

Ανάπτυξη αποδοτικών ΦΒ υλικών και διατάξεων τρίτης γενιάς για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του παραγωγικού τομέα στην πράσινη ενέργεια

ΠΣΚΕ «ΤΑΕΔΡ 0537347»

Παραδοτέο 4.1.

Ενσωμάτωση των νέων Φ/Β στο ηλιακό πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ



Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	3
2. Διαθέσιμη υποδομή ΕΛΜΕΠΑ για αξιολόγηση Φ/Β διατάξεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο.....	5
3. Πειραματικά πρωτόκολλα μετρήσεων	9
3.1 Κατηγορίες Δοκιμών ISOS (Dark - D, Light - L, Outdoor - O) ¹	10
3.2 Αναδυόμενες Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών και Πρωτόκολλα Δοκιμών ISOS	13
3.3 Δοκιμές Θερμικής Καταπόνησης και Ανάλυσης.....	13
3.4 Διεθνή Πρότυπα Δοκιμών της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC)	14
4. Ενσωμάτωση νέων Φ/Β στο ηλιακό πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ και δημιουργία πρωτοκόλλων μετρήσεων .	15
4.1 Συνεχής καταγραφή μετεωρολογικών συνθηκών στο Φ/Β πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ	16
4.2 Μελέτη διάρκειας ζωής ΦΒ και ανάλυση Post-mortem σε εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες.	16
4.3 Οπτική/ θερμική/ LBIC imaging παρατήρηση των ΦΒ στοιχείων.....	18
4.4 Πειράματα θερμοκρασιακής εξάρτησης ΦΒ περοβσκίτη	18
4.5 Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης EIS (BIAS & Temp).....	18
4.6 Συγκριτική αξιολόγηση ΦΒ στοιχείων περοβσκίτη με εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών	19
5. Συμπέρασμα και προοπτικές	20
Παράρτημα Α :Ηλεκτρονικό σύστημα, λογισμικό και αλγόριθμοι IV -MPP	21

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού Φ/Β διατάξεων, ΕΛΜΕΠΑ.....	6
Εικόνα 2 Εξοπλισμός μέτρησης του ΕΛΜΕΠΑ που επιτρέπει την ταυτόχρονη δοκιμή έως και 64 ανεξάρτητων διατάξεων υπό διάφορες συνθήκες (διαφορετική θερμοκρασία, ατμόσφαιρα θαλάμου, φωτισμός φώτος κ.λπ.) προσφέροντας ταχεία προσέγγιση δοκιμών. Ο πύργος LED που αποτελείται από 12 LED επιτρέπει τη μέτρηση της φασματικής απόκρισης και την προσομοίωση πλήρους φάσματος σε συνθήκες ακτινοβολίας 1000W/m ²	7
Εικόνα 3 Εργαστήριο ανοιχτού χώρου στο ΕΛΜΕΠΑ	8
Εικόνα 4 Λήψη θερμικής κάμερας σε Φ/Β πλαίσιο γραφενίου-περοβσκίτη	9
Εικόνα 5 Συγκριτικός Πίνακας Πρωτοκόλλων Μέτρησης.	13
Εικόνα 6 Βάση στήριξης για Οργανικά Φ/Β πλαίσια	15
Εικόνα 7 Μετρητικό σύστημα της PV-BLOCKS για την καταγραφή καμπυλών ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.	17
Εικόνα 8 α. Ηλεκτρονικό σύστημα για ανιχνευτή IV-MPP που παρουσιάζεται στον Core 2 β. Γραφική διεπαφή χρήση (GUI) του ρυθμιστή φορτιστή IV-MPPT.....	21
Εικόνα 9: Ανάλυση GUI του ρυθμιστή φορτιστή IV-MPPT.	22

1. Εισαγωγή

Για να εισέλθουν στην αγορά, οι φωτοβολταϊκές (photovoltaic - PV) τεχνολογίες πρέπει να προσφέρουν φθηνά, ενεργειακά αποδοτικά και ανθεκτικά Φ/Β στοιχεία και μονάδες σε μεγάλη κλίμακα με προβλέψιμη παραγωγή ενέργειας σε εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας. Για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο, οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα Φ/Β στοιχεία που βασίζονται σε οργανικά ή περοβσκιτικά Φ/Β, πρέπει να ξεπεράσουν αρκετές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ποιοτικών στοιχείων ή/και μονάδων σε μεγάλη κλίμακα, και της ενσωμάτωσης αυτών των στοιχείων σε πραγματικές Φ/Β εγκαταστάσεις για ανάλυση, μελέτη και πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης τους σε εξωτερικούς χώρους.

Μέχρι στιγμής, οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν παρουσιάσει υποσχόμενη απόδοση μετατροπής ενέργειας και σταθερότητα της απόδοσης υπό συνθήκες προσομοίωσης στο εργαστήριο και σε ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική έρευνα αρχίζει να μετατοπίζεται προς την μελέτη και ανάλυση Φ/Β αναδυόμενων τεχνολογιών σε μεγάλη κλίμακα και οι εγκαταστάσεις σε εξωτερικούς χώρους έχουν καταστεί απαραίτητες.

Σε αυτή την έκθεση, παραθέτουμε πρώτα την διαθέσιμη υποδομή του ΕΛΜΕΠΑ για την παρακολούθηση της απόδοσης διαφόρων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων εσωτερικού και εξωτερικού χώρου (Κεφάλαιο 2). Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζουμε συγκεκριμένα πρωτόκολλα πειραματικών μετρήσεων για την αξιολόγηση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών χρησιμοποιώντας περιβαλλοντικό θάλαμο δοκιμών ISOS, εγκατάσταση συστήματος χαρτογράφησης απορρόφησης (LBIC), εξοπλισμό μέτρησης της κβαντικής απόδοσης (External Quantum Efficiency, EQE), την ολοκληρωμένη πλατφόρμα μετρήσεων Argeo, την πλατφόρμα εξωτερικών μετρήσεων Φ/Β PV Blocks και τις εγκαταστάσεις δοκιμών εξωτερικού χώρου Φ/Β στοιχείων και πλαισίων στο ΕΛΜΕΠΑ. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται διάφορα πρωτόκολλα και τεχνικές μετρήσεων που έχουν μελετηθεί και αναλυθεί για την εφαρμογή σε δοκιμαστικά δείγματα που παρασχέθηκαν ή θα παρασχεθούν κατά την διάρκεια του έργου ενώ παράλληλα αναφέρεται και ο απαιτούμενος εξοπλισμός που χρειάζεται να αναπτυχθεί ή να τροποποιηθεί ώστε να φιλοξενηθούν νέα δείγματα φωτοβολταϊκών τεχνολογιών βασισμένων στο παρόν έργο.

Τέλος, στο παράρτημα παρέχονται συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με αλγόριθμους, και ρυθμίσεις για το λογισμικό για το ηλεκτρονικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί για μέρος των μετρήσεων.

2. Διαθέσιμη υποδομή ΕΛΜΕΠΑ για αξιολόγηση Φ/Β διατάξεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο

Η υποδομή του ΕΛΜΕΠΑ περιλαμβάνει: α) Εργαστήριο εναπόθεσης/επεξεργασίας, β) Εργαστήριο χαρακτηρισμού, γ) Εργαστήριο ανάπτυξης Φ/Β μεγάλης κλίμακας και δ) Εργαστήριο ανοιχτού χώρου (Εικόνα 1, 3).

Το εργαστήριο χαρακτηρισμού είναι εξοπλισμένο με μια ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων που επιτρέπουν οπτικές, επιφανειακές και ηλεκτρικές μετρήσεις για την ανάλυση των ιδιοτήτων υλικών και οπτοηλεκτρονικών διατάξεων αναδυόμενης τεχνολογίας. Επίσης, διαθέτει προηγμένο εξοπλισμό για ανάλυση οργανικών και περοβσκιτικών φωτοβολταϊκών (PV) στοιχείων. Οι εκτεταμένες εγκαταστάσεις χαρακτηρισμού του ΕΛΜΕΠΑ (Εικόνα 1) προσφέρουν συμπληρωματική υποστήριξη στη διαδικασία βελτιστοποίησης των επιμέρους υλικών και της αρχιτεκτονικής των Φ/Β στοιχείων και των διαφόρων διεπαφών στις τελικές διατάξεις.

Η υποδομή του ΕΛΜΕΠΑ προσφέρει μια ευρεία γκάμα στατικών και μεταβατικών τεχνικών, με τις εξής δυνατότητες:

A) Το πολυκαναλικό και ολοκληρωμένο σύστημα Arkeo 64 της Ciccì Research με τις εξής επιλογές

1. Εξαγωγή κινητικότητας ηλεκτρικών φορτίων (Photo-CELIV)
2. Φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής εμπέδησης (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)
3. Μέτρηση μεταβατικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (transient-photovoltage/current)
4. Μέτρηση ηλεκτροφωταύγειας (EL) με φασματοσκοπία,
5. Θερμική ανάλυση σε συνθήκες μεταβαλλόμενης θερμοκρασία.

B) Επιτάχυνση της έρευνας, της αξιοπιστίας και της ανάλυσης αποτυχίας ημιαγωγικών συσκευών, υλικών και ανάπτυξης διαδικασιών με το Keithley 4200A-SCS, που προσφέρει συγχρονισμένες μετρήσεις ρεύματος-τάσης (I-V), τάσης-χωρητικότητας (C-V) και εξαιρετικά γρήγορες παλμικές μετρήσεις I-V.

Γ) Γραμμή πιλοτικής παραγωγής S2S με αέριο άζωτο (N₂), μικρή γραμμή εκτυπώσιμων Φ/Β διατάξεων (Roll-to-Roll, R2R) και σύστημα ψεκασμού για την ανάπτυξη εκτυπώσιμων ηλεκτρονικών συσκευών σε μεγάλη κλίμακα.

Το ΕΛΜΕΠΑ διαθέτει επίσης το σύστημα μέτρησης κβαντικής απόδοσης QE-R EnliTech/IPCE, την πλατφόρμα Park XE7 AFM με λειτουργίες μικροσκοπίας Kelvin, δυναμικής επαφής EFM και μικροσκοπίας με πίεζοηλεκτρική δύναμη (Piezoresponse Force Microscopy). Επιπλέον, διαθέτει το φασματοφωτόμετρο

FS5 της Edinburgh Instruments για μέτρηση φωτοφωταύγειας (TR-PL) και τον περιβαλλοντικό θάλαμο δοκιμών ISOS της Infinity PV για δοκιμές Φ/Β σύμφωνα με τα πρωτόκολλα ISOS-D-1/2/3, ISOS-L-1/2/3 και ISOS-O-1/2/3, με σύστημα 40 καναλιών που καταγράφει τις συνθήκες θερμοκρασίας, έντασης ακτινοβολίας και υγρασίας.

Άλλος εξοπλισμός που μπορεί να διατεθεί από το ΕΛΜΕΠΑ είναι το FR Basic, Thetametrisis όπου είναι υπεύθυνο για τον χαρακτηρισμό των φιλμ (πάχος, οπτικές ιδιότητες) με ενσωματωμένο εργαλείο μέτρησης ανάκλασης. Παράλληλα, είναι διαθέσιμο και σύστημα μέτρησης Van der Pauw σύμφωνα με το Ecoria HMS-3000 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο με μετρήσεις 4 σημείων για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κινητικότητας & επιφανειακής αντίστασης των υπό μελέτη φιλμ.

Τέλος, το ΕΛΜΕΠΑ προσφέρει το σύστημα χαρτογράφησης απορρόφησης φωτός που αποδίδει από ρεύμα που επάγεται μέσα από μία δέσμη λέιζερ υψηλής ταχύτητας (LBIC) της InfinityPV για την αξιολόγηση φωτοβολταϊκών στοιχείων και μονάδων μετά από συνεχή λειτουργία.



Εικόνα 1 Εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού Φ/Β διατάξεων, ΕΛΜΕΠΑ

Η ενισχυμένη στατιστική ανάλυση μέσω συλλογής μεγάλου όγκου δεδομένων και στατιστικής μοντελοποίησης πολλαπλών Φ/Β διατάξεων απουσιάζει από την διεθνή βιβλιογραφία. Αυτή η προσέγγιση, σε συνδυασμό με εργαλεία Μηχανικής Μάθησης (ML) για αναγνώριση προτύπων, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα προς την πρόβλεψη της απόδοσης, την εκτίμηση αξιοπιστίας και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής μέσω κλειστών βρόχων ανάδρασης.

Η συμμετοχή του ΕΛΜΕΠΑ στο έργο επιτρέπει τη βελτιστοποίηση πολλαπλών φωτοβολταϊκών διατάξεων διαφορετικών τεχνολογιών και μεγέθους. Για το σκοπό αυτό, το ΕΛΜΕΠΑ σχεδίασε προσαρμοσμένες μετρήσεις σε πολυκαναλικά συστήματα που επιτρέπουν την παράλληλη αξιολόγηση έως και 64 ηλιακών

στοιχείων υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και με την εφαρμογή διαφορετικών πρωτοκόλλων μέτρησης (Εικόνα 2).



Εικόνα 2 Εξοπλισμός μέτρησης του ΕΛΜΕΠΑ που επιτρέπει την ταυτόχρονη δοκιμή έως και 64 ανεξάρτητων διατάξεων υπό διάφορες συνθήκες (διαφορετική θερμοκρασία, ατμόσφαιρα θαλάμου, φωτισμός φωτός κ.λπ.) προσφέροντας ταχεία προσέγγιση δοκιμών. Ο πύργος LED που αποτελείται από 12 LED επιτρέπει τη μέτρηση της φασματικής απόκρισης και την προσομοίωση πλήρους φάσματος σε συνθήκες ακτινοβολίας $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Οι υπαίθριες εργαστηριακές εγκαταστάσεις και οι επιταχυνόμενες δοκιμές ISOS που είναι διαθέσιμες στο ΕΛΜΕΠΑ θα διευκολύνουν την έρευνα και θα επιλύσουν τα ζητήματα/μηχανισμούς υποβάθμισης που θα μπορούσαν να προκύψουν από υλικό σε κυψέλες που ανοίγουν το δρόμο για την παραγωγή σταθερών και αποδοτικών αρχιτεκτονικών/μονάδων Φ/Β 3^{ης} γενιάς. Το ηλιακό πάρκο (Solar Farm) του ΕΛΜΕΠΑ για μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης και σταθερότητας σε εξωτερικούς χώρους αποτελείται από συσκευές για την παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος στοιχείου/μονάδας (Maximum Power Point - MPPT) μαζί με ένα σύστημα λήψης δεδομένων που παρακολουθεί συνεχώς τα περιβαλλοντικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας έναν μετεωρολογικό σταθμό. Στο ΕΛΜΕΠΑ, τα δείγματα που αναπτύχθηκαν και θα αναπτυχθούν στα πλαίσια του έργου θα εκτεθούν σε διάφορες συνθήκες μέτρησης χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα επιταχυνόμενων δοκιμών σταθερότητας ISOS-L/O/D.

Πιο αναλυτικά το εργαστήριο ανοιχτού χώρου στο ΕΛΜΕΠΑ περιλαμβάνει υποστηρικτική υποδομή, όπως ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπείς DC-DC, ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών, αντιστροφείς), μπαταρίες και αυτόματα συστήματα συλλογής δεδομένων για τη συνεχή παρακολούθηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών (PV) πλαισίων, με στόχο την καλύτερη κατανόηση της αξιοπιστίας τους και τη σύγκρισή τους με παραδοσιακές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, όπως τα Φ/Β πολυκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου, Φ/Β λεπτού υμενίου (CdTe, CIGs) αλλά και Φ/Β πλαίσια 3^{ης} γενιάς που

έχουν αναπτυχθεί από προηγούμενα έργα που συμμετείχε η ερευνητική ομάδα NANO@hmu του ΕΛΜΕΠΑ. Ένας ειδικός μετεωρολογικός σταθμός, σε συνδυασμό με σύστημα συλλογής δεδομένων, παρακολουθεί συνεχώς περιβαλλοντικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία και η θερμοκρασία.

Οι δυνατότητες που παρέχονται στο εργαστήριο ανοιχτού χώρου του ΕΛΜΕΠΑ είναι :

- Συνεχής παρακολούθηση της απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε επίπεδο συστοιχίας, πλαισίου / μονάδας / στοιχείων σε εξωτερικούς χώρους, συμπεριλαμβανομένων καμπυλών τάσης-ρεύματος.
- Μελέτες συσχέτισης με περιβαλλοντικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου.
- Σύγκριση με εμπορικά διαθέσιμα ηλιακά πλαίσια, όπως πλαίσια από χαλκό-ίνδιο-γαλλιο-σελήνιο (CIGS), τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Poly-Si) και διπλής όψης πάνελ πυριτίου (Bifacial Si).
- Καταγραφή δεδομένων απόδοσης φωτοβολταϊκών σε πραγματικό χρόνο στο σημείο μέγιστης ισχύος.



Εικόνα 3 Εργαστήριο ανοιχτού χώρου στο ΕΛΜΕΠΑ

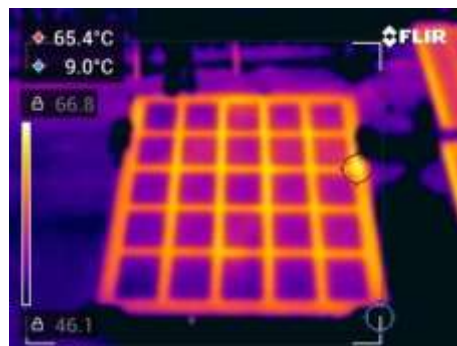
3. Πειραματικά πρωτόκολλα μετρήσεων

Το ΕΛΜΕΠΑ θα εφαρμόσει διάφορα πρωτόκολλα μέτρησης για την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων και μονάδων του έργου τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους (Εικόνες 1-3). Θα χρησιμοποιηθούν τα πρωτόκολλα δοκιμών ISOS (Διεθνή Πρότυπα για την Ηλιακή Ενέργεια από Φωτοβολταϊκά 3^{ης} γενιάς) για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η απόδοση των στοχευμένων διατάξεων. Αυτά τα πρωτόκολλα περιλαμβάνουν μια σειρά από πειραματικά εργαλεία και τεχνικές για την αξιολόγηση φωτοβολταϊκών στοιχείων και μονάδων, τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους.

Τα πρωτόκολλα ISOS για τυπικές φωτοβολταϊκές (PV) τεχνολογίες καλύπτουν τις γενικές διαδικασίες διαχείρισης ποιότητας και διασφάλισης για προϊόντα φωτοβολταϊκών (ISOS 9001) και σχετίζονται με τις γενικές απαιτήσεις για την επάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών και διακρίβωσης (ISOS 17025).

Σε εργαστηριακές μετρήσεις σε εσωτερικούς χώρους, χρησιμοποιούνται προσομοιωτές ηλιακού φωτός για να αναπαραγάγουν τις συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος (I-V) των φωτοβολταϊκών μονάδων χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, όπως η αποδοτικότητα, ο παράγοντας πλήρωσης και η ισχύς εξόδου.

Η ηλεκτροφωταύγεια (EL) και η θερμική απεικόνιση μέσω ειδικής κάμερας υπεράυθρων χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ελαττωμάτων στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Εφαρμόζεται τάση ορθής πόλωσης για την ανίχνευση του εκπεμπόμενου φωτός, ενώ η θερμική απεικόνιση εκτιμά την κατανομή της θερμοκρασίας στη φωτοβολταϊκή μονάδα για τον εντοπισμό θερμών σημείων ή θερμικών ανωμαλιών.



Εικόνα 4 Λήψη θερμικής κάμερας σε Φ/Β πλαίσιο γραφείου-περοθσκήτη

Δοκιμές ISOS σε Εξωτερικό Χώρο (Outdoor Exposure Tests)

Αυτές οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους για την αξιολόγηση της απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος. Περιλαμβάνουν παράγοντες όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η ηλιακή ακτινοβολία και η υγρασία.

❖ Δοκιμές O1 - Δοκιμές σε τυπική εξωτερική έκθεση

- Εξωτερικός χώρος
- Συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου (~25°C)
- Συνθήκες υγρασίας περιβάλλοντος
- Σε συνθήκες σημείου μέγιστης ισχύος ή ανοικτού - κυκλώματος

Η συσκευή τοποθετείται σε εξωτερικό χώρο υπό κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες, προσομοιώνοντας τυπική εξωτερική έκθεση χωρίς ακραία θερμοκρασία ή υγρασία.

❖ Δοκιμές O2 - Εξωτερική Έκθεση σε Αυξημένη Θερμοκρασία

- Εξωτερικός χώρος
- Συνθήκες αυξημένης θερμοκρασία
- Συνθήκες υγρασίας περιβάλλοντος
- Σε συνθήκες σημείου μέγιστης ισχύος ή ανοικτού - κυκλώματος

Η δοκιμή περιλαμβάνει εξωτερική έκθεση σε θερμότερο περιβάλλον, όπου η θερμοκρασία αυξάνεται αλλά η υγρασία παραμένει κανονική. Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ζεστές περιοχές ή σε ειδικούς κλιματικούς θαλάμους.

❖ Δοκιμές O3 - Εξωτερική Έκθεση σε Αυξημένη Θερμοκρασία και υγρασία (ακραία Εξωτερική Έκθεση).

- Εξωτερικός χώρος
- Συνθήκες αυξημένης θερμοκρασία
- Συνθήκες υψηλής υγρασίας
- Σε συνθήκες σημείου μέγιστης ισχύος

Αυτή είναι η πιο αυστηρή εξωτερική δοκιμή, που συνδυάζει εξωτερικές συνθήκες με υψηλή θερμοκρασία και υγρασία (π.χ., τροπικές ή παράκτιες περιοχές με υψηλή υγρασία).

Πρωτόκολλο	Τύπος Μέτρησης	Θερμοκρασία	Υγρασία	Περιγραφή
L1	Εσωτερικού χώρου	Θερμοκρασία δωματίου (~25°C)	Περιβάλλοντος	Τυπικές εσωτερικές συνθήκες
L2	Εσωτερικού χώρου	Αυξημένη (~65°C)	Περιβάλλοντος	Ζεστό εσωτερικό περιβάλλον
L3	Εσωτερικού χώρου	Αυξημένη (~65°C)	Υψηλή (~85%)	Ακραίες εσωτερικές συνθήκες
O1	Εξωτερικού χώρου	Θερμοκρασία δωματίου (~25°C)	Περιβάλλοντος	Κανονικές εξωτερικές συνθήκες
O2	Εξωτερικού χώρου	Αυξημένη	Περιβάλλοντος	Ζεστό εξωτερικό περιβάλλον
O3	Εξωτερικού χώρου	Αυξημένη	Υψηλή	Ακραίες εξωτερικές συνθήκες

Εικόνα 5 Συγκριτικός Πίνακας Πρωτοκόλλων Μέτρησης.

3.2 Αναδυόμενες Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών και Πρωτόκολλα Δοκιμών ISOS

Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα ηλιακά στοιχεία από περοβσκίτη και τα οργανικά ηλιακά στοιχεία, απαιτούν πρόσθετα ή τροποποιημένα πρωτόκολλα δοκιμών λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα πρωτόκολλα δοκιμών ISOS για αυτές τις τεχνολογίες, όπως:

- ISOS 166 που εισάγει απαιτήσεις για περιβαλλοντικές δοκιμές, όπως η ακτινοβολία UV, η υψηλή υγρασία και οι θερμικοί κύκλοι,
- ISOS 229 που καλύπτει τις δοκιμές των ηλιακών στοιχείων με βάση τους περοβσκίτες.

Τα πρωτόκολλα ISOS είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της απόδοσης τόσο των συμβατικών όσο και των αναδυόμενων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Για τις αναδυόμενες τεχνολογίες, συχνά εφαρμόζονται και πρόσθετες μέθοδοι, όπως επιταχυμένες δοκιμές γήρανσης, υψηλής ανάλυσης απεικόνιση και δοκιμές σταθερότητας.

3.3 Δοκιμές Θερμικής Καταπόνησης και Ανάλυσης

Οι δοκιμές θερμικής καταπόνησης είναι σημαντικές για την αξιολόγηση της σταθερότητας και της διάρκειας ζωής των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Δοκιμές θερμοκρασίας και υγρασίας : Προσομοιώνουν μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των ηλιακών στοιχείων σε ακραίες συνθήκες.

- Υπέρυθρη θερμογραφία : Εντοπίζει θερμές περιοχές ή άνιση θέρμανση στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
 - Δοκιμές εύρεσης θερμοκρασιακών συντελεστών : Αξιολογούν πώς μεταβάλλονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη θερμοκρασία.
 - Ανάλυση απαγωγής θερμότητας : Δείχνει πόσο αποτελεσματικά μπορεί το Φ/Β στοιχείο/πλαίσιο να αποβάλει τη θερμότητα για να αποτρέψει την αύξηση θερμοκρασίας
- Ειδικές τεχνικές για τις αναδυόμενες τεχνολογίες περιλαμβάνουν:
- Δοκιμές αντοχής στη θερμότητα
 - Θερμικοί κύκλοι και δοκιμές σταθερότητας

3.4 Διεθνή Πρότυπα Δοκιμών της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC)

Η IEC έχει καθιερώσει σημαντικά πρότυπα για τη μέτρηση και τις δοκιμές φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, εξασφαλίζοντας την απόδοσή τους, την ασφάλεια και την αξιοπιστία τους:

- **IEC 61215** : Αφορά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια από κρυσταλλικό πυρίτιο και καλύπτει τις δοκιμές για θερμικούς κύκλους, θέρμανσης-ψύξης, μηχανικές καταπονήσεις και υποβάθμιση λόγω υψηλής τάσης και υγρασίας (PID testing).
- **IEC 61646** : Στοχεύει σε λεπτού υμενίου φωτοβολταϊκά πλαίσια και περιλαμβάνει αντίστοιχες δοκιμές.
- **IEC 61853** : Αξιολογεί την ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, ακτινοβολία και γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

4.1 Συνεχής καταγραφή μετεωρολογικών συνθηκών στο Φ/Β πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την διάρκεια ζωής αλλά και την παραγωγή Φ/Β στοιχείων είναι η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μετρολογικού σταθμού σε κάθε Φ/Β πάρκο.

Το ηλιακό πάρκο του της ερευνητικής ομάδας NANO@HMU στο οποιο θα ενσωματωθούν τα Φ/β 3^{ης} γενιάς που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο, είναι εξοπλισμένο με μετεωρολογικό σταθμό προκειμένου να παρακολουθεί τις καιρικές συνθήκες του περιβάλλοντος γενικά και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Ο μετεωρολογικός σταθμός που είναι εγκατεστημένος είναι ο CR1000X από την Campbell Scientific που είναι μια συσκευή χαμηλής κατανάλωσης που μετρά αισθητήρες, αναλύει δεδομένα, ελέγχει εξωτερικές συσκευές και αποθηκεύει δεδομένα και προγράμματα σε ενσωματωμένη. Τα ηλεκτρονικά είναι θωρακισμένα με RF από ένα μοναδικό σφραγισμένο, ανοξειδωτο κάνιστρο. Ένα ρολόι με υποστήριξη μπαταρίας εξασφαλίζει ακριβή μέτρηση του χρόνου.

Επιπλέον, είναι εξοπλισμένο με μια ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού τύπου BASIC που υποστηρίζει ρουτίνες επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων. Σε αυτήν την πλακέτα είναι συνδεδεμένοι αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν:

- 4 x αισθητήρες θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείων
- 1x αισθητήρα θερμοκρασίας αέρα
- 1 x πυρόμετρο(καταγραφή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας)
- 1 x ανεμόμετρο(ταχύτητα /προσανατολισμός αέρα
- 1 x αισθητήρα υγρασίας
- 1x βαρόμετρο

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες καταγράφονται και αποθηκεύονται με διαστήματα 1 λεπτού, 5 λεπτών, 10 λεπτών, μίας ώρας και μίας ημέρας.

Τα διαστήματα δείχνουν τη μέση τιμή των μετρήσεων που ελήφθησαν στη χρονική περίοδο που αφορούν κάθε μία από αυτές αντίστοιχα.

4.2 Μελέτη διάρκειας ζωής ΦΒ και ανάλυση Post-mortem σε εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος επιτήρησης Φ/Β στοιχείων για την μελέτη της διάρκειας ζωής τους είναι οι καμπύλες I-V. Στο παρόν έργο θα χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση με τον εργαστηριακό εξοπλισμό που περιλαμβάνει ηλεκτρονικά φορτία ικανά να μετρήσουν οργανικά Φ/Β στοιχεία και

στοιχεία από περοβσκίτη μικρής και μεγάλης κλίμακας. Η μεθοδολογία καταγραφής που έχει επιλεχθεί εναρμονίζεται πλήρως με τα πρωτόκολλα **ISOS-O-2 & ISOS-L-2**.

Το ΕΛΜΕΠΑ έχει προβεί στις απαραίτητες ενέργειες για την εγκατάσταση συγκεκριμένων μετρητικών οργάνων που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις για την αποτελεσματική αξιολόγηση των δειγμάτων που θα κατασκευαστούν στο πλαίσιο του έργου. Πιο συγκεκριμένα εγκαταστάθηκαν στο μηχάνημα της PV-BLOCKS (Εικόνα 7) τα κατάλληλα ηλεκτρονικά φορτία (Loads) με σκοπό να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις αναφορικά με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (Ρεύμα Βραχυκύκλωσης , Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος , Αποδιδόμενη Ισχύς).



Εικόνα 7 Μετρητικό σύστημα της PV-BLOCKS για την καταγραφή καμπυλών ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Μέσω της τεχνικής καταγραφής των $i-v$ καμπυλών μπορούμε να εξάγουμε σημαντικές πληροφορίες, όπως τα μεγέθη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός στοιχείου τα οποία είναι :

- Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})
- Σημείο μέγιστης ισχύος (MPP)
- Παράγων πλήρωσης (FF)

Η παρατήρηση των μειώσεων των παραπάνω στοιχείων είναι συνυφασμένες με μηχανισμούς υποβάθμισης των Φ/Β στοιχείων και βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τα αίτια της μείωσης τους.

Με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού όπως αυτό που περιγράφεται στο Παράρτημα Α θα γίνει η καταγραφή των καμπυλών με διαφορετική κατεύθυνση σάρωσης (ορθή-ανάστροφη/forward-reverse) ώστε σε όλη την διάρκεια της ζωής των Φ/Β να είναι δυνατή η καταγραφή τυχόν μεταβολής που παρουσιάζει η διαφορά της μέγιστης παραγόμενης ισχύος (hysteresis).

Επίσης με την χρήση λογισμικού μπορεί να γίνει έλεγχος της κατάστασης που θα βρίσκονται τα ΦΒ στοιχεία μεταξύ των μετρήσεων. (κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος / κατάσταση βραχυκυκλώματος / κατάσταση ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος) .

Τέλος στο πλαίσιο της διερεύνησης της σταθερότητας των Φ/Β τεχνολογίας περοβοσκίτη χρησιμοποιείται η τεχνική της φύλαξης τους σε συνθήκες σκότους σύμφωνα με το πρωτόκολλο **ISOS-D-1**. Με αυτήν την τεχνική μπορούμε να εντοπίσουμε το αν και σε ποιο βαθμό υπάρχει δυνατότητα επαναφοράς των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός Φ/Β στοιχείου μετά από μερική υποβάθμιση της απόδοσης του.

4.3 Οπτική/ θερμική/ LBIC imaging παρατήρηση των ΦΒ στοιχείων

Μια ακόμα σημαντική τεχνική επιτήρησης κατά την διάρκεια ζωής των Φ/Β στοιχείων είναι η απεικόνιση των δειγμάτων φωτογραφική & θερμική. Με την φωτογραφική παρατήρηση που θα χρησιμοποιηθεί στο έργο μπορούμε να εντοπίσουμε ελαττώματα, εμφανή στο γυμνό μάτι, τα οποία παρουσιάζονται είτε από την αρχή λόγω κατασκευαστικού προβλήματος είτε κατά την διάρκεια ζωής τους. Με την θερμική απεικόνιση είναι εφικτό να διαγνωστούν προβλήματα τα οποία δεν φαίνονται με γυμνό μάτι όπως είναι τα θερμά σημεία πάνω στο στοιχείο ή μια «χαλαρή» συνδεσμολογία εσωτερικά σε ένα Φ/Β πλαίσιο. Τέλος σαρώνοντας περιοδικά τα στοιχεία με την τεχνική LBIC imaging παρατηρούμε την απορρόφηση που προκαλείται από δέσμη φωτός/laser και είναι εφικτό να διακρίνουμε μείωση απόκρισης του ρεύματος σε συγκεκριμένες περιοχές του ΦΒ στοιχείου.

4.4 Πειράματα θερμοκρασιακής εξάρτησης ΦΒ περοβοσκίτη

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας από Φ/Β στοιχεία είναι η θερμοκρασία. Αυτό καθιστά κρίσιμη την μελέτη εξάρτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός Φ/Β στοιχείου καθώς και την σύγκριση τους με άλλες εμπορικά διαθέσιμες Φ/Β τεχνολογίες.

Στο πλαίσιο των πειραμάτων επιταχυμένης γήρανσης των Φ/Β θα πραγματοποιηθούν πειράματα κύκλων θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα εύρη (20-65 °C) σύμφωνα με το πρωτόκολλο **ISOS-LT-1**

4.5 Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης EIS (BIAS & Temp)

Ένας τρόπος για να κατανοήσουμε τις ηλεκτροχημικές ή ηλεκτρικές διαφορές σε ένα σύστημα είναι η μέτρηση της χωρητικότητας με φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής σύνθετης αντίστασης (EIS). Με αυτή την τεχνική είναι εφικτό να διακρίνουμε μεταβολές που αφορούν εσωτερικά τα στοιχεία όπως σφάλματα μεταξύ των διεπαφών των στρωμάτων ενός Φ/Β 3^{ης} γενιάς.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται από το ΕΛΜΕΠΙΑ για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μέτρησης χωρητικότητας είναι ο «Agilent B1500A Semiconductor Device Analyser»

5. Συμπέρασμα και προοπτικές

Αυτό το παραδοτέο αφορά την ενσωμάτωση των νέων Φ/Β που θα παραχθούν στο παρόν έργο στο ηλιακό πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ και τα πρωτοκόλλα μετρήσεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, τα οποία σχεδιάστηκαν για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία 3^{ης} γενιάς που θα παραχθούν στο έργο.

Συμπερασματικά έγινε η αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής του φωτοβολταϊκού πάρκου, ώστε να μπορούν να μετρηθούν σε εξωτερικές συνθήκες διαφορετικού μεγέθους Φ/Β, από στοιχεία με μικρή ενεργή επιφάνεια (μερικών cm²) μέχρι πλαίσια μεγάλης επιφάνειας (μερικών m²) με διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (διαφορετικά ρεύματα και τάσεις). Τέλος μελετήθηκαν διαφορετικοί αλγόριθμοι εύρεσης μέγιστου σημείου λειτουργίας (Maximum Power Point, MPP) και εξαγωγής ενέργειας για να εφαρμοστούν στις διάφορες Φ/Β τεχνολογίες ανάλογα και με τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια της μέτρησης.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα που θα συλλεχθούν από το ηλιακό πάρκο θα αποθηκευτούν σε μια ειδική βάση δεδομένων η οποία θα αναπτυχθεί από το ΕΛΜΕΠΑ σύμφωνα με τα πρότυπα FAIR και στην παρούσα κατάσταση συλλέγονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του απαραίτητου πληροφοριακού συστήματος.

Παρόλο που μέχρι στιγμής στάλθηκαν στο ΕΛΜΕΠΑ μόνο προκαταρκτικά δείγματα δοκιμών οργανικών Φ/Β από τους συνεργάτες του έργου το ΕΛΜΕΠΑ θα χρησιμοποιήσει αυτές τις πρώτες μετρήσεις για να βαθμονομήσει και να οριστικοποιήσει τις εγκαταστάσεις εσωτερικών και εξωτερικών δοκιμών που είναι αφιερωμένες στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των νέων προτεινόμενων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών.

Ολόκληρο το ηλιακό πάρκο, το οποίο περιλαμβάνει τα τοποθετημένα φωτοβολταϊκά στοιχεία και πλαίσια, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως MPPT, τις ηλεκτρικές συνδέσεις συλλογής δεδομένων και τον μετεωρολογικό σταθμό, έχει συναρμολογηθεί και βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία.

Το ΕΛΜΕΠΑ θα συνεχίσει την έρευνα για τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα και τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό αυτών των προκαταρκτικών Φ/Β στοιχείων σε εξωτερικούς χώρους, ενώ αναμένει νέα στοιχεία και μονάδες κατά τη διάρκεια του έργου.

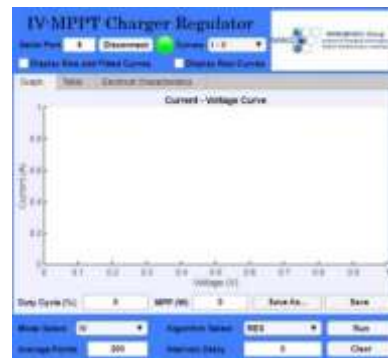
Παράρτημα Α : Ηλεκτρονικό σύστημα, λογισμικό και αλγόριθμοι IV -MPP

Σκοπός μίας συσκευής MPPT είναι να εντοπίζει το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP) σε πραγματικό χρόνο, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση μετατροπής ισχύος (Power Conversion Efficiency - PCE) των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

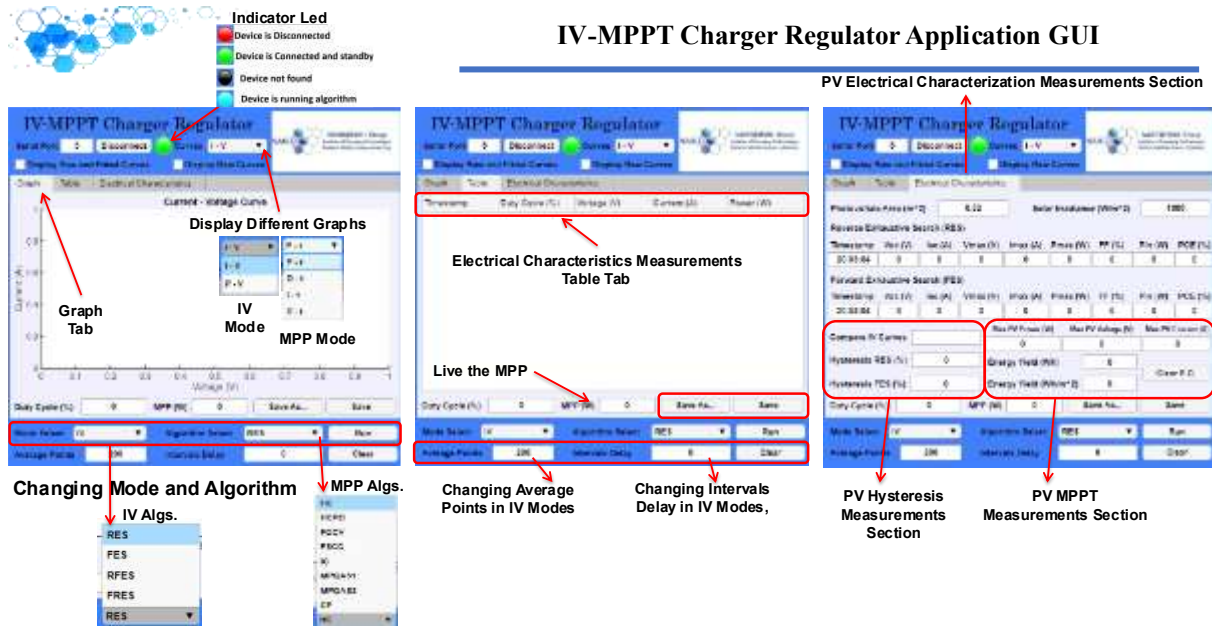
Στο πλαίσιο του έργου, το ΕΛΜΕΠΑ ανέπτυξε μια ηλεκτρονική συσκευή με ένα ενσωματωμένο ιχνηλάτη καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V tracer), ένα MPP tracker και ρυθμιστή φόρτισης για τη μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την εξαγωγή του σημείου μέγιστης ισχύος χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους παρακολούθησης μέγιστης ισχύος.

Η συσκευή ρυθμίζει το φορτίο ώστε ο MPPT να βρίσκει το αντίστοιχο εσωτερικό φωτοβολταϊκό φορτίο υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, σκίαση και κλίση, εξασφαλίζοντας συνεχή εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος. Η ρύθμιση του φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μιας μονάδας μικροελεγκτή (MCU), μέσω αλλαγών στο σήμα PWM.

Για το έργο, το ηλεκτρονικό κύκλωμα αναβαθμίστηκε ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα των μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα νέα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τάση, ρεύμα) των νέων οργανικών και περοβσκιτικών στοιχείων.



Εικόνα 8 α. Ηλεκτρονικό σύστημα για ανιχνευτή IV-MPP που παρουσιάζεται στον Core 2 **b.** Γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) του ρυθμιστή φορτιστή IV-MPPT



Εικόνα 9: Ανάλυση GUI του ρυθμιστή φορτιστή IV-MPPT.

Για τη λειτουργία του ηλεκτρονικού συστήματος έχει αναπτυχθεί ένα λογισμικό με την κατάλληλη γραφική διεπαφή (GUI) όπως φαίνεται στην εικόνα 8.

Στο επάνω αριστερό μέρος του GUI εμφανίζεται η σειριακή θύρα της συνδεδεμένης συσκευής και η ενδεικτική λυχνία που δείχνει την κατάσταση σύνδεσης (συνδεδεμένη/αποσυνδεδεμένη/δεν βρέθηκε/λειτουργεί).

Το GUI περιέχει 3 καρτέλες: την καρτέλα Γράφημα, την καρτέλα Πίνακας και την καρτέλα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά. Το λογισμικό έχει τρεις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας IV, MPP, PVBR (Φωτοβολταϊκή Ανάγνωση Συμπεριφοράς). Σε κάθε λειτουργία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικούς αλγόριθμους.

Επίσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει πόσες μετρήσεις θα λάβει η συσκευή στο ίδιο σημείο της καμπύλης ρεύματος -τάσης (IV), ενώ ολόκληρη η καμπύλη δημιουργείται από 256 σημεία και κάθε σημείο περιέχει αντίστοιχα τον επιλεγμένο μέσο όρο. Στην καρτέλα Γράφημα εμφανίζονται καμπύλες σε πραγματικό χρόνο και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετική κατεύθυνση σάρωσης (από βραχυκύκλωμα προς ανοιχτοκύκλωμα - ορθή φορά, και το αντίστροφο από ανοιχτό κύκλωμα προς βραχυκύκλωμα - ανάστροφη φορά),

Τα τελικά αποτελέσματα εμφανίζονται στην καρτέλα Πίνακας, όπου η μέτρηση του αλγορίθμου εμφανίζεται μετά το τέλος κάθε αλγορίθμου και μπορεί να αποθηκευτεί από το κουμπί «Αποθήκευση» ή «Γρήγορη αποθήκευση».

Παράλληλα, στην καρτέλα ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εμφανίστηκαν όλα τα δεδομένα που μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν από το λογισμικό ως V_{oc} (V), I_{sc} (A), συντελεστής πλήρωσης (%), PCE(%), υστέρηση(%), Ενεργειακή απόδοση(kWh) αντίστοιχα με τον αλγόριθμο που δίνεται.

Ο ρυθμιστής φορτιστή IV-MPPT περιέχει διαφορετικές λειτουργίες και 14 αλγόριθμους συνολικά.

Οι αλγόριθμοι MPPT ταξινομούνται σε:

- Hill Climbing Perturb and Observe (HCPO ή P&O)
- Αυξημένης αγωγιμότητα (IC ή INC)
- Κλασματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (Τάση FOCV ή O.C.)
- Κλασματικό ρεύμα βραχυκυκλώματος (FSCC ή ρεύμα S.C.)
- Αλγόριθμος αναζήτησης κβαντικής περιοχής μέγιστης ισχύος (MPQAS).

Η λειτουργία IV περιλαμβάνει (4 αλγόριθμους):

- Εξαντλητική αναζήτηση ανάστροφης φοράς (RES) που σαρώνει από ανοιχτό κύκλωμα σε βραχυκύκλωμα
- Εξαντλητική Αναζήτηση ορθής φοράς (FES) που σαρώνει από βραχυκύκλωμα σε ανοιχτό κύκλωμα
- Εξαντλητική Αναζήτηση ανάστροφής και ορθής φοράς (RFES). Πρώτα εκτελείτε σάρωση ανάστροφης φοράς (RES) από ανοιχτό κύκλωμα σε βραχυκύκλωμα και, στη συνέχεια, αμέσως ή μετά από παραμονή σε βραχυκύκλωμα για επιλεγμένη καθυστέρηση (επιλέγονται συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα), εκτελώντας τη σάρωση FES από βραχυκύκλωμα σε ανοιχτό κύκλωμα.
- Εξαντλητική Αναζήτηση ορθής και ανάστροφης φοράς (FRES), Πρώτα εκτελείτε σάρωση ορθής φοράς (FES) από βραχυκύκλωμα σε ανοιχτό κύκλωμα και στη συνέχεια αμέσως ή μετά από παραμονή σε βραχυκύκλωμα για επιλεγμένη καθυστέρηση (επιλέγονται συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα), εκτελώντας το RES από ανοιχτό κύκλωμα σε βραχυκύκλωμα.

Οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έρευνα του φαινομένου της υστέρησης που είναι η απόκλιση της μέγιστης ισχύος (MPP) μεταξύ των σαρώσεων ορθής και ανάστροφης φοράς, λόγω σιδηροηλεκτρικής πόλωσης, παγίδευσης / αποπαγίδευσης φορέων φορτίου και μεταφορά ιόντων στα υλικά των περοβσκίτικων Φ/Β διατάξεων.

Έχει παρατηρηθεί ότι στις μετρήσεις από Φ/Β 3^{Hc} γενιάς το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην ορθή σάρωση είναι συνήθως μεγαλύτερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσης ανάστροφης σάρωσης και αυτό συμβαίνει γιατί στην ανάστροφη σάρωση υπάρχει συσσώρευση ηλεκτρονίων που οδηγούν σε χωρητικά φαινόμενα αποθήκευσης φορτίων στα φωτοβολταϊκά στοιχεία με αποτέλεσμα υψηλότερο ρεύμα βραχυκυκλώματος.

Σε προηγούμενα έργα είχαν αναπτυχθεί τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι για την παρακολούθηση mpv. Οι λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία².

Αναφορές

- ¹ Khenkin, M. V. et al. Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures. Nat Energy 5, 35–49 (2020).
2. S Pescetelli, A Agresti, G Viskadourous, S Razza, K Rogdakis, et al, Integration of two-dimensional materials-based perovskite solar panels into a stand-alone solar farm, Nature Energy 7 (7), 597-607