους πολίτες να στραφούν σε πιο βιώσιμες και περιβαλλοντικά συνειδητές λύσεις μετατρέποντας τις κατοικίες τους σε ΚΜΕΚ (Κτήρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης).

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η μετάβαση σε ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις και περιορισμούς, τους οποίους πρέπει να εξετάσει προσεκτικά κάθε ενδιαφερόμενος. Πρώτον, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να είναι αρκετά υψηλό, καθώς περιλαμβάνει όχι μόνο τα φωτοβολταϊκά πάνελ, αλλά και τον μετατροπέα (inverter), τις μπαταρίες αποθήκευσης, το σύστημα ελέγχου φόρτισης, καθώς και τα κόστη μελέτης και τοποθέτησης. Αν και το κόστος αυτό σταδιακά αποσβένεται μέσα στα χρόνια, για πολλές οικογένειες η αρχική επένδυση μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά. Δεύτερον, το σύστημα απαιτεί σωστό σχεδιασμό και τεχνική κατάρτιση, ώστε να ανταποκρίνεται επαρκώς στις ενεργειακές ανάγκες της οικίας και να λειτουργεί αποδοτικά σε όλες τις εποχές. Επιπλέον, οι μπαταρίες έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, συνήθως 8–15 έτη ανάλογα με το είδος (π.χ. μολύβδου ή λιθίου), και συνεπώς απαιτούν αντικατάσταση και συντήρηση, κάτι που συνεπάγεται επιπλέον μακροχρόνιο κόστος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά σε συννεφιασμένες περιοχές ή τοποθεσίες με περιορισμένη ηλιακή έκθεση, το σύστημα μπορεί να μην αποδώσει πλήρως, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση εφεδρικής γεννήτριας ή τη διατήρηση σύνδεσης με το δίκτυο.

Συνοψίζοντας, η επιλογή μίας αυτόνομης κατοικίας με Φ/Β πάνελ και μπαταρίες, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή λύση με σημαντικά οφέλη σε οικονομικό,

οικολογικό και πρακτικό επίπεδο. Προσφέρει τη δυνατότητα απεξάρτησης από το δίκτυο, εξασφαλίζει αυτάρκεια και ασφάλεια, και ενισχύει τη συμβολή κάθε πολίτη στην προστασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα, όμως, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, οικονομική επένδυση και καλή κατανόηση των τεχνικών απαιτήσεων. Για όσους είναι διατεθειμένοι να επενδύσουν στην ποιότητα ζωής τους και να στραφούν σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο, η συγκεκριμένη λύση αξίζει σίγουρα να εξεταστεί σοβαρά.

Κεφάλαιο 2°

Περιγραφή των επιμέρους εξαρτημάτων

2.1 Εξήγηση εξαρτημάτων

Το σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, από έξυπνο MPPT ρυθμιστή φόρτισης, busbar, off-grid inverter, ενεργειακό διακόπτη μπαταρίας, μπαταρία ιόντων λιθίου, battery balancer, εξυπνομετρητή. Παρακάτω θα εξεταστεί το κάθε εξάρτημα εις βάθος, καθώς και ο ρόλος του κάθε κομματιού στη βιωσιμότητα καθώς και στη απόδοση του συστήματος.

2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ

Η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα της ηλιακής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ποικίλων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ, καθένα εκ των οποίων διακρίνεται ως προς τη δομή, το υλικό κατασκευής, την αποδοτικότητα και τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Τα Φ/Β πάνελ ταξινομούνται κυρίως σε τρεις βασικές κατηγορίες: μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά και πάνελ λεπτού υμενίου, ενώ παράλληλα αναδύονται νέες τεχνολογίες με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ (βλέπε Εικόνα 2.1) κατασκευάζονται από καθαρό πυρίτιο, σε μία συνεχή και ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή. Η μονοκρυσταλλική φύση τους επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να κινούνται με λιγότερες απώλειες, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή απόδοση μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 18% και 22%, γεγονός που καθιστά τα συγκεκριμένα πάνελ κατάλληλα για εφαρμογές όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Η οπτική τους παρουσία διαμορφώνεται από το σκούρο μαύρο χρώμα και την τετραγωνισμένη μορφή των κυψελών με κομμένες άκρες.



Εικόνα 1: Μονοκρυσταλλικό Φ/Β Πάνελ

Αντιθέτως, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ (βλέπε Εικόνα 2.2) αποτελούνται από μικρούς κρυστάλλους πυριτίου που συνυπάρχουν στο ίδιο ημιαγωγικό σώμα. Η δομή αυτή προκαλεί περισσότερες εσωτερικές απώλειες στην κίνηση των φορέων φορτίου, μειώνοντας την αποδοτικότητά τους σε επίπεδα από 15% έως 18%. Αν και παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής και διατίθενται ευρέως για εφαρμογές σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, όπου η εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Χρωματικά διακρίνονται από την ανοιχτότερη μπλε απόχρωση και τη μη ομοιόμορφη υφή.



Εικόνα 2: Πολυκρυσταλλικό Φ/Β πάνελ

Μία τρίτη τεχνολογική προσέγγιση υλοποιείται μέσω των πάνελ λεπτού υμενίου (βλέπε Εικόνα 2.3). Στην περίπτωση αυτή, τα φωτοευαίσθητα υλικά τοποθετούνται ως λεπτές

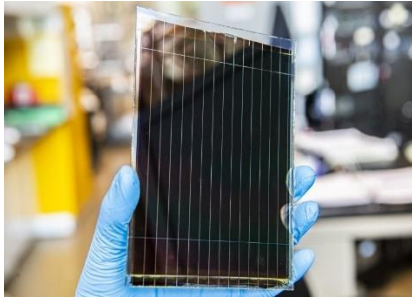
στρώσεις επάνω σε υποστρώματα όπως γυαλί, μέταλλο ή εύκαμπτο πλαστικό. Η τεχνολογία λεπτού υμενίου περιλαμβάνει διάφορες υποκατηγορίες, όπως το άμορφο πυρίτιο, το τελλουριούχο κάδμιο και τις κυψέλες χαλκό-ινδίου-γαλλίου-σεληνίου. Τα πάνελ με άμορφο πυρίτιο παρουσιάζουν τη μικρότερη απόδοση, συνήθως μεταξύ 7% και 10%, αλλά χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής και μεγάλη ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες ή σκίαση. Το τελλουριούχο κάδμιο εμφανίζει αποδόσεις έως 12% και είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό σε εφαρμογές μεγάλων έργων, αν και υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες λόγω της τοξικότητας του καδμίου. Οι κυψέλες τύπου CIGS συνδυάζουν υψηλότερη απόδοση (μέχρι 16%) και ευελιξία, καθιστώντας τα συγκεκριμένα πάνελ ιδανικά για ενσωμάτωση σε αρχιτεκτονικά στοιχεία ή φορητές εφαρμογές.



Εικόνα 3: Φ/Β πάνελ λεπτού υμενίου

Τα τελευταία χρόνια, οι έρευνες έχουν δώσει ώθηση στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, με έμφαση στην περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης και της σταθερότητας των πάνελ. Οι κυψέλες περοβσκίτη (βλέπε Εικόνα 2.4) αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της καινοτομίας, καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές αποδόσεις σε εργαστηριακές συνθήκες, φθάνοντας ποσοστά άνω του 25%. Ωστόσο, αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα υποβάθμισης της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου και σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος. Παράλληλα, αναπτύσσονται φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψης λεγόμενα bifacial πλαίσια (βλέπε Εικόνα 2.5), τα οποία μπορούν να απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία τόσο από την εμπρόσθια όσο και από την οπίσθια επιφάνεια, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική παραγόμενη ενέργεια, ιδίως σε περιβάλλοντα με έντονη ανάκλαση. Μια άλλη σημαντική εξέλιξη αποτελεί η τεχνολογία HJT (Heterojunction Technology) (βλέπε Εικόνα 2.6), που συνδυάζει τα

πλεονεκτήματα των μονοκρυσταλλικών και των λεπτών υμενίων για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης και θερμικής σταθερότητας.



Εικόνα 4: Φ/Β κυψελή περοβσκήτη



Εικόνα 5: Bifacial πάνελ



Εικόνα 6: Πάνελ HJT

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου φωτοβολταϊκού πάνελ εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης, οι κλιματολογικές συνθήκες, το κόστος ανά watt, η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι απαιτήσεις συντήρησης. Σε συστήματα αυτόνομα ή με περιορισμένο χώρο, τα μονοκρυσταλλικά πάνελ αποτελούν την προτιμητέα επιλογή λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Αντιθέτως, σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας ή σε έργα με ιδιαίτερους οικονομικούς περιορισμούς, τα πολυκρυσταλλικά ή πάνελ λεπτού υμενίου ενδέχεται να προσφέρουν καλύτερη σχέση κόστους-απόδοσης.

Η συνολική επιλογή και διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τις τεχνολογικές δυνατότητες όσο και τις απαιτήσεις της

εφαρμογής. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να εξετάζονται ζητήματα πιστοποίησης, θερμικής απόδοσης, απόκρισης σε σκίαση και διάρκειας ζωής, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η αποδοτικότητα του συστήματος σε βάθος χρόνου.

2.3 Ρυθμιστής φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης αποτελεί έναν από τους βασικούς και πλέον απαραίτητους μηχανισμούς προστασίας και διαχείρισης σε κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα που περιλαμβάνει συσσωρευτές (μπαταρίες), και ιδιαίτερα σε αυτόνομα (off-grid) συστήματα, στα οποία η διαχείριση της ενέργειας έχει καθοριστική σημασία για τη λειτουργικότητα και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του συστήματος. Η βασική του αποστολή είναι να ελέγχει και να ρυθμίζει την ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται από το πάνελ προς τις μπαταρίες, εξασφαλίζοντας ότι η φόρτιση πραγματοποιείται με τρόπο ασφαλή, αποδοτικό και εντός των επιτρεπτών ηλεκτρικών ορίων.

Χωρίς την παρουσία ρυθμιστή φόρτισης, η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, ιδίως σε ώρες έντονης ηλιοφάνειας, θα μπορούσε να προκαλέσει υπερφόρτιση των συσσωρευτών. Η υπερφόρτιση αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα για τη διάρκεια ζωής και την ασφάλεια των μπαταριών, καθώς οδηγεί σε φθορά των εσωτερικών χημικών στοιχείων, πιθανή διαρροή τοξικών ή εύφλεκτων υλικών, αύξηση της θερμοκρασίας και, σε ακραίες περιπτώσεις, σε θερμική αποσύνθεση ή κίνδυνο ανάφλεξης. Ο ρυθμιστής φόρτισης, επομένως, λειτουργεί ως ασφαλιστικό, αποκόπτοντας τη διαδικασία φόρτισης όταν οι μπαταρίες φτάσουν το καθορισμένο όριο τάσης πλήρους φόρτισης, αποτρέποντας έτσι οποιαδήποτε βλάβη ή απώλεια ενεργειακής απόδοσης.

Επιπρόσθετα, ο ρυθμιστής φόρτισης προστατεύει το σύστημα και από το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης μέσω των φωτοβολταϊκών, το οποίο παρατηρείται όταν, κατά τις νυχτερινές ώρες ή σε περιόδους παρατεταμένης νεφοκάλυψης, τα πάνελ λειτουργούν ως καταναλωτές αντί για παραγωγούς, επιτρέποντας στο ρεύμα να ρέει από τις μπαταρίες προς τα ίδια. Μέσω ενσωματωμένων διόδων προστασίας ή ηλεκτρονικών διακοπών, ο ρυθμιστής αποτρέπει αυτήν την ανεπιθύμητη εκφόρτιση, εξασφαλίζοντας ότι η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη των φορτίων του συστήματος.

Στα σύγχρονα φωτοβολταϊκά συστήματα επιλέγεται συνήθως η χρήση ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT (Maximum Power Point Tracking), ο οποίος αποτελεί την πλέον εξελιγμένη και αποδοτική τεχνολογία ρυθμιστών φόρτισης. Ο ρυθμιστής MPPT εφαρμόζει έναν αλγόριθμο εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος της Φ/Β γεννήτριας, το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τη θερμοκρασία των πάνελ, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και το φορτίο. Εντοπίζοντας δυναμικά το βέλτιστο σημείο λειτουργίας, ο MPPT μπορεί να αποσπάσει σημαντικά περισσότερη ενέργεια από την ίδια επιφάνεια φωτοβολταϊκών, σε σχέση με έναν συμβατικό ρυθμιστή τύπου PWM (Pulse Width Modulation). Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται κυμαίνονται σε 15% έως και 30% υψηλότερες, καθιστώντας τον MPPT την ιδανική επιλογή για εγκαταστάσεις στις οποίες η ενεργειακή απόδοση αποτελεί προτεραιότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο MPPT δεν δρα απλώς ως διαχειριστής φόρτισης, αλλά λειτουργεί παρόμοια με έναν μετατροπέα DC-DC, δηλαδή προσαρμόζει την υψηλότερη τάση των φωτοβολταϊκών σε επίπεδα κατάλληλα για τη φόρτιση των μπαταριών, μετατρέποντας την πλεονάζουσα τάση σε επιπλέον ρεύμα, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Η εξελιγμένη μορφή των σύγχρονων MPPT ρυθμιστών περιλαμβάνει προστασίες υπερθέρμανσης, παγετού, αντίστροφης πολικότητας και βραχυκυκλώματος. Ειδικά στην περίπτωση μπαταριών λιθίου, ο MPPT συνεργάζεται με το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management System - BMS), παρέχοντας έξυπνη φόρτιση προσαρμοσμένη στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της χημείας των κυψελών. Εάν εντοπιστεί ακραία θερμοκρασία λειτουργίας, είτε πολύ υψηλή είτε πολύ χαμηλή (π.χ. παγωμένες μπαταρίες σε εξωτερικούς χώρους), ο MPPT μειώνει ή τερματίζει τη φόρτιση έως ότου επανέλθουν ασφαλείς συνθήκες, αποφεύγοντας βλάβες και μειώνοντας την καταπόνηση του συστήματος.

Τέλος, σημαντική προσθήκη αποτελεί η δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου από απόσταση, μέσω ενσωματωμένων λειτουργιών ασύρματης συνδεσιμότητας όπως Wi-Fi ή Bluetooth. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, μέσω εφαρμογής σε κινητή συσκευή ή υπολογιστή, να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους όπως η τάση των πάνελ, η ένταση φόρτισης, η κατάσταση της μπαταρίας και η συνολική παραγόμενη ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να πραγματοποιεί ρυθμίσεις, ενημερώσεις λογισμικού ή ακόμη και διαγνωστικούς ελέγχους εξ αποστάσεως.

Συμπερασματικά, ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης δεν αποτελεί μόνο στοιχείο προστασίας αλλά και αποδοτικό εργαλείο ενεργειακής διαχείρισης, το οποίο μεγιστοποιεί την αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας, παρατείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών και βελτιώνει τη συνολική λειτουργία και αξιοπιστία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

2.4 Busbars Ζυγοί ρεύματος

Τα busbars (ή ζυγοί ρεύματος) αποτελούν βασικά στοιχεία της ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ειδικά σε συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης όπου απαιτείται αξιόπιστη, ασφαλής και αποδοτική διανομή ισχύος. Πρόκειται για μεταλλικά αγωγίμα στοιχεία, συνήθως κατασκευασμένα από χαλκό ή αλουμίνιο, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να φέρουν και να διανέμουν μεγάλα ρεύματα σε πολλαπλά κυκλώματα ή φορτία εντός της ηλεκτρικού πίνακα ή εγκατάστασης. Η κύρια λειτουργία των busbars είναι να λειτουργούν ως κεντρικές «γραμμές μεταφοράς» ρεύματος, αντικαθιστώντας μεγάλο αριθμό καλωδίσεων και μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα, της απώλειες και την πιθανότητα βλαβών.

Λόγω της μεγάλης επιφάνειας διατομής της, τα busbars εμφανίζουν χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση, πράγμα που οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών κατά τη μεταφορά ισχύος. Επιπλέον, η συμπαγής και επίπεδη μορφή της επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση και οργάνωση εντός πινάκων διανομής, ενώ προσφέρουν μεγάλη μηχανική αντοχή σε δονήσεις ή θερμική καταπόνηση. Ουσιαστικά, οι ζυγοί ρεύματος διανέμουν την ισχύ από την κεντρική παροχή (π.χ. inverter ή ρυθμιστή φόρτισης) της τα υπόλοιπα υποσυστήματα (φορτία, προστασίες, συσσωρευτές), εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη και ασφαλή κατανομή του ρεύματος.

Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, τα busbars χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση και ανακατανομή του ρεύματος μεταξύ των βασικών στοιχείων της ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης, η μπαταρία ιόντων λιθίου, το inverter και τα κυκλώματα προστασίας (της ο ενεργειακός διακόπτης ή ασφάλειες). Ο διαχωρισμός των θετικών και αρνητικών ζυγών επιτρέπει σαφή ηλεκτρική οργάνωση, βελτιώνοντας τη διάγνωση βλαβών και επιτρέποντας ευκολότερη συντήρηση ή επεκτασιμότητα στο μέλλον. Η χρήση busbars αντί για καλώδια σε τέτοια σημεία επιτρέπει μικρότερο ηλεκτρικό μήκος, σταθερότερη σύνδεση, και καλύτερη διαχείριση

ρεύματος υψηλής έντασης, ιδίως όταν το σύστημα λειτουργεί σε ρεύματα που υπερβαίνουν τα 50–100 A.

Επιπλέον, τα busbars παρέχουν τη δυνατότητα για εύκολη ενσωμάτωση οργάνων μέτρησης, ασφαλειών, ρελέ και επαφών συντήρησης, ενώ επιτρέπουν τον καθαρό και ασφαλή σχεδιασμό του ηλεκτρικού πίνακα. Οι σύνδεσμοι της της ακροδέκτες της πραγματοποιούνται συνήθως με βίδες, clamps ή εξειδικευμένες ράγες, εξασφαλίζοντας ανθεκτικές, ασφαλείς και χαμηλής αντίστασης ενώσεις.

Συνολικά, οι ζυγοί αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο των σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία, βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και ευκολία στη λειτουργία και συντήρηση. Η εφαρμογή της στα σύγχρονα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρει σημαντική βελτιστοποίηση της ηλεκτρολογικής διανομής, ενώ συντελεί στην επαγγελματική ποιότητα κατασκευής και την ασφάλεια του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

2.5 Μετατροπéας τάσης inverter

Ο μετατροπέας τάσης, γνωστός και ως inverter, αποτελεί έναν από τα πιο κρίσιμα εξαρτήματα σε κάθε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς αναλαμβάνει την μείζονα λειτουργία της μετατροπής της συνεχούς τάσης (DC) που αποθηκεύεται στις μπαταρίες σε εναλλασσόμενη τάση (AC), κατάλληλη για την τροφοδοσία οικιακών ή επαγγελματικών ηλεκτρικών καταναλωτών. Η μετατροπή αυτή είναι ουσιώδης, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρικών συσκευών και φορτίων που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή που είναι μονοφασικές εγκαταστάσεις απαιτεί εναλλασσόμενη τάση στα 230V/50Hz (στην Ευρώπη), ενώ η παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών και μπαταριών πραγματοποιείται σε συνεχή μορφή.

Η επιλογή του μετατροπέα σε έργα που στοχεύουν στην ανεξαρτησία τους από το δίκτυο τείνουν στην επιλογή ενός off-grid inverter, δηλαδή έναν μετατροπέα μη διασυνδεδεμένο με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο (grid). Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί πλήρως αυτόνομα, χωρίς δυνατότητα έγχυσης ή απορρόφησης ισχύος από το δίκτυο. Οι off-grid μετατροπείς έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα, εξασφαλίζοντας την αυτονομία και ενεργειακή αυτάρκεια του συστήματος. Επομένως, αποτελούν βασική επιλογή για απομονωμένες κατοικίες (συνήθως εξοχικά), αγροικίες,

ορεινά καταφύγια, εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και γενικά σημεία όπου η πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι τεχνικά δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη.

Ο ρόλος του μετατροπέα δεν περιορίζεται μόνο στην αλλαγή του τύπου ρεύματος, αλλά περιλαμβάνει και πολλαπλές κρίσιμες λειτουργίες διαχείρισης και προστασίας, όπως αρχικά σταθεροποίηση της εξόδου σε 230V/50Hz, ανεξάρτητα από διακυμάνσεις στην τάση της μπαταρίας ή στα φορτία. Συγχρονισμός και παροχή ισχύος με χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών. Προστασίες υπέρτασης, υποτάσεως, υπερφόρτωσης και βραχυκυκλώματος, τόσο στην πλευρά των DC όσο και στην πλευρά των AC επίσης και έλεγχο κατάστασης μπαταρίας, με δυνατότητα απενεργοποίησης σε περίπτωση κρίσιμης εκφόρτισης, ώστε να προστατευτεί ο συσσωρευτής από βαθιά αποφόρτιση (deep discharge). Επίσης, είναι σχεδιασμένη ώστε να συνεργάζεται απρόσκοπτα με το υπόλοιπο σύστημα (ρυθμιστή φόρτισης, μπαταρία, έξυπνομετρητή) μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας και αυτόματης παραμετροποίησης.

Αξιοσημείωτη είναι και η λειτουργία έξυπνης ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης φορτίων, που συναντάται σε σύγχρονους ψηφιακούς inverter. Μέσω αυτής, ο inverter μπορεί να ενεργοποιεί ορισμένα φορτία μόνο όταν υπάρχει επαρκής παραγωγή ή όταν η τάση της μπαταρίας είναι εντός καθορισμένων ορίων, βελτιστοποιώντας έτσι την ενεργειακή διαχείριση.

Επιπλέον, πολλοί σύγχρονοι μετατροπείς off-grid διαθέτουν υποδομές παρακολούθησης (monitoring), οι οποίες επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας μέσω Wi-Fi, GSM ή Bluetooth. Ο χρήστης ή ο τεχνικός συντηρητής μπορεί να έχει πρόσβαση σε πληροφορίες όπως τη τάση εξόδου, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τα καταγεγραμμένα σφάλματα και την απόδοση της μετατροπής, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει και δυνατότητα αναβάθμισης λογισμικού του firmware, αυξάνοντας την ευελιξία και τον κύκλο ζωής της συσκευής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση (efficiency) ενός inverter μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει το 95–97%, ανάλογα με το φορτίο και την ποιότητα σχεδίασης, κάτι που σημαίνει ότι οι ενεργειακές απώλειες μετατροπής είναι ελάχιστες. Ειδικά στις

εγκαταστάσεις αυτόνομης παραγωγής ενέργειας, η υψηλή απόδοση του μετατροπέα είναι κρίσιμη, καθώς κάθε ενεργειακή απώλεια μεταφράζεται σε μεγαλύτερες ανάγκες σε φωτοβολταϊκά ή μπαταρίες, αυξάνοντας το κόστος του συνολικού συστήματος.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο μετατροπέας πρέπει να διαστασιολογείται σωστά, με βάση το συνολικό φορτίο αιχμής (peak load), τον τύπο των συσκευών που θα τροφοδοτηθούν (ιδιαίτερα αν περιλαμβάνουν κινητήρες ή επαγωγικά φορτία) και τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης. Η επιλογή του κατάλληλου inverter αποτελεί στρατηγικό τεχνικό βήμα που επηρεάζει τόσο τη λειτουργικότητα όσο και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του συστήματος.

2.6 Ενεργειακοί διακόπτες

Ο ενεργειακός διακόπτης μπαταρίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ασφάλεια και λειτουργικότητα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Πρόκειται για μια ηλεκτρομηχανική ή ηλεκτρονική συσκευή η οποία επιτρέπει την ελεγχόμενη απομόνωση ή σύνδεση της μπαταρίας με το υπόλοιπο ηλεκτρικό κύκλωμα, ανάλογα με τις λειτουργικές ή έκτακτες ανάγκες του συστήματος. Η βασική λειτουργία του είναι να επιτρέπει ή να διακόπτει τη ροή ρεύματος προς και από τη μπαταρία, παρέχοντας μια πρώτη γραμμή προστασίας σε περιπτώσεις σφάλματος, βλάβης ή συντήρησης.

Σε κανονική λειτουργία, ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση "ON", επιτρέποντας την αδιάκοπη τροφοδοσία του συστήματος με ενέργεια από τη μπαταρία ή την αντίστροφη ροή κατά τη φόρτισή της. Ωστόσο, σε περίπτωση αστοχίας, όπως για παράδειγμα βραχυκύκλωμα, υπερένταση ή υπερθέρμανση, ο διακόπτης μπορεί είτε να απενεργοποιηθεί χειροκίνητα, είτε να συνεργαστεί με το Battery Management System (BMS) ή ρελέ για αυτόματη διακοπή της παροχής ρεύματος. Το BMS αξιολογεί κρίσιμες παραμέτρους όπως τάση, θερμοκρασία και ρεύμα εκφόρτισης (π.χ. όταν ξεπερνά το 1C του ονομαστικού φορτίου της μπαταρίας) και αποστέλλει εντολή στον διακόπτη ώστε να αποσυνδέσει την πηγή ισχύος, αποτρέποντας επικίνδυνες καταστάσεις.

Ο ενεργειακός διακόπτης λειτουργεί όχι μόνο ως μέσο προστασίας, αλλά και ως εργαλείο συντήρησης. Μέσω αυτού, μπορούν να απομονωθούν επιμέρους υποσυστήματα για εργασίες επιθεώρησης, αναβάθμισης ή επισκευής, χωρίς να υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα και επομένως χωρίς κίνδυνο ηλεκτροπληξίας ή βραχυκυκλώματος. Επιπλέον, προστατεύει την μπαταρία από ανεπιθύμητη εκφόρτιση

κατά τις περιόδους απραγίας του συστήματος (π.χ. σε εποχικές εγκαταστάσεις), εξαλείφοντας το φορτίο ηρεμίας (standby load) από τα κυκλώματα του inverter, των φορτίων ή του ίδιου του BMS.

Η χρήση του είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση μπαταριών ιόντων λιθίου, λόγω των πιο αυστηρών απαιτήσεων ασφάλειας και λειτουργικών ορίων που αυτές επιβάλλουν. Μια ανεξέλεγκτη εκφόρτιση ή υπερφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε χημική αστάθεια, θερμική διαφυγή και τελικά καταστροφή της μπαταρίας. Ο διακόπτης σε τέτοιες περιπτώσεις λειτουργεί ως τελικός μηχανισμός αποσύνδεσης, σε συνδυασμό με το BMS και άλλους προστατευτικούς μηχανισμούς.

Τέλος, από ενεργειακής πλευράς, η παρουσία του ενεργειακού διακόπτη μπορεί να συμβάλει και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Ελαχιστοποιεί τις απώλειες τάσης όταν δεν είναι απαραίτητη η διασύνδεση της μπαταρίας, ενώ σε εγκαταστάσεις με πολλαπλές τράπεζες συσσωρευτών επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση και απομόνωση κάθε μονάδας.

Η επιλογή ενεργειακού διακόπτη κατάλληλης ονομαστικής τάσης και ρεύματος, με δυνατότητα χειροκίνητης και/ή αυτόματης λειτουργίας, αποτελεί απαραίτητο μέρος του σχεδιασμού ενός ασφαλούς και αξιόπιστου φωτοβολταϊκού συστήματος. Σε αυτόνομα συστήματα ο διακόπτης λειτουργεί σε συντονισμό με το υπόλοιπο σύστημα ελέγχου (MPPT, inverter, BMS), προσφέροντας έτσι ένα στρώμα ασφάλειας πολλαπλής εφεδρείας, το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία μακράς διάρκειας και χωρίς κινδύνους.

2.7 Συσσωρευτές

Στα σύγχρονα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου (LiFePO_4 ή παρόμοιες τεχνολογίες), η εξισορρόπηση των στοιχείων που αποτελούν τη συστοιχία της μπαταρίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ορθή λειτουργία, τη μακροχρόνια απόδοση και, κυρίως, την ασφάλεια του συστήματος. Καθώς οι μπαταρίες λιθίου αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία (cells) τα οποία συνδέονται σε σειρά ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ονομαστική τάση (π.χ. 12V, 24V, 48V), είναι απαραίτητο να διατηρείται η ισοστάθμιση της φόρτισης μεταξύ αυτών. Σε αυτό το σημείο έρχεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο ο Battery Balancer, μια

ηλεκτρονική μονάδα υπεύθυνη για τη διαρκή παρακολούθηση και εξισορρόπηση της τάσης μεταξύ των στοιχείων μιας μπαταρίας.

2.7.1 Η ανάγκη του Battery Balancer

Η ανάγκη ύπαρξης του Battery Balancer πηγάζει από το γεγονός ότι τα επιμέρους στοιχεία μιας μπαταρίας δεν είναι ποτέ απολύτως πανομοιότυπα. Ακόμα και στην περίπτωση που προέρχονται από την ίδια παρτίδα παραγωγής, εμφανίζουν μικρές διαφορές ως προς τη χωρητικότητα, την εσωτερική αντίσταση και την αντίδραση στη φόρτιση ή την εκφόρτιση. Με την πάροδο του χρόνου, αυτές οι διαφορές εντείνονται, με αποτέλεσμα κάποια στοιχεία να φτάνουν σε υψηλότερη τάση κατά τη φόρτιση ή να αποφορτίζονται ταχύτερα, ενώ άλλα παραμένουν σε ασφαλή επίπεδα. Αυτό δημιουργεί επικίνδυνες συνθήκες όπως υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση, που μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη φθορά, θερμική αστάθεια ή και καταστροφή του στοιχείου. Επιπλέον, η συνολική απόδοση της συστοιχίας μειώνεται, καθώς η λειτουργία της καθορίζεται από το "ασθενέστερο" κελί.

Ο Battery Balancer είναι σχεδιασμένος ώστε να παρακολουθεί συνεχώς την τάση των στοιχείων της μπαταρίας και να επεμβαίνει όταν εντοπίζει σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. Η λειτουργία του μπορεί να είναι είτε παθητική είτε ενεργή. Στην παθητική εξισορρόπηση, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη λόγω απλότητας και χαμηλού κόστους, ο balancer αποφορτίζει το στοιχείο με την υψηλότερη τάση μέσω αντίστασης, μετατρέποντας την περίσσεια ενέργεια σε θερμότητα. Αντίθετα, η ενεργή εξισορρόπηση μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια από τα υπερφορτισμένα στοιχεία προς τα υποφορτισμένα, χρησιμοποιώντας μετατροπείς DC-DC, με αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση αλλά αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα.

Η χρήση του balancer είναι απαραίτητη σε μπαταρίες όπου δεν ενσωματώνεται πλήρες Battery Management System (BMS), ωστόσο ακόμη και σε συστήματα που διαθέτουν BMS, ο balancer λειτουργεί βοηθητικά, βελτιώνοντας περαιτέρω την ισορροπία και αυξάνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα. Σε συνδυασμό με τον έξυπνο ενεργειακό μετρητή και τον ρυθμιστή φόρτισης MPPT, επιτυγχάνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου της ενεργειακής κατάστασης της μπαταρίας.

Σε περιπτώσεις που η τάση ενός στοιχείου ξεπερνά τα όρια ασφαλούς λειτουργίας (π.χ. $>3.55\text{V}$ σε στοιχείο LiFePO_4), ο balancer ξεκινά την εκφόρτιση έως ότου το η διαφορά τάσης μεταξύ των στοιχείων να πέσει κάτω από το προκαθορισμένο όριο (συνήθως $30\text{--}50\text{ mV}$). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα και συνεχώς κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης, διατηρώντας τις κυψέλες σε σχεδόν ίδιες τιμές τάσης. Σε πολλά μοντέλα balancer υπάρχουν ενσωματωμένα οπτικά (LED) και ακουστικά σήματα συναγερμού που προειδοποιούν τον χρήστη για ακραίες αποκλίσεις τάσης, ενώ ορισμένα προηγμένα συστήματα διαθέτουν και δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου μέσω Bluetooth ή WiFi.

Στα νέα συστήματα αυτονομίας, ο Battery Balancer χρησιμοποιείται ως κρίσιμο εξάρτημα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, διασφαλίζοντας την ισορροπημένη φόρτιση όλων των στοιχείων της μπαταρίας ιόντων λιθίου που έχει επιλεγεί για την εγκατάσταση. Η παρουσία του καθιστά το σύστημα ασφαλέστερο, πιο αξιόπιστο και μακροβιότερο. Επιπλέον, βελτιώνει την ενεργειακή εκμετάλλευση της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας, αποφεύγοντας την πρόωρη ενεργοποίηση των ορίων φόρτισης ή εκφόρτισης λόγω αδύναμων ή υπερφορτισμένων στοιχείων.

Συνοψίζοντας, ο Battery Balancer αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο κάθε σύγχρονου αυτόνομου συστήματος που βασίζεται σε μπαταρίες πολλαπλών στοιχείων, και ιδίως σε εγκαταστάσεις με μπαταρίες λιθίου. Η σωστή του ενσωμάτωση, ρύθμιση και παρακολούθηση διασφαλίζει τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος, μειώνει τα κόστη συντήρησης και προστατεύει τόσο την επένδυση όσο και την απόδοση του ενεργειακού εξοπλισμού. Η χρήση του στην παρούσα εγκατάσταση αναδεικνύει τη σημασία της μικροηλεκτρονικής εξισορρόπησης στα πλαίσια της βιώσιμης και αποδοτικής διαχείρισης της αποθηκευμένης ενέργειας.

2.7.2 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) αποτελούν μία από τις πιο σύγχρονες και αποδοτικές τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται ευρέως σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς τους, της μακροχρόνιας διάρκειας ζωής και των βελτιωμένων δυνατοτήτων φόρτισης και εκφόρτισης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βασίζεται στη μετακίνηση ιόντων λιθίου μεταξύ της καθόδου και της ανόδου κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

Οι μπαταρίες λιθίου ξεχωρίζουν για την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, που σημαίνει ότι αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια σε μικρότερο όγκο και βάρος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (AGM, GEL). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος ή η ευκολία μεταφοράς παίζει ρόλο, όπως σε τροχήσπιτα, απομακρυσμένα καταλύματα και αγροτικά φωτοβολταϊκά.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα είναι ο υψηλός αριθμός κύκλων ζωής. Οι ποιοτικές μπαταρίες LiFePO_4 (Lithium Iron Phosphate), που είναι η πιο ασφαλής και αξιόπιστη παραλλαγή των Li-ion για σταθερές εγκαταστάσεις, μπορούν να ξεπεράσουν τους 4000–6000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης με βάθος εκφόρτισης 80–100%, διατηρώντας το 70–80% της αρχικής τους χωρητικότητας. Αντιθέτως, οι παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου έχουν πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής και μειωμένη απόδοση όταν υποβάλλονται σε βαθιά εκφόρτιση.

Η αποδοτική λειτουργία των μπαταριών λιθίου σε φωτοβολταϊκά συστήματα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή διαχείριση φόρτισης και θερμοκρασίας. Οι μπαταρίες αυτές λειτουργούν αποδοτικά εντός ενός εύρους θερμοκρασιών, συνήθως μεταξύ 0°C και 45°C για φόρτιση και από -20°C έως 60°C για εκφόρτιση. Ειδικά το ψύχος μπορεί να είναι επιβλαβές για τη φόρτιση, ενώ η υπερθέρμανση μειώνει την ωφέλιμη ζωή της μπαταρίας. Για αυτό τον λόγο, πολλές μονάδες περιλαμβάνουν εσωτερικά Battery Management Systems (BMS), τα οποία παρακολουθούν και προστατεύουν τις κυψέλες από υπέρταση, υπόταση, υπερθέρμανση, υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα.

Η απόδοση φόρτισης στις μπαταρίες λιθίου είναι πολύ υψηλή και αγγίζει το 95–98%. Δηλαδή, σχεδόν όλη η ενέργεια που αποστέλλεται από τον ρυθμιστή φόρτισης αποθηκεύεται χωρίς σημαντικές απώλειες. Σε συνδυασμό με έναν MPPT ρυθμιστή φόρτισης, η συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος αυξάνεται σημαντικά, κάτι που είναι κρίσιμο σε περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες λιθίου είναι κατά κανόνα συντήρησης-free, δεν απαιτούν αναπλήρωση υγρών ή έλεγχο ειδικού βάρους, ενώ προσφέρουν υψηλή ασφάλεια, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως LiFePO_4 , οι οποίες είναι θερμικά και χημικά σταθερές.

Τέλος, αν και το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCOE) των μπαταριών λιθίου είναι

χαμηλότερο, δεδομένης της μακροχρόνιας διάρκειας ζωής, της μειωμένης ανάγκης αντικατάστασης και των μειωμένων απωλειών.

Συμπερασματικά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, και ειδικά οι LiFePO_4 , αποτελούν ιδανική λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Προσφέρουν αξιοπιστία, απόδοση και ασφάλεια, ενώ υποστηρίζουν πλήρως τις ανάγκες ενός σύγχρονου ενεργειακά αυτόνομου σπιτιού ή εγκατάστασης.

2.8 Battery Management System

Το BMS είναι απαραίτητο όχι μόνο για λόγους ασφαλείας, αλλά και για την εξισορρόπηση της τάσης μεταξύ των επιμέρους κυψελών της μπαταρίας. Στην πράξη, αν οι κυψέλες φορτίζονται ή εκφορτίζονται άνισα, μπορεί να οδηγηθούμε σε πρόωρη φθορά ή δυσλειτουργία. Σε μεγαλύτερα συστήματα, για βελτίωση αυτής της εξισορρόπησης χρησιμοποιείται επιπλέον Battery Balancer, που υποστηρίζει την ομοιόμορφη φόρτιση πολλαπλών σειριακά συνδεδεμένων μπαταριών.

Κεφάλαιο 3^ο

Τρόπος λειτουργίας κατόπιν σύνδεσης

3.1 Λειτουργία του συστήματος

Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (off-grid photovoltaic system) αποτελεί μια ολοκληρωμένη ενεργειακή υποδομή, σχεδιασμένη να λειτουργεί ανεξάρτητα από το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Η λειτουργία του βασίζεται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και στην αποθήκευσή της σε συσσωρευτές, ώστε να είναι διαθέσιμη για χρήση ακόμη και κατά τις περιόδους απουσίας ηλιοφάνειας. Η ενεργειακή αλυσίδα ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνει κρίσιμα τεχνολογικά στάδια, που διασφαλίζουν τη μέγιστη απόδοση, τη λειτουργική ασφάλεια και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της εγκατάστασης.

3.2 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια – Μετατροπή Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Ηλεκτρική Ενέργεια

Η αρχική φάση της λειτουργίας του συστήματος αφορά τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των φωτοβολταϊκών πάνελ (PV panels). Τα πλαίσια αυτά αποτελούνται από ημιαγώγιμα υλικά, κυρίως μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, τα οποία αξιοποιούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για την παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικής ενέργειας (DC). Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων. Η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται μέσω καλωδιώσεων στο επόμενο στάδιο του συστήματος.

3.3 Ρυθμιστής Φόρτισης MPPT – Βελτιστοποίηση και Διαχείριση Ενέργειας

Η ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια οδηγείται σε έναν ρυθμιστή φόρτισης τεχνολογίας MPPT (Maximum Power Point Tracking). Η βασική λειτουργία του ρυθμιστή είναι η εύρεση και η διαρκής παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών, εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα λειτουργεί με τη βέλτιστη απόδοση ανεξαρτήτως των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών. Παράλληλα, ο MPPT ρυθμιστής ρυθμίζει τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών, εφαρμόζοντας κατάλληλες στρατηγικές τριών ή τεσσάρων σταδίων (bulk, absorption,

float, optional equalization), ώστε να επιτυγχάνεται μακροχρόνια προστασία και σταθερότητα των μπαταριών.

3.4 Συσσωρευτές Λιθίου – Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ενέργεια που εξέρχεται από τον ρυθμιστή φόρτισης αποθηκεύεται σε συσσωρευτές τεχνολογίας λιθίου, συγκεκριμένα τύπου LiFePO_4 (Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου). Η εν λόγω τεχνολογία επιλέγεται για την αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα, το χαμηλό βάρος, τη μεγάλη διάρκεια ζωής (συνήθως μεγαλύτερη των 3000 κύκλων), την ταχύτερη φόρτιση και την αυξημένη θερμική και χημική σταθερότητα. Επιπλέον, οι μπαταρίες λιθίου περιλαμβάνουν ενσωματωμένο σύστημα διαχείρισης (Battery Management System - BMS), το οποίο παρακολουθεί συνεχώς τις κρίσιμες ηλεκτρικές παραμέτρους όπως τάση, ρεύμα, θερμοκρασία και κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC), με σκοπό την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων υπερφόρτισης, βαθιάς εκφόρτισης ή υπερθέρμανσης.

3.5 Σύστημα Εξισορρόπησης Κυψελών – Battery Balancer

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ομοιομορφία στη φόρτιση όλων των κυψελών της μπαταρίας, εγκαθίσταται σύστημα εξισορρόπησης τάσεων (battery balancer). Ο ρόλος του είναι να ανιχνεύει αποκλίσεις τάσης μεταξύ επιμέρους κυψελών και να μεταφέρει ενέργεια από κυψέλες υψηλότερης τάσης προς χαμηλότερης, επιτυγχάνοντας ηλεκτρική ισορροπία. Η διαδικασία αυτή βελτιστοποιεί την απόδοση της μπαταρίας, αυξάνει τη διάρκεια ζωής της και αποτρέπει την πρόωρη φθορά ή αποτυχία μεμονωμένων στοιχείων.

3.6 Αντιστροφέας Τάσης (Inverter) – Μετατροπή DC σε AC

Δεδομένου ότι η πλειονότητα των ηλεκτρικών φορτίων λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), είναι αναγκαία η μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας από DC σε AC μέσω αντιστροφέα τάσης (inverter). Ο inverter που χρησιμοποιείται είναι τύπου off-grid, σχεδιασμένος να λειτουργεί χωρίς σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο. Εκτός από τη βασική λειτουργία μετατροπής της τάσης από 48V DC σε 230V AC (συχνότητα 50Hz), διαθέτει ενσωματωμένα ηλεκτρονικά προστασίας από υπερτάσεις, βραχυκυκλώματα και θερμική υπερφόρτωση, καθώς και δυνατότητες soft start και προγραμματιζόμενων εξόδων για βελτιστοποίηση της κατανάλωσης.

3.7 Ενεργειακός Διακόπτης – Ασφαλής Απομόνωση και Συντήρηση

Η ύπαρξη ενεργειακού διακόπτη (battery disconnect switch) μεταξύ της μπαταρίας και των υπολοίπων υποσυστημάτων είναι κρίσιμη για λόγους λειτουργικής ασφάλειας. Ο διακόπτης αυτός επιτρέπει την απομόνωση της μπαταρίας σε περιπτώσεις συντήρησης, βλάβης ή έκτακτης ανάγκης, συμβάλλοντας στην αποτροπή ηλεκτροπληξίας ή πυρκαγιάς. Επίσης, λειτουργεί επικουρικά στο BMS, διακόπτοντας τη ροή ρεύματος όταν παραβιάζονται προκαθορισμένα όρια ρεύματος ή τάσης.

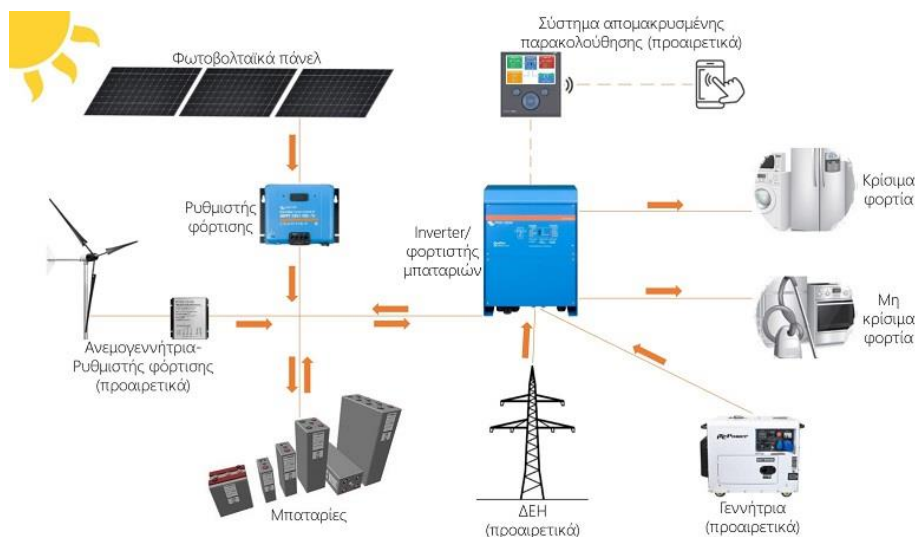
3.8 Καταναλωτές – Τελική Διάθεση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μετασχηματισμένη και ρυθμισμένη ηλεκτρική ενέργεια διατίθεται στους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν οικιακές συσκευές, φωτισμό, αντλίες, συστήματα τηλεπικοινωνίας και άλλες κρίσιμες φορτίσεις. Το σύστημα διασφαλίζει τη συνεχή παροχή ενέργειας, ενώ σε περιόδους μειωμένης ηλιοφάνειας η κατανάλωση υποστηρίζεται πλήρως από την αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές.

3.9 Έξυπνος Μετρητής Ενέργειας – Παρακολούθηση και Ανάλυση

Την εποπτεία του συστήματος αναλαμβάνει ο έξυπνος μετρητής ενέργειας (π.χ. Victron BMV-712 Smart), ο οποίος παρέχει σε πραγματικό χρόνο κρίσιμα δεδομένα για την κατάσταση της μπαταρίας, τη ροή ενέργειας, τον χρόνο αυτονομίας, το ιστορικό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και διαγνωστικές πληροφορίες. Μέσω επικοινωνίας Bluetooth με κινητή συσκευή ή υπολογιστή, προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα πλήρους εποπτείας και έγκαιρης παρέμβασης σε περίπτωση απόκλισης από τις ονομαστικές παραμέτρους.

Ο τρόπος λειτουργίας του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Εικόνα 3.1, το οποίο απεικονίζει τη ροή ενέργειας και τη διασύνδεση των βασικών υποσυστημάτων από τη φάση συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας έως την τελική κατανάλωση.



Εικόνα 7:

Κεφάλαιο 4°

Σχεδιάγραμμα σύνδεσης και ηλεκτρικό σχέδιο

4.1 Επιλογή και Διάσταση Καλωδίων σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Η κατάλληλη επιλογή και διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών καλωδιώσεων αποτελεί κρίσιμο τμήμα του σχεδιασμού και της ασφαλούς λειτουργίας ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος. Στη συγκεκριμένη εργασία, η οποία περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ, MPPT ρυθμιστή φόρτισης, inverter (αντιστροφή), μπαταρία λιθίου, διακόπτες, busbars, smart shunt και battery balancer, η ορθολογική επιλογή των καλωδίων διασφαλίζει τόσο την ενεργειακή αποδοτικότητα όσο και την προστασία των επιμέρους συσκευών.

Η επιλογή των καλωδίων βασίζεται σε τέσσερις κύριες παραμέτρους: την τάση λειτουργίας του κυκλώματος (DC ή AC), την ένταση του ρεύματος που διέρχεται από κάθε γραμμή, την απόσταση μεταξύ των συνδεδεμένων εξαρτημάτων και την επιτρεπόμενη πτώση τάσης, η οποία, για συστήματα χαμηλής τάσης DC (12V, 24V, 48V), συνιστάται να μην υπερβαίνει το 3%. Η πτώση τάσης (V_{drop}) υπολογίζεται με τον τύπο: $V_{drop} = 2 * I * L * R$, όπου I είναι η ένταση του ρεύματος σε αμπέρ, L είναι το μήκος του καλωδίου (μονής διαδρομής) σε μέτρα και R είναι η ωμική αντίσταση ανά

μέτρο καλωδίου. Η διατομή του καλωδίου (σε mm²) επιλέγεται με βάση τα παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μηχανικές αντοχές όσο και τη θερμική απόδοση.

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πάνελ με τον MPPT ρυθμιστή φόρτισης γίνεται με καλώδιο τύπου solar cable PV1-F ή H1Z2Z2-K, το οποίο είναι κατάλληλο για εξωτερική εγκατάσταση, ανθεκτικό στην UV ακτινοβολία και στη θερμότητα. Η τάση του πεδίου μπορεί να φτάνει τα 100V DC ή και περισσότερο, ενώ το ρεύμα εξαρτάται από τη διάταξη των πάνελ. Συνήθως επιλέγεται διατομή 4mm² ή 6mm².

Στη σύνδεση του MPPT ρυθμιστή προς την μπαταρία, η τάση είναι σταθεροποιημένη (24V ή 48V DC) και το ρεύμα είναι αυξημένο. Σε αυτό το σημείο απαιτούνται καλώδια μεγάλης διατομής, συχνά 10mm², 16mm² ή και 25mm², ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που εξέρχεται από τον ρυθμιστή. Επιλέγεται καλώδιο εύκαμπτο, χαλκού, με διπλή μόνωση.

Από την μπαταρία προς τον inverter, το ρεύμα είναι ακόμη υψηλότερο. Για φορτία 2-3kW, σε 24V DC σύστημα, το ρεύμα μπορεί να φτάσει ή να ξεπεράσει τα 120A. Επομένως, χρησιμοποιούνται καλώδια 35mm² ή και 50mm², με θερμική αντοχή έως 105°C και κατάλληλα για DC εφαρμογές. Η ασφάλεια ενισχύεται με την παρεμβολή ασφαλειοθηκών τύπου MEGA ή ANL.

Οι busbars (χάλκινες λωρίδες) λειτουργούν ως ενδιάμεσος αγωγός ρεύματος και μειώνουν τις πολύπλοκες καλωδιώσεις. Στην έξοδο των busbars, οι συνδέσεις γίνονται με εύκαμπτα καλώδια μεγάλης διατομής (16mm² έως 50mm²). Η σύνδεση με τον έξυπνο μετρητή ρεύματος (π.χ. Victron BMV-712 Smart) γίνεται με λεπτότερο καλώδιο σημάτων (0.75mm² - 1mm²).

Οι balancers συνδέονται παράλληλα στους πόλους των κυψελών ή των στοιχείων της μπαταρίας και λειτουργούν σε χαμηλό ρεύμα εξισορρόπησης (<1A). Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται λεπτά καλώδια 0.75mm² – 1mm² με λογισμικό έλεγχο μέσω BMS.

Η επιλογή των καλωδίων πραγματοποιήθηκε με βάση τα πρότυπα: IEC 60364-7-712 για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, NEC 690 (National Electrical Code – ΗΠΑ), και DIN VDE 0100 για ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις DC. Η χρήση αγωγών κατάλληλων για DC αποτρέπει φαινόμενα υπερθέρμανσης, απώλειες και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επίσης, η καλωδίωση φέρει σήμανση EN 50618.

Η επιλογή των καλωδίων δεν βασίστηκε μόνο σε θεωρητικά μεγέθη αλλά και σε πρακτικές παραμέτρους του συστήματος όπως μήκος καλωδίωσης, θερμική φόρτιση, είδος φορτίων και επίπεδα ασφαλείας. Ολόκληρη η καλωδίωση επιλέχθηκε ώστε να εξασφαλίζει ελάχιστες απώλειες ενέργειας, θερμική και μηχανική αντοχή, εύκολη συντήρηση και συμμόρφωση με ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα ασφαλείας. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη μακροχρόνια αξιοπιστία και ενεργειακή αποδοτικότητα του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.2 Επιλογή και Τοποθέτηση Ασφαλειών σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Η εγκατάσταση ορθών διατάξεων προστασίας, όπως οι ηλεκτρικές ασφάλειες, αποτελεί αναπόσπαστο και κρίσιμο μέρος κάθε σύγχρονου ηλεκτρολογικού συστήματος, ειδικά σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η ευστάθεια λειτουργίας είναι υψίστης σημασίας. Οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται για την προστασία των αγωγών και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων από υπερένταση, βραχυκύκλωμα ή θερμική υπερφόρτιση, αποτρέποντας έτσι φθορά, πυρκαγιά ή σοβαρή δυσλειτουργία του συστήματος. Η σωστή επιλογή, τύπος και τοποθέτηση των ασφαλειών σχεδιάζεται με βάση τις ηλεκτρικές παραμέτρους κάθε τμήματος του συστήματος και σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 60269, IEC 60364 και NEC 690.

4.2.1 Ασφάλειες μεταξύ φωτοβολταϊκών πάνελ και MPPT ρυθμιστή φόρτισης

Στην έξοδο του πεδίου των φωτοβολταϊκών πάνελ, και συγκεκριμένα στον θετικό αγωγό κάθε επιμέρους string, τοποθετούνται ασφάλειες τύπου PV (Photovoltaic Fuses), οι οποίες είναι σχεδιασμένες για συνεχή τάση DC έως 1000V και έχουν χαρακτηριστικά γρήγορης απόκρισης (gPV). Ο ρόλος τους είναι η προστασία των αγωγών από αντίστροφα ρεύματα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε μία ή περισσότερες σειρές πάνελ. Η τιμή της ασφάλειας επιλέγεται 1,25 έως 1,5 φορές πάνω από το ρεύμα βραχυκύκλωσης των πάνελ. Οι ασφάλειες τοποθετούνται εντός ειδικών βάσεων ασφαλειών ή string combiner boxes, με δυνατότητα απενεργοποίησης ή απομόνωσης του πεδίου.

4.2.2 Ασφάλεια μεταξύ ρυθμιστή φόρτισης και μπαταρίας

Η σύνδεση του MPPT ρυθμιστή προς τη συστοιχία της μπαταρίας προστατεύεται με ασφάλεια τύπου DC, συνήθως σε μορφή ANL ή MEGA fuse, τοποθετημένη στον θετικό αγωγό όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον ακροδέκτη της μπαταρίας. Η τιμή της ασφάλειας υπολογίζεται βάσει της μέγιστης εξόδου του ρυθμιστή συν 25% περιθώριο ασφαλείας. Η ασφάλεια προστατεύει τόσο την έξοδο του ρυθμιστή όσο και τους αγωγούς από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα, περιορίζοντας τα θερμικά και ηλεκτρικά φορτία.

4.2.3 Ασφάλεια στην έξοδο του inverter (AC πλευρά)

Στην έξοδο του inverter, όπου παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), τοποθετείται θερμομαγνητικός μικροαυτόματος (MCB), τριπολικός για τριφασική έξοδο ή μονοπολικός για μονοφασική, ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος. Οι ασφάλειες αυτές επιλέγονται σύμφωνα με την ονομαστική ισχύ του inverter και την κατηγορία φορτίου (cosφ, τύπος εκκίνησης). Εναλλακτικά, μπορεί να τοποθετηθεί διακόπτης διαρροής (RCD) για προστασία από ηλεκτροπληξία, ιδίως σε κατοικίες ή σε σημεία με πιθανότητα ανθρώπινης επαφής.

4.2.4 Ασφάλεια μπαταρίας (Battery Main Fuse)

Η κύρια προστασία της μπαταρίας τοποθετείται στον θετικό ακροδέκτη της και προστατεύει τόσο από υπερβολικό ρεύμα εκφόρτισης όσο και από βραχυκύκλωμα μεταξύ μπαταρίας και φορτίου ή inverter. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με το ρεύμα εκφόρτισης του inverter (συνήθως 1,25x του μέγιστου συνεχούς ρεύματος) και χρησιμοποιούνται ασφάλειες τύπου Class T, ANL, ή NH με κατάλληλη βάση. Η θέση τοποθέτησης είναι εντός ηλεκτρολογικού πίνακα ή εντός battery box, με δυνατότητα οπτικού ελέγχου.

4.2.5 . Ασφάλεια μεταξύ φορτίων DC και συστοιχίας

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν DC καταναλωτές (όπως DC φωτισμός ή φορτιστές USB), εγκαθίσταται ξεχωριστή γραμμή με δική της ασφάλεια τύπου blade ή MCB DC, με αντίστοιχη σήμανση και προδιαγραφές. Οι γραμμές αυτές συνήθως είναι χαμηλότερης έντασης και προστατεύονται με 5A – 20A ασφάλειες.

4.3 Συμπεράσματα

Η ορθή επιλογή και τοποθέτηση των ασφαλειών είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η επιλογή γίνεται βάσει των ρευμάτων λειτουργίας, των χαρακτηριστικών των καλωδίων, του τύπου των φορτίων και των ιδιοτεροτήτων του εξοπλισμού, με γνώμονα τη διατήρηση της ακεραιότητας του συστήματος. Όλες οι ασφάλειες θα πρέπει να επιθεωρούνται τακτικά και να αντικαθίστανται σε περίπτωση ενεργοποίησης, διατηρώντας υψηλά επίπεδα ασφαλείας και ενεργειακής αξιοπιστίας στο σύστημα.

Κεφάλαιο 5^ο

Net Metering και Net Billing: Ανάλυση και Σύγκριση των Σχημάτων Αυτοπαραγωγής με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

5.1 Εισαγωγή στις έννοιες

Τα τελευταία χρόνια, η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχει γνωρίσει αλματώδη ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ανάγκη για βιώσιμες και αποδοτικές ενεργειακές λύσεις, σε συνδυασμό με την επιθυμία για μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, έχει οδηγήσει στην ενίσχυση των συστημάτων αυτοπαραγωγής με ιδιοκατανάλωση. Στο πλαίσιο αυτό, δύο κύριοι μηχανισμοί αποζημίωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν καθιερωθεί: το Net Metering και το Net Billing. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί διαφέρουν τόσο στη μεθοδολογία συμψηφισμού όσο και στη χρηματοοικονομική τους απόδοση, ενώ απευθύνονται σε διαφορετικές κατηγορίες καταναλωτών και επενδυτών.

5.2 Net metering

Το Net Metering, γνωστό στα ελληνικά ως "ενεργειακός συμψηφισμός", βασίζεται στην αρχή του ισοζυγίου ενέργειας. Σε αυτό το σύστημα, ο αυτοπαραγωγός – είτε πρόκειται για οικιακό χρήστη, εμπορική επιχείρηση ή βιομηχανία – εγκαθιστά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στο σημείο κατανάλωσης και η παραγόμενη ενέργεια συμψηφίζεται με την καταναλισκόμενη ενέργεια σε φυσικές μονάδες, δηλαδή σε κιλοβατώρες (kWh). Ο μετρητής είναι διπλής κατεύθυνσης, καταγράφοντας την ενέργεια που καταναλώνεται

από το δίκτυο καθώς και εκείνη που επιστρέφεται σε αυτό. Η περίοδος εκκαθάρισης του ενεργειακού ισοζυγίου είναι συνήθως ετήσια, πράγμα που σημαίνει ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ο χρήστης μπορεί να καταναλώνει ή να παράγει ενέργεια και στο τέλος της χρονιάς γίνεται η συνολική εκκαθάριση. Αν έχει καταναλώσει περισσότερη ενέργεια από αυτή που παρήγαγε, πληρώνει τη διαφορά. Αν έχει παραγάγει περισσότερη, τότε το πλεόνασμα δεν αποζημιώνεται και "χάνεται", δηλαδή μηδενίζεται.

Το Net Metering παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Είναι ένας απλός μηχανισμός, εύκολα κατανοητός, και προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα όταν η παραγωγή και η κατανάλωση είναι χρονικά συγχρονισμένες. Επιπλέον, ο χρήστης δεν χρειάζεται να ασχοληθεί με εμπορικές συναλλαγές ή τιμολογήσεις, καθώς η αξία της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι ισότιμη σε kWh. Ωστόσο, υπάρχουν και περιορισμοί. Το γεγονός ότι η επιπλέον παραγόμενη ενέργεια στο τέλος της περιόδου εκκαθάρισης δεν αποζημιώνεται, λειτουργεί αποτρεπτικά για την εγκατάσταση μεγαλύτερων συστημάτων, αφού δεν δίνεται κίνητρο για υπερπαραγωγή. Επιπλέον, το Net Metering δεν είναι κατάλληλο για περιπτώσεις όπου η παραγωγή ενέργειας υπερβαίνει συστηματικά την κατανάλωση, όπως για παράδειγμα σε αγροτικές ή βιοτεχνικές μονάδες με εποχική ή μεταβλητή ζήτηση.

5.3 Net Billing

Το Net Billing λειτουργεί με τη λογική του χρηματικού συμψηφισμού. Σε αυτόν τον μηχανισμό, η ενέργεια που εξάγεται στο δίκτυο από την εγκατάσταση του αυτοπαραγωγού αποζημιώνεται σε τιμή πώλησης η οποία καθορίζεται από τη χονδρική τιμή αγοράς ενέργειας, συνήθως την Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ), ενώ η ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο χρεώνεται με την τιμή λιανικής, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη. Ο συμψηφισμός δεν γίνεται σε kWh αλλά σε χρηματικές μονάδες (ευρώ). Αυτό σημαίνει ότι ο λογαριασμός του χρήστη περιλαμβάνει το ποσό που χρεώνεται για την ενέργεια που καταναλώθηκε και αφαιρείται από αυτό το ποσό που αντιστοιχεί στην ενέργεια που εξήχθη στο δίκτυο. Η εκκαθάριση γίνεται συνήθως σε μηνιαία ή διμηνιαία βάση, ακολουθώντας τον κύκλο τιμολόγησης του παρόχου ενέργειας.

Το Net Billing προσφέρει τη δυνατότητα στον αυτοπαραγωγό να αξιοποιήσει εμπορικά την πλεονάζουσα ενέργεια. Δεν υπάρχει απώλεια παραγωγής στο τέλος της περιόδου, καθώς κάθε kWh που δεν καταναλώνεται επιτόπου πωλείται στο δίκτυο. Αυτό το

χαρακτηριστικό καθιστά το Net Billing ιδανικό για επιχειρήσεις ή εγκαταστάσεις που παράγουν σταθερά περισσότερο από ό,τι καταναλώνουν. Επιπλέον, επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερων συστημάτων και υποστηρίζει επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται στην παραγωγή και πώληση ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, δεν υπάρχει ενεργειακή ισοτιμία. Η ενέργεια που πωλείται αποζημιώνεται με πολύ χαμηλότερη τιμή από αυτή που αγοράζεται, δημιουργώντας έτσι ένα αρνητικό οικονομικό περιθώριο, ή spread, για τον αυτοπαραγωγό. Δεύτερον, το σύστημα είναι πιο περίπλοκο τόσο τεχνικά όσο και λογιστικά, καθώς απαιτεί τριπλή μέτρηση και ακριβή καταγραφή των εισροών, εκροών και της καθαρής παραγωγής. Τρίτον, οι αποδόσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις των τιμών στην αγορά χονδρικής, γεγονός που καθιστά τις προβλέψεις λιγότερο σταθερές.

5.4 Κύριες διαφορές μεταξύ Net Metering & Net Billing

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο μηχανισμών εστιάζονται στον τρόπο και το μέσο συμψηφισμού. Το Net Metering βασίζεται σε φυσικές μονάδες (kWh), προσφέροντας έναν ενεργειακό συμψηφισμό "1 προς 1". Αντιθέτως, το Net Billing βασίζεται σε χρηματικό ισοζύγιο, όπου κάθε kWh που εξάγεται έχει συγκεκριμένη αξία σε ευρώ, χαμηλότερη όμως από αυτή της kWh που καταναλώνεται. Σημαντική είναι και η διαφορά στην περίοδο εκκαθάρισης καθώς το Net Metering εκκαθαρίζεται ετησίως, ενώ το Net Billing σε μικρότερες χρονικές περιόδους, γεγονός που επηρεάζει τη ρευστότητα και τις επενδυτικές αποφάσεις των χρηστών.

Αναλόγως του προφίλ του αυτοπαραγωγού, προκύπτει και η καταλληλότητα του κάθε μηχανισμού. Το Net Metering είναι περισσότερο κατάλληλο για οικιακούς χρήστες ή μικρές επιχειρήσεις που στοχεύουν στην κάλυψη της δικής τους κατανάλωσης και επιδιώκουν ενεργειακή αυτάρκεια χωρίς εμπλοκή σε εμπορικές δραστηριότητες. Αντιθέτως, το Net Billing προσαρμόζεται καλύτερα σε εγκαταστάσεις με σημαντικό πλεόνασμα παραγωγής, όπως αγροτικές μονάδες, ξενοδοχεία, ή βιοτεχνίες με μεταβλητό ωράριο λειτουργίας, καθώς παρέχει δυνατότητα πώλησης της ενέργειας και ενδεχομένως αποφέρει κέρδη από αυτή τη διαδικασία.

Ένα ακόμη ζήτημα που τίθεται αφορά τα κίνητρα για την εγκατάσταση μεγαλύτερων ή πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το Net Metering, λόγω της απώλειας του πλεονάσματος στο τέλος της περιόδου, αποθαρρύνει την υπερπαραγωγή.

Αντιθέτως, το Net Billing μπορεί να δώσει κίνητρα για την εγκατάσταση μεγαλύτερων μονάδων, ακριβώς επειδή κάθε παραγόμενη kWh μπορεί να πωληθεί, ανεξαρτήτως της κατανάλωσης της εγκατάστασης.

Συμπερασματικά, η επιλογή μεταξύ Net Metering και Net Billing δεν μπορεί να γίνει καθολικά αλλά εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων. Αυτές περιλαμβάνουν το μέγεθος της εγκατάστασης, το προφίλ και τη χρονική κατανομή της κατανάλωσης, την επιθυμία ή όχι για εμπορική δραστηριότητα, καθώς και τη στρατηγική ενεργειακής διαχείρισης που θέλει να ακολουθήσει ο αυτοπαραγωγός. Για παράδειγμα, ένα νοικοκυριό με σταθερή ημερήσια κατανάλωση είναι πιθανότερο να ωφεληθεί από ένα σύστημα Net Metering, ενώ μια μικρή επιχείρηση με πλεονάζουσα παραγωγή και εποχική κατανάλωση θα μπορούσε να αποκομίσει περισσότερα οφέλη από το Net Billing.

5.5 Συμπεράσματα

Το ενεργειακό τοπίο μεταβάλλεται διαρκώς, και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας ή οι αλλαγές στο θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο ενδέχεται να επηρεάσουν μελλοντικά την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα των δύο συστημάτων. Παράλληλα, η σταδιακή ενσωμάτωση των έξυπνων μετρητών (smart meters) και η δυνατότητα δυναμικής τιμολόγησης ανάλογα με τη ζήτηση και την προσφορά, μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω διαφοροποιήσεις μεταξύ Net Metering και Net Billing.

Σε κάθε περίπτωση, η κατανόηση των δύο αυτών μηχανισμών είναι απαραίτητη για κάθε ενδιαφερόμενο που σκοπεύει να επενδύσει σε συστήματα ΑΠΕ, είτε με στόχο την ενεργειακή αυτάρκεια είτε με σκοπό την οικονομική απόδοση. Η σωστή επιλογή του μηχανισμού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας, και οφείλει να βασίζεται σε ολοκληρωμένη αξιολόγηση των τεχνικών, οικονομικών και λειτουργικών παραμέτρων της εκάστοτε εφαρμογής.

Κεφάλαιο 6°

Συχνές βλάβες

6.1 Εισαγωγές στις βλάβες

Στην εγκατάσταση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να εμφανιστούν διάφορες βλάβες, είτε σε επίπεδο εξοπλισμού είτε σε επίπεδο συνδεσμολογίας και λειτουργίας. Οι πιο συχνές βλάβες περιλαμβάνουν: Βλάβες στα φωτοβολταϊκά πάνελ, βλάβες στον ρυθμιστή φόρτισης, βλάβες στις μπαταρίες λιθίου, βλάβες στο Inverter, βλάβες busbars και καλωδιώσεων, βλάβες σε battery balancer καθώς και γενικά ηλεκτρικά σφάλματα.

6.2 Βλάβες φωτοβολταϊκών πάνελ σε αυτόνομα συστήματα: αίτια, επιπτώσεις και αντιμετώπιση

Η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται κυρίως από τη σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Τα πάνελ αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας, μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC), η οποία τροφοδοτεί το υπόλοιπο σύστημα μέσω του ρυθμιστή φόρτισης και των συσσωρευτών. Παρά την απλότητα της αρχής λειτουργίας τους, τα Φ/Β πάνελ είναι ευάλωτα σε ποικίλες βλάβες και φθορές, τόσο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας όσο και εξαιτίας εξωτερικών παραγόντων, που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση ή ακόμη και να προκαλέσουν σοβαρά λειτουργικά προβλήματα σε ολόκληρο το σύστημα.

6.3 Θερμά Σημεία

Μία από τις συνήθεις και πλέον επιβλαβείς βλάβες είναι τα λεγόμενα **θερμά σημεία (hot spots)**. Πρόκειται για περιοχές στο εσωτερικό του πάνελ όπου η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά λόγω τοπικής αυξημένης αντίστασης ή σκίασης. Αυτό συνήθως οφείλεται είτε σε ακαθαρσίες (π.χ. σκόνη, περιπτώματα πουλιών), είτε σε μερική σκίαση από αντικείμενα (π.χ. κλαδιά, κεραίες), είτε σε βιομηχανικές αστοχίες στην παραγωγή των κυψελών. Τα θερμά σημεία λειτουργούν ως τοπικά "φορτία" και όχι ως γεννήτριες, καταναλώνοντας μέρος της παραγόμενης ενέργειας και θερμαίνοντας το στοιχείο. Η επαναλαμβανόμενη ή παρατεταμένη λειτουργία με hot spots οδηγεί σε **θερμική**

καταπόνηση και σταδιακή καταστροφή του φωτοβολταϊκού πάνελ, μειώνοντας μόνιμα την ενεργειακή απόδοση του πάνελ.

6.4 Ρωγμές και δομικές φθορές

Οι μικρορωγμές στις κυψέλες και τα ραγίσματα στο προστατευτικό γυαλί αποτελούν ένα ακόμα σοβαρό πρόβλημα. Οι ρωγμές μπορεί να προκληθούν από μηχανική καταπόνηση κατά τη μεταφορά ή την εγκατάσταση, αλλά και από θερμικούς κύκλους διαστολής–συστολής λόγω των ημερήσιων αυξομειώσεων της θερμοκρασίας. Αν και συχνά είναι οπτικά αόρατες, μπορούν να μειώσουν την αγωγή επιφάνεια της κυψέλης και να μειώσουν την απόδοση του πάνελ. Στο γυαλί, ραγίσματα από χαλάζι ή πτώση αντικειμένων μπορεί να προκαλέσουν είσοδο υγρασίας στο εσωτερικό του πάνελ, οδηγώντας σε διάβρωση των επαφών και οξείδωση του μεταλλικού πλαισίου.

6.5 Διάβρωση και Υγρασία

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ εκτίθενται διαρκώς σε καιρικές συνθήκες. Ελλιπής στεγανοποίηση ή κακή ποιότητα κατασκευής μπορεί να υπάρξει υγρασίας στο εσωτερικό, η οποία μακροπρόθεσμα προκαλεί διάβρωση των ηλεκτρικών συνδέσεων, αλλοιώνοντας τις ιδιότητες των υλικών και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ιδιαίτερα ευαίσθητα είναι τα σημεία των συνδέσεων (junction box), όπου η επαφή υγρασίας με τα μεταλλικά σημεία μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση ή ακόμη και ανοιχτό κύκλωμα.

6.6 Προβλήματα στη Δίοδο Bypass

Τα περισσότερα πάνελ διαθέτουν διόδους παράκαμψης (bypass diodes) για την αποφυγή υπερθέρμανσης σε περίπτωση σκίασης ή βλάβης μιας κυψέλης. Εάν οι διόδοι αυτές καταστραφούν ή δυσλειτουργούν, μπορεί να προκληθούν προβλήματα στο ρεύμα που διαρρέει τη σειρά των κυψελών, οδηγώντας είτε σε ολική απενεργοποίηση του πάνελ, είτε σε υπερφόρτιση άλλων κυψελών. Σε σοβαρές περιπτώσεις, η καταστροφή των διόδων μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά σε κλειστά κυκλώματα DC.

6.7 Απώλειες από Γήρανση (Degradation Losses)

Η σταδιακή γήρανση του φωτοβολταϊκού πάνελ, γνωστή ως Potential Induced Degradation (PID) ή Light Induced Degradation (LID), είναι ένα φυσιολογικό φαινόμενο που συνδέεται με τη μακροχρόνια έκθεση στο φως ή με φαινόμενα διαρροής λόγω δυναμικού. Το PID οφείλεται σε ηλεκτρικά πεδία μεταξύ των κυψελών και του πλαισίου, τα οποία οδηγούν σε μετακίνηση ιόντων και εσωτερική αλλοίωση της φωτοηλεκτρικής συμπεριφοράς. Τα πάνελ που δεν διαθέτουν τεχνολογία κατά του PID είναι περισσότερο ευάλωτα σε απώλειες απόδοσης 5%–30% εντός λίγων ετών.

6.8 Επιπτώσεις στην Απόδοση του Συστήματος

Οι παραπάνω βλάβες δεν επηρεάζουν μόνο την αποδοτικότητα των πάνελ, αλλά και τη συνολική σταθερότητα και ενεργειακή επάρκεια του συστήματος. Η μειωμένη παραγωγή οδηγεί σε ανεπαρκή φόρτιση της μπαταρίας, κάτι που μπορεί να επιφέρει πρόωρη εκφόρτιση, περιορισμό της παρεχόμενης ενέργειας και ακόμη και απενεργοποίηση του inverter. Επιπλέον, οι θερμικές βλάβες ενδέχεται να προκαλέσουν ηλεκτρικούς κινδύνους (π.χ. πυρκαγιές) σε απουσία σωστής προστασίας με ασφάλειες ή συστήματα παρακολούθησης.

6.9 Συμπεράσματα

Η γνώση των συχνών βλαβών στα φωτοβολταϊκά πάνελ και η έγκαιρη αντιμετώπισή τους θα οδηγήσουν σε ένα αξιόπιστο και μακροχρόνια λειτουργικό αυτόνομο σύστημα θα οδηγήσουν σε ένα αξιόπιστο και μακροχρόνια λειτουργικό αυτόνομο σύστημα. Ένα πάνελ που υπολειτουργεί λόγω hot spots, ρωγμών ή διάβρωσης μπορεί να επηρεάσει το σύνολο της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Η τεχνική πρόληψη, η σωστή εγκατάσταση, η χρήση αξιόπιστων προϊόντων και η περιοδική επιτήρηση είναι οι βασικά εργαλεία απέναντι στη φθορά.

6.10 Βλάβες MPPT Ρυθμιστή Φόρτισης σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Αίτια, Ενδείξεις και Διαχείριση

Ο MPPT (Maximum Power Point Tracking) ρυθμιστής φόρτισης αποτελεί κύριο εξάρτημα στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, αναλαμβάνοντας τη διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από τα Φ/Β πάνελ και τη μεταφορά της στη μπαταρία αποθήκευσης. Η τεχνολογία MPPT επιτρέπει την προσαρμογή της αντίστασης

φορτίου ώστε το σύστημα να λειτουργεί διαρκώς στο "σημείο μέγιστης ισχύος" της χαρακτηριστικής καμπύλης του Φ/Β, εξασφαλίζοντας τη **μέγιστη δυνατή απόδοση** παραγωγής. Λόγω της συνεχούς του λειτουργίας, των υψηλών τάσεων και ρευμάτων που διαχειρίζεται και της εξάρτησής του από περιβαλλοντικούς και φορτιστικούς παράγοντες, ο MPPT ρυθμιστής υπόκειται σε βλάβες που μπορούν να επηρεάσουν καθοριστικά την ενεργειακή συμπεριφορά και την ασφάλεια του συστήματος.

6.11 Υπερθέρμανση και Θερμικές Βλάβες

Οι MPPT ρυθμιστές περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά ισχύος, όπως μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC converters), που λειτουργούν με υψηλές πυκνότητες ρεύματος και μεταγωγή υψηλών συχνοτήτων. Σε περιπτώσεις κακής ψύξης ή υπερβολικού φορτίου, ενδέχεται να προκύψει υπερθέρμανση των εξαρτημάτων, κυρίως των MOSFET, των διόδων Schottky, και των πηνίων. Εάν η θερμοκρασία υπερβεί τα όρια λειτουργίας, ο ελεγκτής είτε ενεργοποιεί προστασία (thermal shutdown) είτε μπορεί να καταστραφεί. Η συσσωρευμένη θερμική κόπωση μακροπρόθεσμα προκαλεί πτώση της απόδοσης, διακοπές φόρτισης και συχνή επανεκκίνηση του ρυθμιστή. Συχνές αιτίες βλαβών είναι ο κακός εξαερισμός (π.χ. κλειστός πίνακας) που οδηγεί σε υπερθέρμανση, η υπερδιαστασιολόγηση Φ/Β ισχύος οδηγεί σε καταστροφή εξαρτημάτων και σε απώλεια ενέργειας και τέλος σε εσωτερική σκόνη που εμποδίζει την ψύξη.

6.12 Υπερτάσεις στην Είσοδο (PV Input Overvoltage)

Κάθε MPPT ρυθμιστής έχει μια καθορισμένη **μέγιστη είσοδο DC τάσης** (π.χ. 100 V ή 150 V ανάλογα το μοντέλο). Σε περιπτώσεις που η τάση ανοιχτού κυκλώματος των συνδεδεμένων πάνελ υπερβεί αυτό το όριο, για παράδειγμα λόγω:

- υπερβολικού αριθμού πάνελ σε σειρά,
- χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος (που αυξάνει την τάση open-circuit), μπορεί να προκληθεί **καταστροφή των εισόδων** ή του κύριου μετατροπέα, ιδίως αν δεν υπάρχει προστασία με κατάλληλο DC διακόπτη ή ασφάλεια εισόδου.

6.13 Κακή ή Ασταθής Φόρτιση Μπαταρίας

Σε βλάβες που αφορούν τον αλγόριθμο φόρτισης, το MPPT ενδέχεται να μην αναγνωρίζει σωστά την κατάσταση της μπαταρίας (π.χ. επίπεδο τάσης, θερμοκρασία), οδηγώντας σε:

- **Υπερφόρτιση**, που μπορεί να προκαλέσει ζημιά ή παραγωγή επικίνδυνων αναθυμιάσεων από την μπαταρία
- **Ανεπαρκή φόρτιση**, που οδηγεί σε συσσώρευση θειικής επίστρωσης (sulfation) στους συσσωρευτές μολύβδου.
- **Ασταθή εναλλαγή μεταξύ σταδίων** (bulk – absorption – float), λόγω παρεμβολών ή κακής ρύθμισης.

Πιθανές αιτίες:

- Χρήση ακατάλληλου τύπου προφίλ φόρτισης (όχι συμβατό με το είδος της μπαταρίας).
- Ελλιπής ψύξη συστήματος (απουσία αισθητήρα θερμοκρασίας).
- Ελαττωματικοί ακροδέκτες μέτρησης ή διακοπτόμενη σύνδεση.

6.14 Βλάβες Επικοινωνίας (Communication Failure)

Πολλοί σύγχρονοι ρυθμιστές MPPT ενσωματώνουν **συστήματα παρακολούθησης και τηλεμετρίας** μέσω Bluetooth, RS-485 ή VE.Direct για σύνδεση με BMV, inverter ή εφαρμογές κινητού. Η **απώλεια σύνδεσης**, η **λανθασμένη ένδειξη τάσεων ή ρευμάτων**, ή η **ασυμβατότητα firmware** μπορούν να επηρεάσουν:

- Την ενημέρωση για την κατάσταση της μπαταρίας.
- Τη ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας.
- Τον συγχρονισμό με άλλα συστήματα (π.χ. inverter Victron Multiplus).

6.15 Βλάβες Εξαιτίας Λανθασμένης Πολικότητας ή Βραχυκυκλώματος

Η αντίστροφη πολικότητα σύνδεσης είτε των πάνελ είτε της μπαταρίας μπορεί να προκαλέσει άμεση καταστροφή των κυκλωμάτων ισχύος. Αν και οι περισσότεροι MPPT ρυθμιστές διαθέτουν προστασία αντίστροφης πολικότητας, επανειλημμένα

λανθασμένες συνδέσεις οδηγούν στο να καεί η εσωτερική ασφάλεια ή σε μη αναστρέψιμη βλάβη.

Επίσης, εάν παρουσιαστεί βραχυκύκλωμα στην έξοδο προς τη μπαταρία, ενδέχεται να προκληθεί υπερφόρτιση των τρανζίστορ εξόδου, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου απουσιάζει κατάλληλος αυτόματος διακόπτης ή ασφάλεια.

6.16 Απώλειες Απόδοσης ή Δυσλειτουργία MPPT Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος MPPT βασίζεται σε συνεχείς μετρήσεις τάσης και ρεύματος ώστε να μετακινείται το σημείο λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος. Εάν ο αισθητήρας τάσης/ρεύματος είναι ελαττωματικός ή υπάρχει μεγάλο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το σύστημα ενδέχεται να "χάνει" το σημείο λειτουργίας και να λειτουργεί σε χαμηλότερη απόδοση (κατά 5–20% ανάλογα τη συνθήκη). Αυτό είναι κρίσιμο για αυτόνομα συστήματα.

Επιπτώσεις στο Σύστημα και Στρατηγικές Αντιμετώπισης

Η δυσλειτουργία του MPPT ρυθμιστή έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στο αυτόνομο σύστημα:

- **Μη επαρκής φόρτιση της μπαταρίας**, με αποτέλεσμα ενεργειακές ελλείψεις ή διακοπή κατανάλωσης.
- **Καταστροφή μπαταρίας** από υπερφόρτιση ή βαθιά εκφόρτιση λόγω λάθους στον αλγόριθμο.
- **Μη συγχρονισμός με inverter ή BMV**, αν χρησιμοποιείται έξυπνο διαχειριστικό σύστημα.

Συμπεράσματα

Ο MPPT ρυθμιστής αποτελεί έναν από τους πιο τεχνολογικά σύνθετους και ευαίσθητους κρίκους ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η συνδυασμένη διαχείριση ενέργειας, η έξυπνη παρακολούθηση και η αλληλεπίδραση με μπαταρίες και inverter, τον καθιστούν κρίσιμο για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Οι βλάβες του μπορεί να είναι σιωπηρές και να εμφανίζονται μόνο ως σταδιακή απώλεια απόδοσης, γι' αυτό και απαιτείται συστηματική επιτήρηση, προσεκτική ρύθμιση και σωστός σχεδιασμός κατά την εγκατάσταση.

6.17 Πιθανές Βλάβες και Δυσλειτουργίες σε Μπαταρίες Λιθίου

Οι μπαταρίες λιθίου, και ιδιαίτερα οι τεχνολογίες λιθίου-σιδήρου-φωσφορικού (LiFePO_4), αποτελούν σήμερα την κορυφαία επιλογή για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, του μεγάλου αριθμού κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, της χαμηλής αυτοεκφόρτισης και της σχετικής τους ασφάλειας σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες λιθίου. Ωστόσο, παρά τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα, οι μπαταρίες λιθίου δεν είναι απαλλαγμένες από κινδύνους βλαβών, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της απόδοσης, μείωση της διάρκειας ζωής ή, σε ακραίες περιπτώσεις, σε καταστροφή της συσκευής και κινδύνους για την ασφάλεια του συστήματος.

Η πιο συνήθης αιτία πρόωρης αστοχίας των μπαταριών λιθίου είναι η υπερφόρτιση. Αν η τάση σε κάποιο στοιχείο της συστοιχίας ξεπεράσει την ονομαστική μέγιστη επιτρεπτή (συνήθως 3.65 V ανά κελί για LiFePO_4), τότε μπορεί να προκληθεί μόνιμη βλάβη στη χημική δομή της κυψέλης. Η συνεχής υπερφόρτιση προκαλεί ηλεκτρολυτική αποσύνθεση και παραγωγή αερίων, αυξάνοντας την εσωτερική πίεση και οδηγώντας ενδεχομένως σε φούσκωμα και αύξηση θερμοκρασίας. Σε ακραίες περιπτώσεις, η θερμική διαφυγή μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά. Για τον λόγο αυτό, η ύπαρξη ενός αξιόπιστου Battery Management System (BMS) είναι απολύτως απαραίτητη, καθώς προστατεύει τη συστοιχία αποκόπτοντας τη φόρτιση όταν κάποιο κελί πλησιάζει την οριακή του τάση.

Αντίστοιχα, η υπερβολική εκφόρτιση αποτελεί σοβαρό λόγο αστοχίας. Αν η τάση πέσει κάτω από τα 2.5 V/κελί, επέρχεται μη αναστρέψιμη χημική αλλοίωση και δραματική μείωση της χωρητικότητας. Η εκφόρτιση κάτω από την ελάχιστη τιμή έχει ως αποτέλεσμα την αποπυκνωτική αποικοδόμηση της καθόδου, και σε επαναλαμβανόμενους κύκλους μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη αποτυχία της συστοιχίας. Το BMS λειτουργεί και εδώ ως κρίσιμος μηχανισμός διακοπής του φορτίου, προστατεύοντας τα στοιχεία από υπερβολική αποφόρτιση.

Επιπλέον, μία λιγότερο εμφανής αλλά εξαιρετικά σημαντική πηγή βλάβης είναι η θερμοκρασιακή καταπόνηση. Οι μπαταρίες λιθίου είναι ευαίσθητες τόσο σε πολύ υψηλές όσο και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Λειτουργία σε θερμοκρασίες πάνω από 60°C προκαλεί επιταχυνόμενη υποβάθμιση των εσωτερικών στοιχείων και αύξηση της εσωτερικής αντίστασης. Από την άλλη πλευρά, φόρτιση σε θερμοκρασίες

κάτω από 0°C μπορεί να οδηγήσει σε επιμετάλλωση λιθίου στην άνοδο (lithium plating), ένα φαινόμενο που μειώνει δραματικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και αυξάνει τον κίνδυνο βραχυκυκλώματος. Ορισμένα συστήματα ενσωματώνουν θερμαντικά στοιχεία για να επιτρέπουν φόρτιση σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τα πιο εξελιγμένα BMS περιλαμβάνουν θερμικούς αισθητήρες και περιορισμό ρεύματος φόρτισης βάσει θερμοκρασίας.

Ακόμη μία πηγή βλαβών είναι η ανισορροπία των κυψελών (cell imbalance). Καθώς τα κελιά σε μια συστοιχία συνδέονται σε σειρά, η μη ισοκατανομή φόρτισης μπορεί να οδηγήσει στην υπερφόρτιση ή υποφόρτιση κάποιων κελιών, ακόμα κι αν η συνολική τάση της συστοιχίας φαίνεται εντός ορίων. Η χρήση ενός battery balancer αποτελεί απαραίτητο μέτρο σε μεγαλύτερες συστοιχίες, προκειμένου να εξισορροπούνται οι τάσεις μεταξύ των κελιών, ιδιαίτερα κατά την πλήρη φόρτιση. Η έλλειψη εξισορρόπησης με την πάροδο του χρόνου οδηγεί σε υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης της μπαταρίας και επιταχυνόμενη φθορά των πιο ασθενών στοιχείων.

Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται με την ηλικία και τη χρήση, οδηγώντας σε απώλειες ενέργειας, υπερθέρμανση κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση και πτώση τάσης υπό φορτίο. Η παρακολούθηση της κατάστασης υγείας της μπαταρίας επιτρέπει τη διάγνωση αυτών των φαινομένων έγκαιρα, προλαμβάνοντας την αιφνίδια αστοχία.

Τέλος, σημαντικός παράγοντας βλάβης είναι και η φτωχή ποιότητα κατασκευής ή η χρήση ασυμβίβαστων κυψελών εντός μιας συστοιχίας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων που συναρμολογούνται χειροκίνητα ή χωρίς πιστοποίηση, είναι συχνό το φαινόμενο χρήσης στοιχείων με διαφορετική εσωτερική αντίσταση, χωρητικότητα ή κατάσταση φθοράς, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυσλειτουργίες που προκαλούν χρόνιες βλάβες.

Η πρόληψη των παραπάνω προβλημάτων περιλαμβάνει την προσεκτική επιλογή πιστοποιημένων μπαταριών, την εγκατάσταση σε καλά αεριζόμενο περιβάλλον, την αποφυγή υπερβολικών ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης, τη χρήση κατάλληλων ασφαλειών και διακοπών, καθώς και τη συνεχή επιτήρηση μέσω του BMS και συστημάτων παρακολούθησης. Η καλή συντήρηση και η προληπτική αντικατάσταση σε περίπτωση σημαντικής απώλειας χωρητικότητας αποτελούν κύρια μέτρα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του αυτόνομου συστήματος.

6.18 Πιθανές Βλάβες στο Smart Shunt

Ο Smart Shunt αποτελεί έναν κρίσιμο αισθητήρα που μετρά το ρεύμα φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας, παρέχοντας πληροφορίες για την κατανάλωση, την τάση, την κατάσταση φόρτισης και την υπολειπόμενη ενέργεια του συστήματος. Παρά τη σχετικά παθητική του φύση ως όργανο παρακολούθησης, μπορεί να εμφανίσει τις εξής δυσλειτουργίες:

Κακή σύνδεση στον αρνητικό πόλο της μπαταρίας: Ο Smart Shunt πρέπει να είναι το μοναδικό σημείο όπου "γείωνεται" το αρνητικό κύκλωμα. Εάν υπάρξει παράκαμψη ή διπλή σύνδεση στον αρνητικό πόλο, οι μετρήσεις θα είναι εσφαλμένες.

Αστοχία σύνδεσης επικοινωνίας (Bluetooth ή καλωδίου): Η απώλεια σύνδεσης με την κεντρική μονάδα ή την εφαρμογή παρακολούθησης μπορεί να προκαλέσει διακοπή των δεδομένων, μηδενισμό των μετρήσεων ή εσφαλμένο υπολογισμό των παραμέτρων του συστήματος.

Υπέρβαση ονομαστικού ρεύματος: Αν και οι shunt είναι σχεδιασμένοι για συγκεκριμένο εύρος ρεύματος (π.χ. 500A), σε περίπτωση υπέρβασης προκαλείται θερμική καταπόνηση και ενδεχομένως παραμόρφωση του μεταλλικού στοιχείου.

Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές: Λόγω της φύσης του αισθητήρα, η λειτουργία του μπορεί να επηρεαστεί από θόρυβο ή παρεμβολές από γειτονικά ισχυρά ρεύματα ή παλμούς, προκαλώντας σφάλματα στην ακρίβεια.

6.19 Πιθανές Βλάβες στον Inverter (Αντιστροφέας)

Ο inverter αποτελεί το πιο σύνθετο και ενεργό στοιχείο του συστήματος, καθώς μετατρέπει τη συνεχή τάση της μπαταρίας σε εναλλασσόμενη για να τροφοδοτήσει τις καταναλώσεις. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του, υπάρχουν διάφοροι τύποι βλαβών που ενδέχεται να προκύψουν:

Υπερφόρτωση ή υπερθέρμανση: Σε περίπτωση που η ισχύς των καταναλώσεων υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ του inverter, ο μετατροπέας είτε θα διακόψει τη λειτουργία του είτε θα εισέλθει σε κατάσταση προστασίας. Το ίδιο ισχύει όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του ανεβεί επικίνδυνα, κυρίως λόγω ανεπαρκούς εξαερισμού ή περιβαλλοντικών συνθηκών.

Κακή ποιότητα εξόδου AC: Βλάβες στο κύκλωμα ελέγχου της κυματομορφής μπορεί να οδηγήσουν σε κακή ποιότητα σήματος, αρμονικές παραμορφώσεις ή ασταθή συχνότητα, προκαλώντας ασυμβατότητες με τα φορτία.

Βλάβες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων: Οι αντιστροφείς βασίζονται σε τρανζίστορ ισχύος τα οποία υπόκεινται σε φθορά λόγω υπερθέρμανσης ή μεταβατικών φαινομένων. Η καταστροφή αυτών των στοιχείων απαιτεί συχνά αντικατάσταση της μονάδας.

Απώλεια συγχρονισμού ή σφαλμάτων στο firmware: Σε ψηφιακά ελεγχόμενους inverters, σφάλματα στον εσωτερικό κώδικα, σε αισθητήρες ή στην εσωτερική επικοινωνία μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία ή ψευδείς ενδείξεις.

Βραχυκύκλωμα στην έξοδο: Η παρουσία βραχυκυκλώματος στην πλευρά της AC εξόδου μπορεί να προκαλέσει άμεση ενεργοποίηση προστασίας, ή σε σοβαρές περιπτώσεις, βλάβη στα εξαρτήματα ισχύος.

6.20 Ανάλυση Πιθανών Βλαβών στο σύστημα παρακολούθησης και στα Busbars

Η σωστή λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια της παρακολούθησης της ενεργειακής ροής, καθώς και από την ασφαλή μεταφορά υψηλών ρευμάτων μέσω των διασυνδέσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, το σύστημα παρακολούθησης και οι Busbars αποτελούν κρίσιμα υποσυστήματα. Το σύστημα παρακολούθησης προσφέρει τη δυνατότητα καταγραφής κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας και της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ οι Busbars λειτουργούν ως αγωγοί υψηλής αγωγιμότητας για τη διανομή του ρεύματος μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Ωστόσο, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ενδέχεται να παρουσιαστούν τεχνικές δυσλειτουργίες ή και πλήρεις αστοχίες, οι οποίες απαιτούν συστηματική πρόληψη και τεχνική κατανόηση.

Ένα από τα συχνότερα προβλήματα που μπορεί να παρατηρηθεί στο σύστημα παρακολούθησης αφορά την ανακρίβη μέτρηση ρεύματος ή την πλήρη απώλεια επικοινωνίας με το σύστημα διαχείρισης. Η ανακρίβεια αυτή μπορεί να οφείλεται σε κακή σύνδεση των ακροδεκτών, σε ανεπαρκή σύσφιξη του αγωγού στον ακροδέκτη του ελεγκτή ή σε παρουσία οξειδωσης στους συνδέσμους, ιδιαίτερα σε υγρό ή διαβρωτικό περιβάλλον. Ένα ακόμα πιθανό αίτιο είναι η ανεπαρκής γείωση του συστήματος, καθώς ο ελεγκτής απαιτεί σαφή αναφορά στο αρνητικό δυναμικό της

εγκατάστασης για να μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια τη διαφορά δυναμικού και την κατεύθυνση του ρεύματος.

Πέρα από τις φυσικές συνδέσεις, προβλήματα μπορούν να προκύψουν σε επίπεδο λογισμικού. Επιπλέον, η κακή τοποθέτηση του αισθητήρα θερμοκρασίας ή της μέτρησης τάσης αναφοράς μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.

Αναφορικά με τις Busbars, οι οποίες χρησιμεύουν ως αγωγιμες ράβδοι διανομής υψηλών ρευμάτων, οι βλάβες σχετίζονται κυρίως με την υπερφόρτιση, την ανεπαρκή σύσφιξη ακροδεκτών και την υπερθέρμανση. Η μηχανική χαλάρωση των συνδέσεων, είτε λόγω κακής τοποθέτησης είτε λόγω θερμικής διαστολής-συστολής, μπορεί να οδηγήσει σε σημεία αυξημένης αντίστασης, προκαλώντας τοπική θέρμανση. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε λιώσιμο της μόνωσης των καλωδίων που μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιά, ειδικά αν η εγκατάσταση δεν είναι επαρκώς προστατευμένη με ασφάλειες ή αν οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του πίνακα διανομής δεν παρακολουθούνται.

Σημαντικό είναι ότι, σε συνθήκες υψηλού ρεύματος και συνεχούς λειτουργίας, μπορεί να προκύψει και χημική αλλοίωση της επιφάνειας των busbars, ιδίως αν δεν έχουν υποστεί επαρκή αντιδιαβρωτική προστασία. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντίστασης επαφής και συνεπαγόμενες θερμικές απώλειες. Επιπλέον, η κακή επιλογή της διατομής της μπάρας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υπερθέρμανση και παραμόρφωση του αγωγίμου υλικού.

Τέλος, και στα δύο υποσυστήματα ενδέχεται να παρουσιαστούν βλάβες που σχετίζονται με εξωτερικά αίτια, όπως πτώσεις τάσης, υπερτάσεις λόγω αστραπών ή διακοπές στη γείωση του συστήματος. Τέτοιες αιτίες μπορούν να προκαλέσουν είτε την άμεση καταστροφή της ηλεκτρονικής πλακέτας του σύστημα παρακολούθησης είτε φαινόμενα γαλβανικής οξείδωσης στους ακροδέκτες των busbars, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου υπάρχουν επαγόμενα ρεύματα ή διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά μεταξύ των υλικών επαφής.

Συνεπώς, η πρόληψη τέτοιων βλαβών περιλαμβάνει την τακτική επιθεώρηση και συντήρηση των ακροδεκτών, την επιβεβαίωση σωστής ροπής σύσφιξης, την επιλογή σωστών υλικών σύνδεσης με αντιδιαβρωτική προστασία, καθώς και την εφαρμογή κατάλληλων ασφαλειών και αποζευκτικών διακοπών. Η εγκατάσταση επιπλέον

αισθητήρων θερμοκρασίας κοντά στα busbars μπορεί επίσης να παρέχει έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση επικίνδυνης αύξησης θερμοκρασίας. Η σωστή παραμετροποίηση του συστήματος παρακολούθησης και η περιοδική αναβάθμιση του λογισμικού του διασφαλίζουν τη συνέχιση της ορθής λειτουργίας και της αξιοπιστίας μέτρησης της κατάστασης ενέργειας του συστήματος.

Η ολιστική προσέγγιση στην τεχνική παρακολούθηση και πρόληψη βλαβών σε κρίσιμα εξαρτήματα όπως το σύστημα παρακολούθησης και οι busbars αποτελεί προαπαιτούμενο για τη μακροχρόνια αποδοτική και ασφαλή λειτουργία κάθε αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

6.21 Ανάλυση Πιθανών Βλαβών στον Battery Balancer και στον BMV Smart σε Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα η ακριβής παρακολούθηση και διαχείριση της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών λιθίου είναι πολύ σημαντικό. Ο ρόλος του battery balancer είναι να διατηρεί ισορροπημένη την τάση μεταξύ των επιμέρους στοιχείων της μπαταρίας, ενώ η συσκευή BMV Smart εξασφαλίζει την ακριβή μέτρηση της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και άλλων κρίσιμων παραμέτρων της μπαταρίας. Παρότι πρόκειται για ηλεκτρονικές διατάξεις με υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, δεν παύουν να υπόκεινται σε πιθανές αστοχίες ή βλάβες που μπορούν να διαταράξουν τη λειτουργία του συστήματος και να οδηγήσουν σε λανθασμένη φόρτιση, πρόωρη γήρανση των στοιχείων ή ακόμη και κινδύνους ασφάλειας.

Αναφορικά με τον battery balancer, οι κυριότερες πιθανές βλάβες σχετίζονται με την αποτυχία εκτέλεσης της βασικής λειτουργίας του, δηλαδή τη μεταφορά μικρών ποσοτήτων ενέργειας από τα υπερφορτισμένα στοιχεία στα υποφορτισμένα. Η βασική αιτία αυτών των δυσλειτουργιών είναι η αστοχία ανίχνευσης τάσης είτε λόγω αστοχίας των εσωτερικών αισθητήρων είτε λόγω λανθασμένης καλωδίωσης κατά την εγκατάσταση. Σε περιπτώσεις όπου η τάση ενός ή περισσότερων στοιχείων δεν μετριέται με ακρίβεια, το σύστημα εξισορρόπησης δεν ενεργοποιείται σωστά, επιτρέποντας την ύπαρξη ανισοσταθμίας μεταξύ των κυψελών. Η συνεχής λειτουργία του συστήματος υπό τέτοιες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτιση ορισμένων κυψελών και υποφόρτιση άλλων, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας και επιτάχυνση της υποβάθμισης των στοιχείων.

Ένα άλλο σημαντικό ενδεχόμενο σφάλμα είναι η θερμική υπερφόρτωση του balancer, η οποία μπορεί να προκληθεί από παρατεταμένη εξισορρόπηση μεγάλης ισχύος, ιδιαίτερα σε συστοιχίες όπου υπάρχει έντονη ανομοιομορφία μεταξύ των στοιχείων. Η θερμότητα που παράγεται από τους εσωτερικούς μετατροπείς ή τις αντιστάσεις εξισορρόπησης μπορεί να υπερβεί τα όρια ασφαλούς λειτουργίας, ειδικά σε κακή ψύξη ή υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εάν δεν λειτουργήσουν εγκαίρως οι θερμικές προστασίες, ενδέχεται να υπάρξει μόνιμη βλάβη των κυκλωμάτων ελέγχου ή ακόμη και κίνδυνος πυρκαγιάς. Οι σύγχρονοι balancers διαθέτουν θερμικούς αισθητήρες και κυκλώματα αυτόματης απενεργοποίησης, ωστόσο η λειτουργικότητά τους εξαρτάται από την σωστή εγκατάσταση, την καθαρότητα του περιβλήματος και την απουσία σκόνης ή υγρασίας που ενδέχεται να αλλοιώσουν την ακρίβεια μέτρησης.

Μια επίσης σημαντική πηγή προβλημάτων είναι η αστοχία επικοινωνίας του balancer με το Battery Management System (BMS), σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται σε συνεργασία με πιο σύνθετες διατάξεις ελέγχου. Η επικοινωνία βασίζεται συχνά σε πρωτόκολλα όπως το CAN bus, και τυχόν διακοπή ή παρεμβολή στο σήμα μπορεί να απομονώσει τον balancer, καθιστώντας τον ανενεργό ή, ακόμα χειρότερα, να του παρέχει εσφαλμένες εντολές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας ενδέχεται να προχωρήσει σε λανθασμένες ενέργειες, όπως η διακοπή φόρτισης, η παράβλεψη κρίσιμων επιπέδων τάσης ή η αποτυχία ενεργοποίησης προστασιών.

Επίσης, τα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι ικανά να επηρεάσουν τόσο τον battery balancer όσο και τον BMV Smart. Τα συστήματα εξισορρόπησης συχνά βασίζονται σε πολύ χαμηλής έντασης σήματα τάσης για να ανιχνεύσουν διαφορές με ακρίβεια mV, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ευαίσθητα σε θόρυβο από κινητήρες, εναλλάκτες ή άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις. Αν η EMI δεν περιοριστεί μέσω κατάλληλης θωράκισης, το balancer μπορεί να ενεργοποιηθεί εσφαλμένα ή να εμφανίσει συνεχείς διακυμάνσεις στις μετρήσεις, αποτρέποντας τη σταθερή λειτουργία.

Περνώντας στον BMV Smart, αυτός ο μετρητής ενέργειας παρουσιάζει πιθανές δυσλειτουργίες που σχετίζονται κυρίως με την ακρίβεια των μετρήσεων και την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Μία από τις πλέον συνήθεις πηγές σφάλματος είναι η κακή ή ασταθής σύνδεση του συστήματος παρακολούθησης, δηλαδή της αντίστασης

μέτρησης ρεύματος. Το συστήματος παρακολούθησης πρέπει να είναι εγκατεστημένο με απόλυτη ακρίβεια στην αρνητική γραμμή του συστήματος, ώστε να μετρά κάθε ροή ρεύματος προς και από την μπαταρία. Εσφαλμένη ή ατελής εγκατάσταση, χρήση ακατάλληλων καλωδίων ή παρεμβολή από γειωμένες συνδέσεις μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις ρεύματος και ως συνέπεια, σε λάθος εκτίμηση του SoC. Μία τέτοια ανακρίβεια μπορεί να οδηγήσει τον χρήστη στο να θεωρεί ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ στην πραγματικότητα έχει σημαντικά χαμηλότερη φόρτιση, με αποτέλεσμα την πιθανότητα υπερεκφόρτισης και πρόωρης φθοράς.

Ένα άλλο ζήτημα αφορά την εσφαλμένη αρχικοποίηση του μετρητή, ειδικά κατά την πρώτη εγκατάσταση ή μετά από πλήρη αποφόρτιση. Ο BMW Smart πρέπει να παραμετροποιηθεί με ακρίβεια ως προς την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας, την τάση πλήρους φόρτισης, τα όρια αποκοπής και άλλες παραμέτρους. Αν οι τιμές αυτές εισαχθούν λανθασμένα ή δεν πραγματοποιηθεί χειροκίνητη συγχρονισμένη φόρτιση για αναφορά, τότε όλες οι μετρήσεις από το BMW θα είναι λανθασμένες. Αυτό ενδέχεται να οδηγήσει στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων σχετικά με το πότε να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί η μπαταρία, με σοβαρές συνέπειες για τη μακροχρόνια υγεία της.

Πρόσθετα προβλήματα προκαλούνται από σφάλματα επικοινωνίας μέσω Bluetooth ή VE.Direct. Εάν η επικοινωνία χαθεί, ο χρήστης ενδέχεται να μην έχει οπτική επαφή με κρίσιμες παραμέτρους της μπαταρίας, όπως η τάση, το υπόλοιπο ρεύμα ή οι συναγερμοί. Αν και τα προβλήματα αυτά είναι συνήθως προσωρινά, παρατεταμένες διακοπές ενδέχεται να υποκρύπτουν βαθύτερα ζητήματα, όπως παρεμβολές στην μπάντα των 2.4 GHz ή βλάβη στο ενσωματωμένο Bluetooth module.

Συχνές είναι και οι βλάβες λογισμικού ή firmware, όπου οι αναβαθμίσεις του λειτουργικού συστήματος της συσκευής, εάν δεν πραγματοποιηθούν ορθά, μπορεί να προκαλέσουν απώλεια δεδομένων, ασυμβατότητες με άλλες συσκευές ή ακόμη και αδυναμία εκκίνησης της συσκευής. Σε περιπτώσεις κακής εγκατάστασης ή αποτυχημένης αναβάθμισης, απαιτείται είτε επαναφορά στις εργοστασιακές ρυθμίσεις είτε χρήση καλωδίου VE.Direct και PC για χειροκίνητη αποκατάσταση.

Τέλος, και για τις δύο συσκευές παραμένει κρίσιμη η προστασία τους από υγρασία, σκόνη και δονήσεις, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις σε εξωτερικούς ή ημι-υπαίθριους χώρους. Η εισχώρηση υγρασίας μπορεί να αλλοιώσει την απόδοση των κυκλωμάτων

μέτρησης, ενώ η σκόνη μπορεί να επηρεάσει την ψύξη ή να προκαλέσει βραχυκύκλωμα σε εξαρτήματα. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που οι συσκευές δεν είναι σωστά στερεωμένες, οι μηχανικές καταπονήσεις μπορούν να προκαλέσουν θραύση κολλήσεων ή αποσύνδεση καλωδιώσεων.

Συμπερασματικά, τόσο ο battery balancer όσο και ο BMV Smart αποτελούν κρίσιμα υποσυστήματα για τη διατήρηση της υγείας και της απόδοσης των μπαταριών σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Η πρόληψη βλαβών απαιτεί σωστή εγκατάσταση, τακτική συντήρηση, προστασία από περιβαλλοντικούς κινδύνους και παρακολούθηση των λογισμικών και παραμέτρων λειτουργίας. Η αδυναμία λειτουργίας οποιασδήποτε από αυτές τις δύο συσκευές δεν οδηγεί απλώς σε απώλεια παρακολούθησης, αλλά δύναται να επηρεάσει καταλυτικά την απόδοση και την ασφάλεια ολόκληρου του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

6.22 Ανάλυση Γενικών Ηλεκτρικών Σφαλμάτων σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα αποτελούν κρίσιμη τεχνολογική υποδομή για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές χωρίς πρόσβαση στο δίκτυο ή σε εφαρμογές όπου απαιτείται ενεργειακή αυτονομία. Ωστόσο, παρά την τεχνολογική πρόοδο και την αυξημένη αξιοπιστία των επιμέρους υποσυστημάτων, η πιθανότητα εμφάνισης γενικών ηλεκτρικών σφαλμάτων παραμένει σημαντική, ειδικά λόγω των ιδιοτεροτήτων που παρουσιάζει η φύση της συνεχούς ροής ενέργειας (DC), των μετατροπών σε εναλλασσόμενη (AC), καθώς και της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονικών και ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές και φορτιστικές συνθήκες.

Τα γενικά ηλεκτρικά σφάλματα σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορούν να κατανεμηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: σφάλματα αγωγιμότητας και διακοπής κυκλώματος, σφάλματα υπερφόρτισης ή υπερέντασης, σφάλματα γείωσης και διαρροών, και τέλος σφάλματα θέρμανσης και φθοράς μονώσεων. Καθεμία από αυτές τις κατηγορίες συνδέεται με διαφορετικά αίτια, συνέπειες και μεθόδους πρόληψης ή αποκατάστασης.

Η πλέον συνηθισμένη μορφή γενικού ηλεκτρικού σφάλματος είναι το σφάλμα διακοπής γραμμής ή ανοιχτού κυκλώματος. Πρόκειται για κατάσταση κατά την οποία η ροή του ρεύματος διακόπτεται λόγω ασυνέχειας σε κάποιο σημείο του αγωγού, είτε εξαιτίας

μηχανικής βλάβης του καλωδίου είτε εξαιτίας αστοχίας συνδεσμολογίας, π.χ. σε κάποιο βιδωτό τερματικό ή ακροδέκτη. Οι διακοπές αυτές μπορούν να προκληθούν από χαλαρή σύνδεση, διάβρωση στους πόλους, θερμική διαστολή και συστολή ή και σφάλματα εγκατάστασης (π.χ. ανεπαρκές σφίξιμο των καλωδίων). Η μη ύπαρξη ροής ρεύματος οδηγεί στη διακοπή της φόρτισης της μπαταρίας ή της τροφοδοσίας φορτίων και ενδέχεται να προκαλέσει ψευδώς αρνητικές ενδείξεις σε αισθητήρες και ελεγκτές.

Μια άλλη μορφή σοβαρού ηλεκτρικού σφάλματος είναι η υπερένταση, η οποία συνήθως εμφανίζεται όταν το σύστημα λειτουργεί υπό συνθήκες υπερφόρτωσης ή βραχυκυκλώματος. Το βραχυκύκλωμα μπορεί να προκύψει από άμεση επαφή θετικού και αρνητικού πόλου, εντός καλωδίωσης ή σε κάποιο ενεργό εξάρτημα, προκαλώντας στιγμιαία ροή ρεύματος πολλαπλάσια της ονομαστικής. Ειδικά σε DC κυκλώματα, όπου το ρεύμα δεν μηδενίζεται κυκλικά όπως στα AC, οι συνέπειες είναι πιο καταστροφικές και περιλαμβάνουν έντονη παραγωγή θερμότητας, τήξη μονώσεων, τοπική ανάφλεξη ή και πλήρη καταστροφή εξοπλισμού. Οι προστασίες με ασφάλειες και διακόπτες υπερέντασης είναι σημαντικοί σε αυτά τα σημεία, ώστε να επιτυγχάνεται ταχεία απομόνωση της βλάβης.

Ένα εξίσου επικίνδυνο και υποτιμημένο σφάλμα είναι το σφάλμα γείωσης, το οποίο προκύπτει όταν μια αγώγιμη επιφάνεια ή μέρος του συστήματος συνδεθεί κατά λάθος με τη γη μέσω μη προβλεπόμενου αγωγού. Για παράδειγμα, αν το περίβλημα του inverter ή της μπαταρίας εμφανίσει επαφή με τον αγωγό επιστροφής του ρεύματος (αρνητικό πόλο), τότε δημιουργείται παρασιτικό ρεύμα γείωσης, το οποίο προκαλεί συνεχή κυκλοφορία ρεύματος μέσω του σασί και ενδέχεται να περάσει από ευαίσθητα κυκλώματα ελέγχου, οδηγώντας σε δυσλειτουργία ή ακόμα και ολική καταστροφή του εξοπλισμού. Επιπλέον, δημιουργείται σημαντικός κίνδυνος ηλεκτροπληξίας για τους χειριστές του συστήματος. Οι συνθήκες αυτές εντοπίζονται δύσκολα χωρίς εξειδικευμένα όργανα, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της σωστής γείωσης, τόσο λειτουργικής όσο και προστατευτικής.

Σημαντικό αίτιο πολλών ηλεκτρικών σφαλμάτων είναι και η θερμική υπερφόρτιση, είτε τοπικά στα καλώδια είτε στις ηλεκτρικές επαφές. Αυτή προκύπτει από υπερβολικά φορτία, κακή διαστασιολόγηση καλωδίων, χαλαρές συνδέσεις ή παρατεταμένη λειτουργία εξαρτημάτων στο άνω άκρο της θερμικής τους ανοχής. Η τοπική υπερθέρμανση οδηγεί σε σταδιακή αλλοίωση της μόνωσης, αύξηση της ωμικής

αντίστασης, δημιουργία θερμών σημείων (hotspots) και τελικά πλήρη διακοπή της αγωγιμότητας. Σε πολλές περιπτώσεις, τέτοιου είδους σφάλματα εκδηλώνονται αρχικά με μικρές πτώσεις τάσης ή αυξημένη κατανάλωση χωρίς εμφανή λόγο, γεγονός που δυσχεραίνει την έγκαιρη διάγνυσή τους. Η χρήση θερμοκάμερας και περιοδικών ελέγχων σε κρίσιμα σημεία κρίνεται απαραίτητη για την πρόληψη αντίστοιχων καταστάσεων.

Γενικά ηλεκτρικά σφάλματα συνήθως οφείλονται και σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η υγρασία, η σκόνη, η UV ακτινοβολία και η θερμοκρασιακή καταπόνηση επιδρούν μακροπρόθεσμα στη δομή των μονώσεων, τη στεγανότητα των ακροδεκτών και την αγωγιμότητα των μεταλλικών επαφών. Η είσοδος νερού σε ηλεκτρικό κιβώτιο ή οι ρωγμές σε ένα σύνδεσμο τύπου MC4 μπορεί να οδηγήσουν σε μικρο-εκκενώσεις, διάβρωση και τελικά αστοχία λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, τα σημεία σύνδεσης πρέπει να φέρουν υψηλό δείκτη προστασίας (π.χ. IP65 ή IP67), ενώ συνιστάται η χρήση στεγανοποιητικών υλικών και προστατευτικών σωλήνων σε εκτεθειμένες καλωδιώσεις.

Οι συνέπειες των γενικών ηλεκτρικών σφαλμάτων δεν περιορίζονται στην απλή διακοπή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια σημαντικού εξοπλισμού, μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, απορύθμιση των αισθητήρων ή του BMS, και σε ακραίες περιπτώσεις, πρόκληση πυρκαγιάς. Από την άλλη, η παρουσία διαγνωστικών εργαλείων όπως έξυπνοι αισθητήρες, ασφάλειες ταχείας απόκρισης, θερμικοί διακόπτες και η σωστή γείωση μπορούν να συμβάλουν αποφασιστικά στην έγκαιρη πρόληψη τέτοιων σφαλμάτων.

Συμπερασματικά, τα γενικά ηλεκτρικά σφάλματα σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα δεν είναι ούτε σπάνια ούτε αμελητέα. Η φύση τους είναι συχνά σταδιακή και εξελισσόμενη, γεγονός που απαιτεί σωστό σχεδιασμό, τακτική συντήρηση και επιλογή κατάλληλων υλικών. Η αποφυγή τους συνιστά αποτέλεσμα σύνθετης ηλεκτρολογικής μελέτης, συνδυασμού καλής πρακτικής εγκατάστασης, και συνεχούς επιτήρησης του συστήματος με σύγχρονα μέσα παρακολούθησης και αυτοματισμού. Η μακροχρόνια απόδοση και η ασφάλεια ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος εξαρτώνται από την ικανότητα του σχεδιαστή και του συντηρητή να διαχειρίζονται προληπτικά και αποδοτικά κάθε πιθανό ηλεκτρικό σφάλμα.

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση Γενικών Ηλεκτρικών Σφαλμάτων σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τύπος Σφάλματος	Πιθανά Αίτια	Ενδείξεις / Συμπτώματα	Πιθανές Συνέπειες
Ανοιχτό Κύκλωμα	Μηχανική αποσύνδεση, φθορά καλωδίων, διάβρωση ακροδεκτών, αστοχία ακροδεκτών	Μηδενικό ρεύμα, μηδενική φόρτιση, απώλεια λειτουργίας inverter ή ρυθμιστή	Διακοπή φόρτισης, παύση λειτουργίας συστήματος, λανθασμένα σφάλματα στον ελεγκτή
Βραχυκύκλωμα	Κακή συνδεσμολογία, καταστροφή μόνωσης, επαφή αγωγών, αστοχία εξαρτήματος	Ξαφνική πτώση τάσης, υψηλό ρεύμα, καπνός, ενεργοποίηση προστασίας	Πυρκαγιά, καταστροφή εξοπλισμού, τήξη αγωγών ή busbars
Υπερένταση / Υπερφόρτιση	Υπερβολικά φορτία, εσφαλμένη διαστασιολόγηση, σφάλμα inverter	Αύξηση θερμοκρασίας, πτώση τάσης, έντονος θόρυβος λειτουργίας	Υπερθέρμανση συσκευών, μείωση ζωής μπαταρίας, διακοπή λειτουργίας
Σφάλμα Γείωσης	Ελλιπή ή ελαττωματική γείωση, επαφή DC καλωδίου με μεταλλικό περίβλημα, εισροή υγρασίας	Διαρροή ρεύματος, ψευδή σφάλματα BMS, δυσλειτουργία inverter	Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας, καταστροφή inverter, ηλεκτρική αστάθεια
Υπέρβαση θερμοκρασίας / Μόνωσης	Φθορά μόνωσης, υπερβολικό ρεύμα, κακής ποιότητας καλώδια	Θερμά σημεία στις συνδέσεις, μυρωδιά καμένου, καπνός, μείωση απόδοσης	Πυρκαγιά, υποβάθμιση εξοπλισμού, απώλεια ενεργειακής αποδοτικότητας
Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές	Μη θωρακισμένα καλώδια, απότομες μεταβολές τάσης, λειτουργία	Αστάθεια στις επικοινωνίες, σφάλματα στο monitoring,	Απώλεια τηλεμετρίας, εσφαλμένη λήψη απόφασης από τον ελεγκτή,

	inverter υψηλής συχνότητας	αποσύνδεση BMV ή BMS	ανεξήγητες διακοπές inverter
--	-------------------------------	-------------------------	---------------------------------

Κεφάλαιο 7ο

Παρακολούθηση και συντήρηση

7.1 Παρακολούθηση και Συντήρηση του Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Η λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα και απαιτεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο παρακολούθησης και τεχνικής συντήρησης, τόσο σε επίπεδο πρόληψης όσο και σε επίπεδο επέμβασης. Η φύση της αυτονομίας του συστήματος, δηλαδή η απουσία σύνδεσης με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, σημαίνει ότι κάθε στοιχείο της εγκατάστασης οφείλει να λειτουργεί απρόσκοπτα, διότι οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να οδηγήσει άμεσα σε ενεργειακή ανεπάρκεια. Η διασφάλιση της αξιοπιστίας και της απόδοσης του συστήματος προϋποθέτει την εφαρμογή ενός αυστηρά τεκμηριωμένου πλάνου παρακολούθησης, ελέγχων και συντήρησης, το οποίο οφείλει να εφαρμόζεται μεθοδικά από εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό.

Η παρακολούθηση του συστήματος βασίζεται στη συνεχή συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων από κρίσιμα υποσυστήματα, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ρυθμιστές φόρτισης, οι μετατροπείς ισχύος, οι συσσωρευτές και τα μέσα καταγραφής. Οι σύγχρονες Φ/Β εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν πλέον έξυπνα στοιχεία παρακολούθησης, τους MPPT ρυθμιστές φόρτισης, αλλά και ειδικούς έξυπνους ενεργειακούς μετρητές και αισθητήρες θερμοκρασίας και ρεύματος.

Η παρακολούθηση πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο μέσω εφαρμογών λογισμικού και απομακρυσμένων διεπαφών που επιτρέπει τον πλήρη τηλεέλεγχο των συσκευών, την παραμετροποίηση και την ανάλυση της λειτουργίας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται περιλαμβάνουν ενδεικτικά την κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC), την ημερήσια παραγωγή ενέργειας, την κατανάλωση φορτίων, τη θερμοκρασία

των μπαταριών, την ισορροπία μεταξύ των κυψελών, τις στιγμιαίες εντάσεις και τάσεις, καθώς και προειδοποιήσεις για πιθανές βλάβες ή μη κανονικές καταστάσεις.

Η σωστή ερμηνεία των παραπάνω δεδομένων αποτελεί ουσιώδη προϋπόθεση για την αποτροπή βλαβών και την έγκαιρη λήψη διορθωτικών μέτρων. Για παράδειγμα, μια σταδιακή μείωση της τάσης εξόδου του inverter, ή μια απότομη πτώση της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά, μπορεί να είναι ένδειξη αποσύνδεσης, υπερθέρμανσης ή ακόμη και μερικής σκίασης, ζητήματα τα οποία χρήζουν άμεσης τεχνικής διερεύνησης.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας λιθίου, η οποία αποτελεί το πιο ευπαθές και συνάμα το πιο κοστοβόρο υποσύστημα. Μέσω της χρήσης battery monitor και του Battery Management System (BMS), καταγράφεται η ενεργειακή κατάσταση των κυψελών, η θερμική τους ισορροπία, η ύπαρξη ή όχι υπερφόρτισης, υπερεκφόρτισης ή σημαντικής διαφοράς δυναμικού μεταξύ κυψελών. Η παραμέληση της παρακολούθησης της μπαταρίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της ζωής της ή ακόμα και σε κινδύνους πυρκαγιάς ή εκρήξεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις λανθασμένης χρήσης ή θερμικής υπερφόρτωσης.

Η προληπτική συντήρηση ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος οργανώνεται με βάση προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως ανά εξάμηνο ή έτος) και περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, προτεραιότητα δίνεται στον καθαρισμό των επιφανειών με απιονισμένο νερό και μαλακά υλικά, ώστε να απομακρυνθούν ακαθαρσίες, σκόνη ή οργανικά υπολείμματα που μειώνουν τον συντελεστή απόδοσης. Οπτικός έλεγχος απαιτείται για εντοπισμό ρωγμών, delamination ή φθοράς των βυσμάτων.

Σε ό,τι αφορά τους MPPT ρυθμιστές, εξετάζεται η θερμοκρασία λειτουργίας, η τάση εισόδου από τα πάνελ, οι καταγεγραμμένες υπερτάσεις ή υπερεντάσεις, καθώς και η ύπαρξη επικαιροποιημένου λογισμικού. Παρόμοια μέτρα λαμβάνονται για τον inverter, όπου αξιολογείται η συχνότητα εξόδου, η αρμονική παραμόρφωση (THD), η κατάσταση των ανεμιστήρων και η παρουσία αστοχιών από υπερφόρτωση.

Η συντήρηση των μπαταριών λιθίου δεν αφορά μόνο τον έλεγχο των κυψελών αλλά και την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του battery balancer, που διασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ των στοιχείων. Η ύπαρξη κυψελών με μεγάλη απόκλιση τάσης υποδηλώνει πιθανό πρόβλημα στην ισοστάθμιση και απαιτεί επανεξισορρόπηση ή αντικατάσταση. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου πρέπει να διατηρείται εντός

των βέλτιστων ορίων, ενώ ο εξαερισμός του κιβωτίου μπαταριών οφείλει να είναι επαρκής.

Ένα εξίσου σημαντικό κομμάτι της συντήρησης είναι η φροντίδα για την ακεραιότητα των ηλεκτρικών συνδέσεων. Οι ακροδέκτες στους busbars πρέπει να ελέγχονται για σύσφιξη, καθώς οι χαλαρές συνδέσεις οδηγούν σε θερμικά φαινόμενα, απώλειες και πιθανές βλάβες. Η παρουσία οξειδώσεων ή διάβρωσης ενδέχεται να επηρεάσει σοβαρά τη λειτουργία, ειδικά σε υπαίθριες εγκαταστάσεις.

Η επανορθωτική συντήρηση, δηλαδή η συντήρηση που ενεργοποιείται εκ των υστέρων, πραγματοποιείται μετά την εμφάνιση κάποιας δυσλειτουργίας ή σφάλματος, το οποίο έχει ανιχνευθεί από το σύστημα παρακολούθησης. Τα συχνότερα σφάλματα περιλαμβάνουν την αποσύνδεση του inverter από το φορτίο, την αδυναμία φόρτισης της μπαταρίας, τη διακοπή λειτουργίας των MPPT λόγω θερμικής υπερφόρτωσης, και την καταγραφή σφαλμάτων από τον BMV που υποδηλώνουν εσωτερική αστοχία της μπαταρίας ή έλλειψη ισοστάθμισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι τεχνικοί καλούνται να προβούν είτε σε επανεκκίνηση του συστήματος, είτε σε αντικατάσταση εξαρτημάτων, είτε σε τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας.

Η διατήρηση ιστορικού δεδομένων λειτουργίας είναι επίσης κρίσιμη για να μπορούν να αναλυθούν τάσεις απόδοσης, να αναγνωριστούν μακροχρόνιες πτώσεις στην παραγωγικότητα, και να σχεδιαστούν βελτιώσεις στο σύστημα, όπως η προσθήκη νέων στοιχείων ή η αλλαγή στρατηγικών αποθήκευσης.

Ολοκληρώνοντας, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η παρακολούθηση και η συντήρηση δεν αποτελούν απλώς βοηθητικές εργασίες αλλά θεμελιώδεις διαδικασίες για τη διατήρηση της ενεργειακής αυτονομίας. Η συστηματική εφαρμογή ενός προγράμματος τεχνικής διαχείρισης καθιστά το αυτόνομο Φ/Β σύστημα όχι μόνο λειτουργικό, αλλά και οικονομικά αποδοτικό, περιβαλλοντικά ασφαλές και βιώσιμο στο χρόνο. Η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, η συνεχής τεχνική εκπαίδευση των χειριστών και η προσαρμοστικότητα του πλάνου συντήρησης στις εκάστοτε ανάγκες είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία και την ανθεκτικότητα της εγκατάστασης.

7.2 Πράξεις Συντήρησης, Υλικά και Εργαλεία Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Η συντήρηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελεί κύριο τμήμα της μακροχρόνιας λειτουργικότητας και αξιοπιστίας του. Η συντήρηση διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: προληπτική, η οποία εκτελείται τακτικά ώστε να προλαμβάνονται φθορές και απώλειες απόδοσης, και διορθωτική, η οποία πραγματοποιείται σε περιπτώσεις βλαβών ή δυσλειτουργιών. Για την αποτελεσματική συντήρηση απαιτείται όχι μόνο τεχνική κατάρτιση, αλλά και χρήση εξειδικευμένων εργαλείων και κατάλληλων υλικών ανά υποσύστημα.

Κατά την προληπτική συντήρηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η βασική πράξη περιλαμβάνει τον επιφανειακό καθαρισμό τους από σκόνη, περιττώματα πτηνών, γύρη, λάσπη ή άλλους ρύπους που μειώνουν την απόδοση μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο καθαρισμός γίνεται με χρήση απιονισμένου ή αποσταγμένου νερού και, όταν απαιτείται, με ουδέτερο μη διαβρωτικό καθαριστικό. Χρησιμοποιούνται μαλακές τηλεσκοπικές βούρτσες και λαστιχένιες σπάτουλες για απομάκρυνση υπολειμμάτων και υγρασίας. Το έργο αυτό μπορεί να υποστηριχθεί από αντλία χαμηλής πίεσης, ενώ είναι απαραίτητη η χρήση προστατευτικών γαντιών και γυαλιών για την αποφυγή ατυχημάτων.

Η ηλεκτρική συντήρηση περιλαμβάνει ενδελεχή έλεγχο των συνδέσεων, όπως είναι οι busbars, τα καλώδια και οι ακροδέκτες. Οι πράξεις αυτές επικεντρώνονται στη διασφάλιση της αγωγίμης συνέχειας και της μη ύπαρξης οξειδώσεων ή χαλαρών συνδέσεων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται σύσφιξη ακροδεκτών με κατσαβίδι ή ροπόκλειδο, καθαρισμός των επαφών με ηλεκτροκαθαριστικό σπρέι και μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης των συνδέσεων μέσω πολύμετρου. Σε περιπτώσεις προληπτικού εντοπισμού θερμικών ανωμαλιών, αξιοποιείται θερμική κάμερα υπερύθρων για τον εντοπισμό σημείων υπερθέρμανσης, που συνήθως υποδεικνύουν κακές επαφές ή υπερφορτισμένα σημεία.

Η συντήρηση του inverter και του MPPT ρυθμιστή φόρτισης περιλαμβάνει τόσο φυσικό όσο και λογισμικό έλεγχο. Πραγματοποιείται καθαρισμός των ψυκτρών και των αεραγωγών τους με χρήση πεπιεσμένου αέρα ή ειδικών βουρτσών, ενώ γίνεται και έλεγχος της θερμοκρασίας λειτουργίας με θερμόμετρο υπερύθρων ή laser. Παράλληλα, πραγματοποιείται διαγνωστικός έλεγχος μέσω σύνδεσης με υπολογιστή ή κινητό τηλέφωνο. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να γίνει και αναβάθμιση του firmware,

εφόσον ο κατασκευαστής έχει διαθέσει νεότερες εκδόσεις. Επιπλέον, γίνεται μελέτη των ιστορικών δεδομένων και των τυχόν καταγεγραμμένων σφαλμάτων με σκοπό την πρόληψη μελλοντικών αστοχιών.

Όσον αφορά τις μπαταρίες λιθίου, απαιτείται λεπτομερής έλεγχος τόσο των φυσικών όσο και των ηλεκτρονικών παραμέτρων τους. Εξετάζεται η τάση κάθε κυψέλης ξεχωριστά για ανισορροπίες, ελέγχεται η θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων και γίνεται επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος Battery Management System (BMS). Παράλληλα, ελέγχεται και το battery balancer, εφόσον είναι παρόν, ώστε να διαπιστωθεί ότι επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση των κυψελών και η αποφυγή υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης. Χρησιμοποιούνται εργαλεία όπως το πολύμετρο, clamp meter, εφαρμογές Bluetooth για απομακρυσμένο έλεγχο και, όπου κριθεί απαραίτητο, εξειδικευμένος φορτιστής αναγέννησης ή συντήρησης.

Το σύστημα παρακολούθησης και τηλεμετρίας, και το απομακρυσμένο σύστημα παρακολούθησης, ελέγχεται ως προς την αδιάλειπτη λειτουργία του και την επαρκή καταγραφή δεδομένων. Πραγματοποιείται έλεγχος της επικοινωνίας μέσω WiFi ή GSM, επαλήθευση της μετάδοσης δεδομένων και επαναρύθμιση των μονάδων όπου κρίνεται απαραίτητο. Επιπλέον, επιθεωρείται το λογισμικό για αναβαθμίσεις ή ανακολουθίες στις μετρήσεις κατανάλωσης και παραγωγής.

Σε τακτικά διαστήματα εκτελείται και δοκιμή υπό φορτίο. Εφαρμόζεται δηλαδή ένα προσομοιωμένο φορτίο είτε με φυσικούς καταναλωτές είτε με τεχνητό φορτίο, ώστε να διαπιστωθεί η απόκριση του inverter, του ρυθμιστή φόρτισης και της μπαταρίας υπό κανονικές ή αυξημένες συνθήκες κατανάλωσης. Τα δεδομένα καταγράφονται και αξιολογούνται συγκριτικά με τις ονομαστικές τιμές απόδοσης.

Τέλος, γίνεται γενικός οπτικός έλεγχος της εγκατάστασης. Εξετάζεται η φυσική κατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των στηριγμάτων, των μονώσεων και της γείωσης. Εντοπίζονται ενδεχόμενες διεισδύσεις υγρασίας σε ηλεκτρικούς πίνακες ή καλωδιοδιαδρομές, και ελέγχεται η παρουσία τρωκτικών, εντόμων ή άλλων παραγόντων που μπορούν να προκαλέσουν μακροχρόνιες βλάβες. Για τις λεπτομερείς αυτές επιθεωρήσεις μπορεί να αξιοποιηθεί ενδοσκοπική κάμερα για πρόσβαση σε δυσπρόσιτα σημεία.

Συνολικά, η συντήρηση του συστήματος απαιτεί συνδυασμό μηχανικών και ηλεκτρονικών επεμβάσεων, με χρήση σύγχρονων εργαλείων και μέσων διάγνωσης. Η

καταγραφή όλων των ενεργειών στο τεχνικό ημερολόγιο της εγκατάστασης είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ιστορικού λειτουργίας, την αξιολόγηση της φθοράς με την πάροδο του χρόνου, και τη διατήρηση της ασφάλειας και ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης. Ο συντηρητής οφείλει να έχει πρόσβαση στις αρχικές προδιαγραφές του συστήματος, στα εγχειρίδια των κατασκευαστών, καθώς και στις επίσημες οδηγίες ασφαλείας, διασφαλίζοντας ότι κάθε ενέργεια συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των κατασκευαστών και τα πρότυπα του συστήματος.

Κεφάλαιο 8°

Μέτρα προστασίας και ασφαλιστικά

8.1 Ασφάλεια της Ηλεκτρολογικής εγκατάστασης

Η ενεργειακή αυτονόμηση μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων και αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση για ιδιοκτήτες κατοικιών που επιδιώκουν ανεξαρτησία από το δίκτυο ηλεκτροδότησης και ταυτόχρονα θέλουν να μειώσουν το οικολογικό τους αποτύπωμα. Ωστόσο, η εφαρμογή ενός αυτόνομου ενεργειακού συστήματος απαιτεί αυστηρή συμμόρφωση με κανόνες ασφαλείας, τόσο για την αποτροπή κινδύνων όσο και για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας και απρόσκοπτης λειτουργίας του εξοπλισμού. Τα μέτρα ασφαλείας καλύπτουν το σύνολο της εγκατάστασης, από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τον μετατροπέα ρεύματος (inverter), μέχρι τις μπαταρίες αποθήκευσης και το ηλεκτρικό δίκτυο του σπιτιού.

Η ασφάλεια των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων είναι πρωταρχικής σημασίας σε κάθε αυτόνομο σύστημα. Η πλευρά του συνεχούς ρεύματος, που περιλαμβάνει τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τις συνδέσεις και την είσοδο στον inverter, πρέπει να είναι προστατευμένη με ασφαλειοδιακόπτες ειδικούς για DC εφαρμογές. Αυτοί οι διακόπτες λειτουργούν ως προστατευτικά απέναντι σε βραχυκυκλώματα ή υπερφορτίσεων που μπορεί να προκαλέσουν ακόμη και φωτιά. Από την πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος, δηλαδή μετά τον inverter και προς το οικιακό δίκτυο, επίσης απαιτούνται ασφαλειοδιακόπτες κατάλληλης διατομής. Επιπλέον, πρέπει να τοποθετείται διακόπτης διαρροής (RCD) για την προστασία από ηλεκτροπληξία, ειδικά σε περιπτώσεις που κάποιο άτομο έρθει σε επαφή με αγωγίμο μέρος που έχει αποκτήσει ηλεκτρικό φορτίο. Όλα τα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης, όπως οι βάσεις των

πάνελ και οι πίνακες διανομής, πρέπει να είναι σωστά γειωμένα, ώστε να εκφορτίζεται άμεσα οποιαδήποτε τάση διαρροής.

8.2 Προστασία από υπερτάσεις

Ένα σημαντικό στοιχείο της ασφάλειας αποτελεί και η προστασία από υπερτάσεις, οι οποίες μπορεί να προκύψουν από ηλεκτρολογικές αστοχίες ή ακόμα και από κεραυνούς. Για τον σκοπό αυτό εγκαθίστανται συσκευές προστασίας από υπέρταση τόσο στην πλευρά του DC όσο και στην πλευρά του AC. Οι συσκευές αυτές εμποδίζουν την μεταφορά επικίνδυνων τάσεων (π.χ. ρεύμα από κεραυνό ή απότομες μεταβολές τάσης) προς τον εξοπλισμό. Σε περιοχές με έντονη κεραυνική δραστηριότητα είναι απαραίτητο να τοποθετείται και εξωτερικό αλεξικέραυνο στην οροφή, το οποίο διοχετεύει με ασφάλεια την ενέργεια του κεραυνού στη γείωση.

Η επιλογή καλωδίων και η σωστή εγκατάστασή τους είναι εξίσου κρίσιμη για την ασφάλεια. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τα φωτοβολταϊκά πρέπει να είναι ειδικά κατασκευασμένα για εξωτερική χρήση, με αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, στις καιρικές συνθήκες και στη θερμότητα. Οι διατομές των αγωγών πρέπει να έχουν υπολογιστεί προσεκτικά βάσει της έντασης του ρεύματος και του μήκους του κυκλώματος, ώστε να αποφεύγονται υπερθέρμανση ή απώλειες ενέργειας. Οι συνδέσεις πρέπει να είναι στεγανές, μονωμένες και κατά προτίμηση με τα κατάλληλα εξαρτήματα που διαθέτουν πιστοποιήσεις ασφαλείας. Τα καλώδια πρέπει να προστατεύονται από μηχανικές φθορές, υγρασία και κατοικίδια ζώα μέσω κατάλληλων σωληνώσεων και διαδρομών.

8.3 Προστασία των συσσωρευτών

Η αποθήκευση ενέργειας μέσω μπαταριών είναι από τα πιο ευαίσθητα σημεία του συστήματος. Οι μπαταρίες, είτε πρόκειται για τεχνολογία μολύβδου-οξέος είτε για ιόντων λιθίου, πρέπει να τοποθετούνται σε ειδικό χώρο, κατά προτίμηση εκτός των κύριων χώρων διαβίωσης. Ο χώρος αυτός πρέπει να αερίζεται καλά για την αποφυγή συγκέντρωσης αερίων, ιδίως αν χρησιμοποιούνται μπαταρίες μολύβδου, και να μην έχει υγρασία ή υπερβολική θερμότητα. Η ύπαρξη συστήματος πυρασφάλειας είναι απαραίτητη, με κατάλληλους πυροσβεστήρες για ηλεκτρικές φωτιές, όπως αυτοί με διοξείδιο του άνθρακα ή ξηρά σκόνη. Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος συνίσταται η χρήση αυτόματου συστήματος πυρόσβεσης στον χώρο των μπαταριών.

Απαραίτητη είναι επίσης η παρουσία συστήματος διαχείρισης μπαταριών, γνωστού ως BMS (Battery Management System), ειδικά όταν χρησιμοποιούνται μπαταρίες λιθίου. Το BMS προστατεύει τις μπαταρίες από υπερφόρτιση, βαθιά εκφόρτιση, υπερθέρμανση ή ψύξη κάτω από το όριο ασφαλείας. Χωρίς αυτό, υπάρχει υψηλός κίνδυνος αστοχίας, ακόμα και ανάφλεξης. Το BMS διασφαλίζει επίσης τη σωστή ισορροπία φόρτισης ανάμεσα στα επιμέρους στοιχεία κάθε συστοιχίας, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής και τη λειτουργική απόδοση των μπαταριών.

Σήμερα, η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης όλων των κρίσιμων στοιχείων του φωτοβολταϊκού συστήματος και της αποθήκευσης ενέργειας μέσω εφαρμογών και οθονών. Ο χρήστης μπορεί να έχει εικόνα της παραγόμενης ενέργειας, της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών, της κατανάλωσης και πιθανών σφαλμάτων. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα ειδοποιήσεων είναι απαραίτητο για να ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο για οποιαδήποτε δυσλειτουργία, όπως υψηλή θερμοκρασία, απότομη πτώση τάσης ή προβλήματα στο inverter. Αυτή η δυνατότητα καθιστά τον έλεγχο πιο άμεσο και αποτρέπει μεγαλύτερες βλάβες.

8.4 Υποχρεώσεις και πιστοποιήσεις

Η συμμόρφωση με τα ισχύοντα πρότυπα και κανονισμούς είναι θεμελιώδης υποχρέωση. Όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι πιστοποιημένος σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η ποιότητα. Η εγκατάσταση του συστήματος πρέπει να πραγματοποιείται αποκλειστικά από εξειδικευμένο τεχνικό ή μηχανικό με σχετική πιστοποίηση στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και γνώση του Κανονισμού Ηλεκτρολογικών Εγκαταστάσεων.

Εξίσου σημαντική είναι η σήμανση των διαφόρων σημείων του συστήματος. Οι ηλεκτρολογικοί πίνακες, ο inverter και ο χώρος αποθήκευσης μπαταριών πρέπει να φέρουν ευδιάκριτες προειδοποιήσεις υψηλής τάσης και οδηγίες ασφαλούς αποσύνδεσης. Αυτό βοηθά όχι μόνο τους κατοίκους αλλά και τυχόν τεχνικούς που θα παρέμβουν σε περιπτώσεις συντήρησης ή έκτακτης ανάγκης.

Τέλος, ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα απαιτεί τακτική συντήρηση και επιθεώρηση. Ο οπτικός έλεγχος των καλωδιώσεων, η καθαριότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ για την αποφυγή απωλειών, ο έλεγχος του BMS και του inverter, καθώς και η επιθεώρηση

του χώρου μπαταριών, είναι διαδικασίες που πρέπει να επαναλαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η συντήρηση των πυροσβεστήρων, η ενημέρωση των λογισμικών και η επικαιροποίηση των εγχειριδίων λειτουργίας συμπληρώνουν μια ολοκληρωμένη πολιτική ασφάλειας.

Συμπερασματικά, η ενεργειακή αυτονομία δεν προσφέρει μόνο οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά ενισχύει και την ανεξαρτησία του ατόμου ή της οικογένειας. Ωστόσο, απαιτεί υπευθυνότητα, σοβαρό σχεδιασμό και πιστή εφαρμογή όλων των κανόνων ασφαλείας. Ένα σωστά σχεδιασμένο και ασφαλές φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να λειτουργεί αδιάκοπα και χωρίς κινδύνους για δεκαετίες, παρέχοντας αξιόπιστη ενέργεια σε ένα σύγχρονο και βιώσιμο σπίτι.

Κεφάλαιο 9ο

Ενεργειακές ανάγκες μιας κατοικίας

9.1 Παράγοντες αναγκών κατοικίας

Οι ενεργειακές ανάγκες μιας κατοικίας το 2025 εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος και ο τύπος της κατοικίας, η γεωγραφική τοποθεσία, ο βαθμός θερμομόνωσης και η ενεργειακή απόδοσή της, οι συνήθειες κατανάλωσης των ενοίκων, καθώς και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση, την ψύξη, την παραγωγή ζεστού νερού και τη γενική λειτουργία της. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις προέρχονται από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, τα οποία καλύπτουν έως και το 60% της συνολικής κατανάλωσης, ανάλογα με το κλίμα της περιοχής. Σε θερμά κλίματα αυξάνεται το ποσοστό που αφορά την ψύξη, ενώ σε ψυχρότερα αυτό που αφορά τη θέρμανση. Η τάση το 2025 είναι η ευρεία χρήση αντλιών θερμότητας και έξυπνων θερμοστατών, οι οποίοι εξοικονομούν ενέργεια μέσω ακριβέστερης διαχείρισης.

Η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης καταναλώνει συνήθως 10% έως 20% της ενέργειας μιας κατοικίας, και καλύπτεται μέσω ηλεκτρικών θερμοσίφωνων ή ηλιακών συστημάτων. Πολλές κατοικίες πλέον επιλέγουν ηλιακούς θερμοσίφωνες ή υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, μειώνοντας έτσι το κόστος. Οι ηλεκτρικές οικιακές συσκευές, όπως ψυγεία, πλυντήρια, φούρνοι και τηλεοράσεις, καθώς και ο φωτισμός, συνεισφέρουν περίπου 20% έως 30% της ετήσιας

κατανάλωσης, ανάλογα με την ενεργειακή απόδοση των συσκευών και τη συχνότητα χρήσης τους. Ο φωτισμός τεχνολογίας LED έχει μειώσει σημαντικά τις απαιτήσεις σε ενέργεια, καλύπτοντας πλέον μόλις το 5% έως 10% της συνολικής κατανάλωσης.

Αν μια κατοικία διαθέτει ηλεκτρικό όχημα, η φόρτιση αυτού μπορεί να αυξήσει τη συνολική ετήσια κατανάλωση κατά 1.000 έως 2.000 kWh, αναλόγως της χρήσης. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί αισθητά η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως φωτοβολταϊκών, σε συνδυασμό με συστήματα net metering και αποθήκευσης με μπαταρίες. Έτσι, πολλές κατοικίες φτάνουν σε επίπεδα ενεργειακής αυτονομίας, καλύπτοντας ακόμη και το 100% των ετήσιων αναγκών τους.

Μια σύγχρονη, καλά μονωμένη κατοικία 100 τετραγωνικών μέτρων στην Ελλάδα παρουσιάζει συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας που κυμαίνεται από 5.000 έως 10.000 κιλοβατώρες, ανάλογα με τις συνθήκες και τον εξοπλισμό. Οι επιμέρους καταναλώσεις κατανέμονται περίπου ως εξής: 2.000 έως 4.000 kWh για θέρμανση και ψύξη, 800 έως 1.500 kWh για ζεστό νερό χρήσης, 1.500 έως 2.500 kWh για οικιακές συσκευές, 300 έως 500 kWh για φωτισμό και προαιρετικά 1.000 έως 2.000 kWh για τη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2021 και εξής, όλες οι νέες κατασκευές στην Ευρωπαϊκή Ένωση οφείλουν να πληρούν τις προδιαγραφές των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτά τα κτίρια ενσωματώνουν αυξημένα επίπεδα θερμομόνωσης, συστήματα αυτοματισμού, και αξιοποιούν σε σημαντικό βαθμό τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιορίζοντας δραστικά τις ανάγκες για εξωτερική τροφοδοσία. Συμπερασματικά, οι ενεργειακές ανάγκες των κατοικιών το 2025 διαμορφώνονται μέσα από ένα συνδυασμό αποδοτικότερων τεχνολογιών, ανανεώσιμων πηγών και έξυπνης διαχείρισης, οδηγώντας σε ένα πιο βιώσιμο και ενεργειακά αυτόνομο οικιστικό μοντέλο.

9.2 Σωστή επιλογή εξοπλισμού

Για την επιλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ, καθοριστικό στοιχείο είναι η τεχνολογία και η απόδοση κάθε μονάδας. Τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου θεωρούνται την τρέχουσα βέλτιστη επιλογή λόγω υψηλής απόδοσης που φτάνει το 18–22 %, καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, και μακροχρόνια σταθερότητα. Το 2025 είναι κοινά τα πάνελ ισχύος μεταξύ 400 και 600 W ανά μονάδα, για παράδειγμα, εάν ο

στόχος είναι συνολική ισχύς 6 kWp, συνήθως χρησιμοποιούνται δέκα πάνελ των 600 W ή ισοδύναμος συνδυασμός. Επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι η πιστοποίηση των πάνελ και η εγγύηση απόδοσης, που είναι κατά κανόνα από 10 έως 25 χρόνια.

Η επιλογή των μπαταριών καθορίζεται από την απαιτούμενη καθαρή αποθηκευτική χωρητικότητα (kWh), τη διάρκεια ζωής, το βάθος εκφόρτισης (DoD) και το κόστος ανά kWh. Οι συνηθισμένοι τύποι είναι οι μπαταρίες μολύβδου (AGM ή Gel), με χαμηλότερο κόστος αλλά μικρότερη διάρκεια ζωής (3–7 χρόνια) και DoD περίπου 50%, και οι μπαταρίες λιθίου τύπου LiFePO_4 , οι οποίες προσφέρουν υψηλό DoD (~90 %), διάρκεια ζωής 10–15 έτη, αλλά υψηλότερη τιμή. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του 2025, το κόστος κατασκευής μπαταριών λιθίου κυμαίνεται κατά μέσον όρο στα ~151 δολάρια / kWh (~140 €–150 €/kWh), ενώ σε μεγαλύτερες μονάδες σταθερής αποθήκευσης μπορεί να φτάσει τα \$100/kWh ή και λιγότερο σε αμερικανικές ή κινεζικές αγορές. Σε ευρωπαϊκές κατοικίες η τιμή ανά εγκατεστημένη χωρητικότητα έχει υπολογιστεί μεταξύ 600 και 1.000 €/kWh, ανάλογα με μέγεθος και τύπο μπαταρίας

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος ξεκινά από καταγραφή της ημερήσιας κατανάλωσης σε kWh. Καταγράφονται οι συσκευές, η ισχύς και οι ώρες λειτουργίας τους ώστε να προκύψει συνολική μέρα με μέση ζήτηση, π.χ. 10–11 kWh/ημέρα για σύγχρονη κατοικία 100 τ.μ. με ψυγείο, φωτισμό LED, κουζίνα, τηλεόραση, υπολογιστές κ.λπ. Στην πράξη οι μελέτες κατασκευής off grid συστημάτων σε ελληνικά νησιά χρησιμοποιούν τέτοιους πίνακες φορτίων ως πρώτα βήματα για τη διαστασιολόγηση μέσω συστημάτων βελτιστοποίησης, ώστε να επιτευχθεί ενεργειακή αυτονομία ακόμα και σε ημέρες περιορισμένης ηλιοφάνειας.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος γίνεται λαμβάνοντας πρώτα υπόψη τη μέση μηνιαίο ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής που θα γίνει η εγκατάσταση. Στην Ελλάδα, με μέση ημερήσια ηλιοφάνεια π.χ. 5 ώρες πλήρους έντασης, για ημερήσια ζήτηση 11 kWh προκύπτει απαραίτητη ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκών περίπου 2.200 W, αλλά λόγω απωλειών (~20 %) και για ασφαλή κάλυψη επιλέγεται συνήθως σύστημα ισχύος 3–4 kWp. Ταυτόχρονα η απαιτούμενη χωρητικότητα μπαταριών για 2 ημέρες αυτονομίας υπολογίζεται ως 22 kWh, και διαιρώντας με DoD 0,9 (~90 %) προκύπτει ανάγκη για περίπου 24–25 kWh καθαρής αποθηκευτικής ισχύος. Ο inverter πρέπει να υποστηρίζει ισχύ >4–5 kW AC, ώστε να καλύπτει τις στιγμιαίες αιχμές ζήτησης φορτίων.

9.3 Κόστος εγκατάστασης και επένδυσης

Κόστος εγκατάστασης και τεχνικός εξοπλισμός υπολογίζεται συνοπτικά ως εξής. Στην Ελλάδα το 2025, η τιμή ανά kWh παραγόμενης ενέργειας από σύστημα PV BAT, σε μελέτη έξι σεναρίων, βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 0,17 €/kWh και 0,24 €/kWh. Άλλη ελληνική μελέτη έδειξε κόστος μονάδας 0,58 €/kWh όταν χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες μολύβδου, σε συνδυασμό με βελτιστοποίηση μεγέθους και τεχνολογία Li μπαταρίας αναμένεται αξιοσημείωτη μείωση του κόστους. Οι ερευνητικές αναλύσεις στην Ευρώπη δείχνουν πως το επίπεδο κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού για αποκεντρωμένα off grid συστήματα έχει μειωθεί σημαντικά από 0,54 \$/kWh το 2016 σε ~0,29 \$/kWh το 2021.

Σε όρους επένδυσης, η φωτοβολταϊκή ισχύς 4 kWp εκτιμάται σε περίπου 4.000 5.000 € συμπεριλαμβανομένων των πάνελ και της εγκατάστασης του πλαισίου. Η μπαταρία λιθίου LiFePO 25 kWh κοστίζει σύμφωνα με τις αγοραστικές τάσεις γύρω στα 140 με 150 €/kWh δηλαδή συνολικά ~3.500 4.000 € για 25 kWh, αλλά αν συνδυαστεί με inverter, η τιμή μπορεί να αναπτυχθεί σε ~8 με 10.000 € για ένα πλήρες σύστημα 10 kWh, ανάλογα με μάρκα και την τοποθέτηση. Ο inverter διπλής κατεύθυνσης και ο ρυθμιστής φόρτισης κοστίζουν 1.500 με 3.000 €, και οι άδειες-έγγραφα και εγκατάσταση 2.000 με 3.000 €, δηλαδή συνολικό κόστος μπορεί να φτάσει στα 17.000 με 23.000 €, ανάλογα με μέγεθος συστήματος, μπαταρίες και τεχνολογία.

Η απόσβεση ενός τέτοιου συστήματος προκύπτει αν υπολογιστεί η ετήσια εξοικονόμηση από την αποφεύγομενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Για ετήσια κατανάλωση ~10.000 kWh, με τιμή 0,20 €/kWh, η εξοικονόμηση είναι περίπου 2.000 € ετησίως. Εάν η αρχική επένδυση είναι 17 με 23.000 €, η αναμενόμενη απόσβεση είναι 8 με 12 έτη. Αν χρησιμοποιηθούν δάνειο ή επιδότηση, η απόσβεση μειώνεται δραστικά. Σημειώνεται ότι σε χώρες της ΕΕ μπορούν να υπάρχουν επιδοτήσεις ή φορολογικά κίνητρα, ή επενδυτικά επιδόματα που καλύπτουν σημαντικό ποσοστό του κόστους.

Η ολοκληρωμένη επιλογή πάνελ, μπαταριών, inverter και λοιπών στοιχείων πραγματοποιείται μέσω λογισμικού βελτιστοποίησης, ειδικά όταν επιθυμείται υψηλή διεύθυνση ανανεώσιμων σε απομονωμένες περιοχές όπως ελληνικά νησιά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Νισύρου εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια και η τελική

σύσταση βασίστηκε στο ελάχιστο καθαρό παρόν κόστος και στο μέγιστο ποσοστό κάλυψης φορτίου χωρίς απορρίψεις ενέργειας.

Ένα σύγχρονο off grid σύστημα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα oversizing: δηλαδή εγκατάσταση μεγαλύτερης ισχύος φωτοβολταϊκών από την τυπική ανάγκη, ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη κερδοφορία, δυνατότητα να παρέχει υπηρεσίες στο ενεργειακό δίκτυο ή να αντλεί εισόδημα από ευελιξία λειτουργίας, όταν επιτρέπει το πλαίσιο αγοράς

Λαμβάνοντας υπόψη το 2025, το κόστος των μπαταριών έχει μειωθεί σημαντικά: οι μπαταρίες λιθίου έχουν χάσει πάνω από 90 % της τιμής τους από το 2010, και η βιομηχανία θεωρείται ότι περνάει μια «ήσυχη επανάσταση» στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, με ρυθμούς ανάπτυξης και πτώση κόστους που επιτρέπουν σε φωτοβολταϊκά με μπαταρία να είναι πιο ανταγωνιστικά από συμβατικές πηγές ενέργειας σε πολλές χώρες ήδη από 2025.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η εγκατεστημένη χωρητικότητα αποθήκευσης αυξήθηκε από ~43 GW το 2023 σε ~70 GW το 2024, με προβλέψεις ότι έως το 2030 περισσότερη χωρητικότητα αποθήκευσης θα εγκατασταθεί παρά νέα εργοστάσια ορυκτών καυσίμων.

Για να συνοψίσει κανείς το πώς προχωράει η σύνθεση μέρους προς μέρος ενός πλήρους off grid συστήματος, αρχικά καταγράφεται η κατανάλωση, υπολογίζεται η ημερήσια ζήτηση και επιλέγεται επιθυμητή αυτονομία, ακολουθεί η επιλογή πάνελ και μπαταριών με βάση τεχνολογία, αποδοτικότητα, DoD, διάρκεια ζωής και κόστος. Έπειτα εκτελείται διαστασιολόγηση, προσδιορισμός ισχύος PV και χωρητικότητας μπαταριών λαμβάνοντας υπόψη απώλειες και κλιματικά δεδομένα. Ο τεχνικός εξοπλισμός συμπεριλαμβάνει inverter, φορτιστές, σύστημα παρακολούθησης. Στο τέλος γίνεται ανάλυση κόστους, περιλαμβάνοντας επενδυτικό κόστος, λειτουργικά έξοδα, αναμενόμενο κέρδος και απόσβεση συνυπολογίζοντας πιθανές επιδοτήσεις ή φορολογικούς μειωτικούς παράγοντες.

Συνολικά, για μια κατοικία 100 τ.μ. με ετήσια ζήτηση ~10 000 kWh και ανάγκη αυτονομίας 2 ημερών, ένα σύστημα 3 4 kWp φωτοβολταϊκών με μπαταρίες ~25 kWh, inverter ~5 kW και τις κατάλληλες υποδομές, κοστίζει περίπου 17.000 με 23.000 €, με χρονικό ορίζοντα απόσβεσης 8 με 12 έτη χωρίς επιδοτήσεις. Το κόστος παραγωγής ρεύματος βρίσκεται μεταξύ 0,17 €/kWh και 0,24 €/kWh, και σε μερικές τεχνικο

οικονομικές μελέτες έως 0,58 €/kWh με εύρος διαφορετικών τεχνολογιών. Εάν υπολογιστεί η μελλοντική πτώση στις τιμές μπαταριών και φωτοβολταϊκών, και εάν υπάρξουν επιδοτήσεις, η απόσβεση και το καθαρό οικονομικό όφελος βελτιώνονται σημαντικά.

Με τα παραπάνω δεδομένα, το 2025, ένα καλά σχεδιασμένο αυτόνομο σύστημα φωτοβολταϊκών και μπαταριών μπορεί να παρέχει αξιόπιστη αυτονομία, ενεργειακή ανεξαρτησία, φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο λειτουργίας, και οικονομική βιωσιμότητα σε μεσοπρόθεσμο έως μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα.

Κεφάλαιο 10^ο

Νομοθεσία και κίνητρα στην Ελλάδα

10.1 Επιδοτήσεις και κίνητρα

Όταν εγκαθιστάς φωτοβολταϊκά σε κατοικία που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο της ΔΕΗ, μπορείς να επιλέξεις το μοντέλο net metering (ενεργειακός συμψηφισμός). Σε αυτό το καθεστώς καταναλώνεις αυτοπροσώπως την ενέργεια που παράγεις και η τυχόν περίσσεια ετήσια συμψηφίζεται ως πίστωση στον λογαριασμό σου, με ανταμοιβή στην τιμή λιανικής, δηλαδή παίρνεις πίσω όσες κιλοβατώρες έστειλες στο δίκτυο στην ίδια τιμή που αγοράζες ενέργεια. Πρόκειται για αποτελεσματική λύση αν η κατοικία έχει κανονική κατανάλωση και είναι συνδεδεμένη με ΔΕΗ, ειδικά αν παράγει περίπου όση καταναλώνει ετησίως, μειώνοντας δραστικά τον λογαριασμό, με περίοδο απόσβεσης 6–10 χρόνια ανάλογα με την κατανάλωση.

Πέρα από το ενεργειακό όφελος, υπάρχουν κρατικά και ευρωπαϊκά προγράμματα επιδότησης για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ανάλογα με το εισόδημα, για οικιακή χρήση η επιδότηση μπορεί να καλύψει 45–75% του κόστους του φωτοβολταϊκού, ενώ οι μπαταρίες μπορεί να επιδοτηθούν στο 90–100% του κόστους τους σε ειδικά προγράμματα. Επίσης σε περιπτώσεις ευπαθών ομάδων, πολύτεκνων ή ΑμΕΑ, μπορεί να προβλέπεται πρόσθετο μπόνους στο ποσοστό.

Όταν έχουμε το net billing, δηλαδή ένα μοντέλο ενεργειακής αυτοπαραγωγής όπου η πλεονάζουσα ενέργεια που τροφοδοτείται στο δίκτυο αποζημιώνεται σε τιμή καθορισμένη από την αγορά, η οποία συνήθως είναι χαμηλότερη από την τιμή λιανικής πώλησης. Αυτό το καθεστώς ταιριάζει περισσότερο σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των

10 kW, είτε κατοικιών είτε επιχειρήσεων, όπου υπάρχει παραγωγή πλεονάσματος ενέργειας.

Αν συνδυάσεις net billing με μπαταρίες αυξάνεις πράγματι το οικονομικό όφελος, γιατί μπορείς να αποθηκεύεις την ενέργεια που παράγεις και να την καταναλώνεις αργότερα, περιορίζοντας την ποσότητα που πωλείται στο δίκτυο σε χαμηλότερη τιμή. Υπάρχουν και «εικονικά» σχήματα που επιτρέπουν να διανέμεται πλεονάζουσα ενέργεια σε διαφορετικά σημεία ή καταναλωτές έναντι πιστώσεων σε πραγματικό χρόνο, κάτι χρήσιμο για κοινότητες κατοίκων ή πολυκατοικίες.

Ταυτόχρονα, προγράμματα στήριξης επιδοτούν και εγκατάσταση net billing με μπαταρίες μέσω ΕΣΠΑ ή του Ταμείου Ανάκαμψης. Τα ποσοστά επιδοτήσεων είναι παρόμοια με net metering, συνήθως 45–60% για φωτοβολταϊκά ή φωτοβολταϊκά και μπαταρία ως και 90–100% για την ίδια τη μπαταρία. Οι επιδοτήσεις ποικίλλουν ανάλογα με το είδος χρήστη, το εισόδημα και την ισχύ του συστήματος.

Η τρίτη επιλογή αφορά αυτόνομα (off grid) φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες, δηλαδή πλήρη ενεργειακή ανεξαρτησία χωρίς διασύνδεση με το δίκτυο ΔΕΗ. Αυτά τα συστήματα είναι ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές ή αδόμητα/αυθαίρετα σπίτια χωρίς πρόσβαση στο δημόσιο δίκτυο. Λειτουργούν με πάνελ, MPPT φορτιστές, μπαταρίες, inverter και συστήματα διαχείρισης φορτίου, προσφέρουν αξιοπιστία και αυτονομία, αλλά έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος και η απόσβεση γίνεται σε βάθος χρόνου, ανάλογα με τη χρήση και τα φορτία, συνήθως σε λιγότερο από 10 χρόνια αν υπάρχει έντονη χρήση.

Ωστόσο τα αυτόνομα συστήματα είναι συνήθως εκτός των επιδοτούμενων προγραμμάτων που επιδοτούν διασυνδεδεμένη παραγωγή. Μια επιδοτούμενη μορφή αποθήκευσης μπορεί να ισχύσει αν συνδυαστεί με net billing, αλλά χωρίς σύνδεση ΔΕΗ ενδέχεται να μην θεωρείται επιλέξιμο σχήμα από το κράτος, εκτός ιδιαιτέρων προγραμμάτων απομακρυσμένης ηλεκτροδότησης. Πάντως, όσοι επιδιώκουν πλήρη αυτονομία, ανάλογα με την κατανάλωση και την ισχύ των εξαρτημάτων, μπορούν να βρουν λύσεις με επιδοτούμενο περιθώριο μέσω ειδικών δράσεων.

Συνοπτικά λοιπόν, με το σύστημα του net metering, ο καταναλωτής εξοικονομεί ηλεκτρική ενέργεια που αποτιμάται στην τιμή λιανικής, με αποτέλεσμα να μειώνονται σχεδόν στο μηδέν οι λογαριασμοί ηλεκτρικού ρεύματος. Παράλληλα, παρέχεται σημαντική επιδότηση για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, η οποία

μπορεί να φτάσει από 45% έως 75%, καθώς και επιδότηση για την τοποθέτηση μπαταριών, που ενδέχεται να καλύπτει έως και το 100% του κόστους. Αντίθετα, το σύστημα του net billing επιτρέπει την πώληση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται σε μια αγορά, η οποία συνήθως προσφέρει χαμηλότερη τιμή σε σχέση με την τιμή λιανικής. Ωστόσο, οι επιδοτήσεις για φωτοβολταϊκά και μπαταρίες παραμένουν παρόμοιες με αυτές του net metering, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του virtual net billing, το οποίο επιτρέπει την κοινή χρήση της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών χρηστών ή σημείων κατανάλωσης. Τέλος, στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα τύπου off-grid παρέχεται πλήρης ενεργειακή ανεξαρτησία, καθώς δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο και συνεπώς δεν συμμετέχουν στα συστήματα net metering ή net billing. Ωστόσο, οι κρατικές επιδοτήσεις για αυτού του είδους τα συστήματα είναι περιορισμένες ή ανύπαρκτες, εκτός αν υπάρχει ειδικό θεσμικό πλαίσιο που να τις προβλέπει.

10.2 Νομοθεσία

Στην Ελλάδα, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κατοικίες, είτε πρόκειται για αυτόνομα (off-grid) είτε για διασυνδεδεμένα (on-grid) συστήματα, ρυθμίζεται από ένα σύνολο νομοθετικών διατάξεων που έχουν στόχο την προώθηση της ενεργειακής αυτονομίας, την προστασία του περιβάλλοντος και τη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ο βασικός νόμος που ορίζει το πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι ο Νόμος 3468/2006, ο οποίος θέτει τις γενικές αρχές λειτουργίας, εγκατάστασης και διαχείρισης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Επίσης, σημαντικές τροποποιήσεις και προστέθηκαν με τον Νόμο 4951/2022, ο οποίος εισάγει απλοποιήσεις στη διαδικασία αδειοδότησης και ενισχύει το πλαίσιο για την εγκατάσταση μπαταριών. Ο πιο πρόσφατος νόμος, ο Νόμος 5106/2024 (ΦΕΚ 63Α/2024), εισάγει νέα δεδομένα για την αυτοπαραγωγή, τις ενεργειακές κοινότητες, και τα περιβαλλοντικά κριτήρια για εγκαταστάσεις.

Στην πράξη, ένα αυτόνομο σπίτι, δηλαδή μια κατοικία που λειτουργεί πλήρως ανεξάρτητα από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (off-grid), μπορεί να εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά πάνελ χωρίς υποχρέωση σύνδεσης με τον ΔΕΔΔΗΕ. Η εγκατάσταση αυτή θεωρείται νόμιμη, αρκεί το κτίσμα να έχει οικοδομική άδεια. Εφόσον πληρούνται αυτές οι βασικές προϋποθέσεις, δεν απαιτείται άδεια παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας, αρκεί το σύστημα να προορίζεται αποκλειστικά για ίδια χρήση και να μην επιδιώκεται η πώληση ενέργειας στο δίκτυο.

Παρόλα αυτά, για την επιτυχή εγκατάσταση και ασφαλή λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται τεχνική μελέτη, η οποία καθορίζει τις ενεργειακές ανάγκες του σπιτιού και το κατάλληλο μέγεθος του συστήματος σε πάνελ, μπαταρίες και inverter. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η ύπαρξη γεννήτριας ως εφεδρική πηγή ενέργειας για περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας.

Αντιθέτως, στην περίπτωση που το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο (on-grid), ή πρόκειται για υβριδικό σύστημα, τότε απαιτούνται επιπλέον διαδικασίες. Συγκεκριμένα, είναι υποχρεωτική η έκδοση άδειας παραγωγής ή εξαίρεσης από άδεια, τεχνικές εγκρίσεις από τον ΔΕΔΔΗΕ και όπου απαιτείται, πολεοδομικές εγκρίσεις. Η αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό (net metering) είναι ευρέως διαδεδομένη στην Ελλάδα, αλλά προϋποθέτει σύνδεση στο δημόσιο δίκτυο και τήρηση προτύπων ασφαλείας και συμβατότητας.

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν οι πολυκατοικίες. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος σε κοινόχρηστη επιφάνεια, όπως η ταράτσα, προϋποθέτει τη συναίνεση των συνιδιοκτητών. Μέχρι πρόσφατα, απαιτείτο ομοφωνία, αλλά υπάρχει σχετική πρόβλεψη σε υπό διαβούλευση νομοσχέδιο να αρκεί η πλειοψηφία του 51% των συνιδιοκτητών, προκειμένου να προχωρήσει μια τέτοια εγκατάσταση. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να προηγηθεί απόφαση γενικής συνέλευσης της πολυκατοικίας και να καταγραφεί σε πρακτικό. Σε περίπτωση επιμέρους εγκατάστασης, αυτός πρέπει να λάβει και την έγγραφη συναίνεση για χρήση συγκεκριμένου χώρου της ταράτσας.

Σημαντική εξέλιξη αποτελεί και η θεσμική υποστήριξη για εγκαταστάσεις με αποθήκευση ενέργειας, δηλαδή τη χρήση μπαταριών, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή αυτονομία του χρήστη και να μειώσουν την εξάρτηση από το δίκτυο. Με τον Νόμο 4951/2022, προβλέπεται το θεσμικό πλαίσιο για αδειοδότηση τέτοιων συστημάτων και υπάρχει δυνατότητα ενίσχυσης μέσω προγραμμάτων χρηματοδότησης ή επιδότησης.

Τέλος, σημαντικό είναι να επισημανθεί πως για οποιαδήποτε εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος, η ενεργειακή μελέτη, η τήρηση των ηλεκτρολογικών προτύπων και η σύνταξη δήλωσης από αρμόδιο μηχανικό είναι απαραίτητα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ιδιοκτήτες μπορούν να ενταχθούν σε προγράμματα όπως το

«Εξοικονομώ 2025», που προσφέρει επιδοτήσεις για ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών, περιλαμβάνοντας εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, μπαταριών, αντλιών θερμότητας και άλλων λύσεων ενεργειακής αυτονομίας.

10.3 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η ελληνική νομοθεσία προβλέπει πλήρες πλαίσιο για την εγκατάσταση αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενθαρρύνοντας την ενεργειακή ανεξαρτησία, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι τεχνικές και πολεοδομικές απαιτήσεις. Εάν το σύστημα δεν συνδέεται με το δίκτυο, η διαδικασία είναι απλούστερη και δεν απαιτείται συμμετοχή του ΔΕΔΔΗΕ, αλλά η συμμόρφωση με τις τεχνικές και κατασκευαστικές προδιαγραφές παραμένει απαραίτητη. Από την άλλη, τα διασυνδεδεμένα ή κοινόχρηστα συστήματα απαιτούν περισσότερη γραφειοκρατία αλλά προσφέρουν και τη δυνατότητα ενεργειακού συμψηφισμού και πρόσβασης σε κρατικά προγράμματα επιδότησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Εν κατακλείδι η παρούσα εργασία καταλήγει στα συμπεράσματα ότι η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος για την επίτευξη αυτονομίας από το δημόσιο δίκτυο δεν είναι κάτι το τόσο απλό και εύκολο καθώς απαιτεί τεχνικές γνώσεις, χρόνος σωστής μελέτης και επιλογή σωστού εξοπλισμού αφού άλλωστε με τα κίνητρα που παρουσιάζει το κράτος και η Ευρωπαϊκή Ένωση, το μετατρέπει σε μία επένδυση.

Με την ολική επένδυση ο καταναλωτής πρέπει να λάβει υπόψιν τα πιθανά κέρδη που μπορεί να λάβει από την πώληση της ενέργειας στο δίκτυο ακόμη και την αποφυγή των βαρίων λογαριασμών του κάθε παρόχου με αποτέλεσμα την ελάττωση εξόδων του νοικοκυριού ή της επιχείρησης του. Ωστόσο, όπως σε κάθε επένδυση, ο κάθε καταναλωτής πρέπει να προσέξει και τους κινδύνους, όπως η επιλογή λάθος εξαρτημάτων, καλωδίων, ασφαλειών, ακόμη και εγκαταστάτη όπου δεν έχει την απαραίτητη τεχνική κατάρτιση και γνώση για την συγκεκριμένη εγκατάσταση, διότι μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες όπου θα επιβαρύνουν τον καταναλωτή, σε αστοχία και καταστροφή του εξοπλισμού, σε μειωμένη απόδοση του συστήματος κλπ. Με την σωστή ολοκληρωμένη μελέτη, επιλογή εξοπλισμού και εγκατάσταση, η χρήση ενός αυτόνομου συστήματος είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αυτονομίας από το δημόσιο δίκτυο.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

AC: Alternating Current

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ANL: Automotive Non-Limiting

BMS: Battery Management System

CIGS: Copper Indium Gallium Selenide

DC: Direct Current

gPV: general Purpose Voltage

IEC: International Electrotechnical Commission

KMEK: Κτήρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης

LCOE: Levelized Cost of Energy

LiFePO₄: Lithium Ion Phosphate ή Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου

Li-ion: Ιόντων λιθίου

mV: Μιλιβόλτ

MVB: Miniature Circuit Breaker

MPPT: Maximum Power Point Tracking

NH: Niederspannung-Hochleistungs-Sicherung

ΟΤΣ: Οριακή Τιμή συστήματος

PWM: Pulse Width Modulation

PV: Photovoltaic

RCD: Residual Current Device

Φ/B: Φωτοβολταϊκό

Βιβλιογραφίες

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ-ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Καρανάσιος, Σ. (2018). Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Σχεδίαση, Εγκατάσταση και Λειτουργία. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

ΚΑΠΕ – Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. (2024). Αυτόνομα Συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής. Διαθέσιμο από: <https://www.cres.gr>

International Energy Agency (IEA). (2023). Renewables 2023 – Global Status Report. Διαθέσιμο από: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

Greenpeace Ελλάδας. (2022). Ενεργειακή Επανάσταση: Ένα Βιώσιμο Μέλλον για Όλους. Διαθέσιμο από: <https://www.greenpeace.org/greece>

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2023). Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Trends. Διαθέσιμο από: <https://www.irena.org>

Kalogirou, S. A. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press, London.

ΔΕΔΔΗΕ – Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. (2023). Οδηγός για Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών. Διαθέσιμο από: <https://www.deddie.gr>

SolarPower Europe. (2022). European Market Outlook for Solar Power 2022–2026. Διαθέσιμο από: <https://www.solarpowereurope.org>

IEC 60947-3 (2023). Low-voltage switchgear and controlgear – Part 3: Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units.

IEC 62619 (2021). Safety requirements for secondary lithium-ion cells and batteries for use in industrial applications.

UL 924 (2022). Standard for Safety Emergency Lighting and Power Equipment.

ISO 8820-6 (2020). Road vehicles – Fuse-links – Part 6: Fuse-links with bolt-in contacts.

Victron Energy (2023). Wiring Unlimited: A Guide to Electrical Systems for Off-Grid and Marine Applications.

Battery University (2024). How to Protect Lithium-Ion Batteries: Guidelines for Safe Operation.

Daly BMS (2024). Technical Datasheet for 4S 48V LiFePO4 Battery Management Systems.

National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2023). Comparative Analysis of Lithium-Ion vs. Lead-Acid Batteries in Off-Grid Solar Systems.

European Battery Alliance (2022). Second-Life Applications for Lithium-Ion Batteries: Feasibility and Market Trends.

Blue Sea Systems (2023). Technical Specifications for 9001E Battery Switch.

KiloVault (2024). KL-SW High-Current Battery Switch User Manual.

Victron Energy (2024). Lithium Battery Integration Guide for Solar Systems.

Battery University. LiFePO₄ vs. NMC: Key Differences and Applications. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com>

Solar Energy International (2023). Best Practices for Off-Grid Lithium Battery Systems. [Online]. Available: <https://www.solarenergy.org>

Victron Energy. (n.d.). Battery Balancer. Retrieved 14 May 2025, από <https://www.victronenergy.com/battery-balancers/battery-balancer>

Battery University. (n.d.). BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. Retrieved 14 May 2025, από <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>

Texas Instruments. (2013). Cell Balancing Techniques for Lithium-ion Batteries (Application Report SLVA477B). Retrieved 14 May 2025, από <https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>

Majeed, A., Zhang, J., & Li, Z. (2020). "A Review of Battery Management System and Balancing Techniques for Lithium-Ion Battery Pack." IEEE Access, 8, 178543–178562. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987688>

Victron Energy (2022). Lithium Battery Smart LiFePO₄ product manual. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com>

N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, & G. Yushin. (2015). "Li-ion battery materials: Present and future." Materials Today, 18(5), 252–264.

Battery University. "BU-205: Types of Lithium-ion." [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

Zhang, S. S. (2007). "A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries." Journal of Power Sources, 164(1), 351–364.

Lazzari, M. & Minutoli, M. (2005). "Advanced battery storage systems for electricity supply: Efficiency and safety issues." Energy, 30(12–13), 2193–2204.

Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles." Journal of Power Sources, 226, 272–288

Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., & Villafáfila-Robles, R. (2012). "A review of energy storage technologies for wind power applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2154–2171.

ABB (2020). Guide to Fuse and Circuit Protection in PV Installations. ABB Power Systems. Διαθέσιμο από: <https://global.abb>

Balta, K. (2019). Φωτοβολταϊκά Συστήματα – Σχεδίαση, Εγκατάσταση και Συντήρηση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

IEC (2010). IEC 60269-6: Low-voltage fuses – Part 6: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of solar photovoltaic energy systems. International Electrotechnical Commission.

IEC (2017). IEC 60364-7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems. International Electrotechnical Commission.

National Fire Protection Association (NFPA) (2023). NFPA 70 – National Electrical Code (NEC), Article 690: Solar Photovoltaic Systems. Quincy, MA: NFPA.

Phoenix Contact (2021). Protecting Photovoltaic Systems. Technical Brochure. Διαθέσιμο από: <https://www.phoenixcontact.com>

Renogy (2022). How to Size and Choose Fuses for Off-Grid PV Systems. Renogy Learning Center. Διαθέσιμο από: <https://www.renogy.com/learn/>

Schneider Electric (2020). Design and Installation Guide – Off-grid PV Systems. Schneider Electric Solar Division.

Victron Energy (2023). DC Protection and Cable Sizing in Victron Systems. Διαθέσιμο από: <https://www.victronenergy.com>

DIN VDE (2022). VDE 0100 – Electrical installations of buildings – Requirements for photovoltaic systems. VDE, Germany.

IEC (2015). EN 50618 – Cables for photovoltaic systems. CENELEC.

Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Διαθέσιμο από: <https://www.rae.gr>. Περιλαμβάνει αποφάσεις και οδηγίες για Net Metering (π.χ. Απόφαση ΡΑΕ 346/2016).

ΔΕΔΔΗΕ. Διαθέσιμο από: <https://www.deddie.gr> – Περιλαμβάνει τεχνικές προδιαγραφές, διαδικασίες σύνδεσης κ.α.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Διαθέσιμο από: <https://ypen.gr> – Φορέας αρμόδιος για ενεργειακή πολιτική.

Kobus, C., Mugge, R., & Schoormans, J. (2013). “Long-term influence of energy feedback on domestic energy use.” *Energy Policy*, 51, 393–400.

Darghouth, N. R., Barbose, G., & Wiser, R. H. (2011). “The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers.” *Energy Policy*, 39(9), 5243–5253.

Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review.” *Applied Energy*, 142, 80–94.

Kapsali, M. & Kaldellis, J. K. (2010). “Combining hydro and variable wind power generation by means of pumped-storage under economically viable terms.” *Applied Energy*, 87(11), 3475–3485.

Battery Prices in 2025: Global Trends & Projections. BSLBATT Blog. Διαθέσιμο: <https://www.bslbatt.com/blog/lithium-battery-price-forecast>

EcoFlow, Bluetti, Sunsaver, SunPower – Τρέχουσες τιμές 2025 σε Ευρωπαϊκά PV+Batteries. Διαθέσιμο: www.sunsaver.energy, coolithium.com, ecoflow.com

European Commission, 2019–2025. Clean Energy for All Europeans. Clean Energy Package. Διαθέσιμο: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en

European Directive 2010/31/EU on Energy Performance of Buildings (EPBD). Διαθέσιμο: EUR-Lex.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), 2023. Photovoltaics Report. Διαθέσιμο: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>

Financial Times (FT). The battery boom powering renewables. Διαθέσιμο: <https://www.ft.com/content/...>

Green, M.A., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M. and Ho-Baillie, A.W.Y., 2020. Solar cell efficiency tables (Version 57). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(1), pp.3–15.

International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency in Buildings και Energy Storage Trends 2023–2025. Διαθέσιμο: <https://www.iea.org>

International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021. Renewable Power Generation Costs in 2020. Διαθέσιμο: <https://www.irena.org/publications>

Kalogirou, S., 2013. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2nd ed. Academic Press.

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Τεχνικά εγχειρίδια για αντλίες θερμότητας, ZNX & ενεργειακή αυτονομία. Διαθέσιμο: www.cres.gr

KENAK – Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Ελλάδα). Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ). Διαθέσιμο: <https://www.tee.gr>

OECD/IEA. Buildings Energy Data. Διαθέσιμο: <https://www.iea.org/buildings>

ResearchGate. Techno-Economic Analysis of a PV-Battery System in Greece. Διαθέσιμο: <https://www.researchgate.net>

SCIRP Journal. A Feasibility Study of Solar PV-Battery Systems in Remote Areas. Διαθέσιμο: <https://www.scirp.org>

Techno-Economic Optimization of Hybrid Off-Grid RES Systems in Greek Islands. MDPI Energies, 2021. Διαθέσιμο: <https://www.mdpi.com/journal/energies>

Τεχνική Έρευνα Ενεργειακής Κατανάλωσης Νοικοκυριών. ΕΛΣΤΑΤ. Διαθέσιμο: <https://www.elstat.gr/el>

Τεχνική Πλατφόρμα BUILD UP. Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για ενεργειακά αποδοτικά κτίρια. Διαθέσιμο: <https://www.buildup.eu>

Wikipedia. Cost of Electricity by Source (ενημερωμένο LCOE). Διαθέσιμο: https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source

ΔΕΔΔΗΕ / ΕΥΔΑΠ – Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος ανά χρήση. Διαθέσιμο: <https://www.deddie.gr>, <https://www.eydap.gr>

Balkangreenenergynews.com, 2025. Greece Launches Subsidy Program for Rooftop PV with Batteries. Διαθέσιμο: <https://balkangreenenergynews.com/greece-launches-subsidy-program-for-rooftop-pv-with-batteries>.

DEDDIE – ΔΕΔΔΗΕ, 2025. Οδηγίες για Φωτοβολταϊκά Net Metering. Διαθέσιμο: <https://www.deddie.gr/el/upiresies/idiotes/autoparagogi/net-metering>

Fotovoltaika.gr – Φωτοβολταϊκά Ελλάδας. Διαθέσιμο: <https://www.fotovoltaika.gr>

Infolink Group, 2025. Παρουσίαση ελληνικού προγράμματος αποθήκευσης ενέργειας. Διαθέσιμο: <https://www.infolink-group.com/energy-article/energy-storage-topic-greek-government-unleashes-energy-storage-subsidy>

Karouzos Energy, 2025. Εγκαταστάσεις net metering και αυτόνομες. Διαθέσιμο: <https://www.karouzos.gr/index-3-1.php>

KGLaw Firm, 2024. Νομική ανάλυση για Net Billing. Διαθέσιμο: https://kglawfirm.gr/wp-content/uploads/2024/09/09.09.2024_Newsletter_NetBilling.pdf.

MP-Energy, 2025. Τεχνικά χαρακτηριστικά και λύσεις για αυτόνομα σπίτια. Διαθέσιμο: <https://www.mp-energy.gr/αυτονομα-συστηματα/αυτονομα-φωτοβολταικα.html> [Πρόσβαση: 3 Αυγούστου 2025].

PV Stegi, 2025. Επίσημο Πρόγραμμα "Φωτοβολταϊκά στη Στέγη". Διαθέσιμο: <https://pvstegi.gov.gr>

ΔΕΔΔΗΕ, 2025. Οδηγίες για Φωτοβολταϊκά Net Metering. Διαθέσιμο: <https://www.deddie.gr/el/upiresies/idiotes/autoparagogi/net-metering/>

PAE, 2025. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας – Net Metering και Net Billing. Διαθέσιμο: <https://www.rae.gr/katanalotes/net-metering-kai-net-billing/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2025. Ενεργειακός Συμψηφισμός (net metering). Διαθέσιμο: <https://ypen.gr/?p=29639>

KGLaw, 2024. Νομική ανάλυση για Net Billing. Διαθέσιμο: https://kglawfirm.gr/wp-content/uploads/2024/09/09.09.2024_Newsletter_NetBilling.pdf

Fotovoltaika.gr, 2025. Φωτοβολταϊκά Ελλάδας. Διαθέσιμο: <https://www.fotovoltaika.gr/>

gov.gr, 2025. Επίσημο Πρόγραμμα "Φωτοβολταϊκά στη Στέγη". Διαθέσιμο: <https://pvstegi.gov.gr>

Balkan Green Energy News, 2025. Πρόγραμμα επιδότησης για φωτοβολταϊκά με μπαταρίες. Διαθέσιμο: <https://balkangreenenergynews.com/greece-launches-subsidy-program-for-rooftop-pv-with-batteries/>

Infolink Group, 2025. Παρουσίαση ελληνικού προγράμματος αποθήκευσης ενέργειας. Διαθέσιμο: <https://www.infolink-group.com/energy-article/energy-storage-topic-greek-government-unleashes-energy-storage-subsidy>

MP-Energy, 2025. Τεχνικά χαρακτηριστικά και λύσεις για αυτόνομα σπίτια. Διαθέσιμο: <https://www.mp-energy.gr/αυτονομα-συστηματα/αυτονομα-φωτοβολταικα.html>

Karouzos Energy, 2025. Εγκαταστάσεις net metering και αυτόνομες. Διαθέσιμο: <https://www.karouzos.gr/index-3-1.php>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025. Εξοικονομώ–Αυτονομώ. Διαθέσιμο: <https://exoikonomo2023.gov.gr>

RAE – Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2025. Net Metering και Net Billing. Διαθέσιμο: <https://www.rae.gr/katanalotes/net-metering-kai-net-billing>.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025. Ενεργειακός Συμψηφισμός (net metering). Διαθέσιμο: <https://ypen.gr/?p=29639>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025. Εξοικονομώ–Αυτονομώ. Διαθέσιμο: <https://exoikonomo2023.gov.gr>