

Μετρήσεις Φ/Β πλαισίων και στοιχείων, ετήσια απόδοση Φ/Β πλαισίων

Γ. Νικολετάτος, Α. Κυρίτσης, Γ. Χαλαμπαλάκης, Ε. Ρίκος, Ευ. Τσελεπής

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας

Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Τηλ. +30.210.6603373, fax +30.210.6603318

inikol@cres.gr, kyritsis@cres.gr, ghala@cres.gr, vrikos@cres.gr, stselep@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Η αλματώδης ανάπτυξη των Φ/Β εφαρμογών κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών ανέδειξε τη σπουδαιότητα της συστηματικής αξιολόγησης τόσο των διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β πλαίσια, όσο και των διαφόρων εμπορικών Φ/Β προϊόντων, προκειμένου τα Φ/Β συστήματα να συνδράμουν απρόσκοπτα στην ηλεκτροπαραγωγή διαδικασία της χώρας μας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και αναλύεται η υποδομή και η τεχνογνωσία του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ στον συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, ενώ παράλληλα παρατίθενται ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα από τη διαδικασία αξιολόγησης εμπορικών Φ/Β προϊόντων. Αναλυτικότερα, όσον αφορά την αξιολόγηση των Φ/Β πλαισίων, θα παρουσιασθεί η μέθοδος καταγραφής της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης-τάσης (IV) ενός Φ/Β πλαισίου σε φυσικό ηλιακό φως και ο προσδιορισμός της ονομαστικής ισχύος του Φ/Β πλαισίου μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων (μετρήσεων). Επιπλέον, παρουσιάζεται η υποδομή για την αξιολόγηση Φ/Β στοιχείων σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες με τη χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού (ηλιακός προσομοιωτής) όπως επίσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται.

Επιπρόσθετα, στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάδειξη της διερεύνησης της μακροχρόνιας παρακολούθησης της παραγωγικής ικανότητας ενός Φ/Β πλαισίου στις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες της γεωγραφικής περιοχής στην οποία πραγματοποιείται η εγκατάστασής του, με στόχο τον προσδιορισμό της ενεργειακής του απόδοσης σε ετήσια βάση. Για το σκοπό αυτό θα παρουσιαστεί η εργαστηριακή υποδομή που έχει αναπτυχθεί για την καταγραφή τόσο των χαρακτηριστικών ηλεκτρικών μεγεθών των Φ/Β πλαισίων, όσο και των μετεωρολογικών παραμέτρων ταυτοχρόνως. Συγκεκριμένα, μέσω της εν λόγω υπηρεσίας επιδιώκεται ο υπολογισμός της μέγιστης παραγωγικής ικανότητας των υπό δοκιμή Φ/Β πλαισίων (κατά τη διάρκεια ενός έτους) μέσω της καταγραφής της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης-τάσης (ανά τακτά μικρά χρονικά διαστήματα π.χ. του ενός λεπτού), έτσι ώστε η παραγωγική ικανότητα των Φ/Β πλαισίων να παραμένει ανεπηρέαστη από την τοπολογία των ηλεκτρονικών μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροπαραγωγικές εφαρμογές. Η συγκεκριμένη εφαρμογή ακολουθεί κοινή διαδικασία και προδιαγραφές, όπως αυτές έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Δικτύου Αριστείας DER-Lab, όπου συμμετέχουν τα σπουδαιότερα ερευνητικά Κέντρα της Ευρώπης στο αντικείμενο αυτό, κάτω από τον συντονισμό του Fraunhofer IWES Γερμανίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική έξοδος ενός Φ/Β πλαισίου στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας χαρακτηρίζεται από την καμπύλη έντασης-τάσης. Το σημείο της καμπύλης για το οποίο το γινόμενο έντασης επί τάση είναι μέγιστο καθορίζει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ η οποία δύναται να αποδοθεί

από το Φ/Β πλαίσιο στις αντίστοιχες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η ονομαστική ισχύς του Φ/Β πλαισίου ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς που προκύπτει από την καμπύλη που αντιστοιχεί στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής, ήτοι ακτινοβολία 1000W/m^2 , θερμοκρασία 25°C και φάσμα που αντιστοιχεί σε συντελεστή αέριας μάζας AM1.5. Ο έλεγχος και η αξιολόγηση ενός Φ/Β στοιχείου ή πλαισίου προϋποθέτει την μέτρηση της καμπύλης έντασης-τάσης, η οποία είναι μία σύνθετη μέτρηση καθώς επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η υποδομή και η τεχνογνωσία του ΚΑΠΕ στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, ενώ παράλληλα αναδεικνύονται (και αναπτύσσονται) ορισμένα θέματα τα οποία σχετίζονται με τις δυσκολίες της ακριβούς μέτρησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β μέσω της καταγραφής της καμπύλης έντασης-τάσης.

2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Το μέγεθος ενός Φ/Β συστήματος, όπως και το ύψος της δαπάνης το οποίο καλείται να καταβάλει ένας επενδυτής, υπολογίζεται βάσει των ονομαστικών τιμών ισχύος (τις οποίες παρέχουν οι κατασκευαστές) τω Φ/Β πλαισίων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε μια γραμμή παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών διαδοχικών Φ/Β πλαισίων, οι κατασκευαστές αυτών συνήθως δίδουν ένα εύρος ανοχής εντός του οποίου κυμαίνεται η ονομαστική τιμή της ισχύος κάθε Φ/Β πλαισίου της ίδιας γραμμής παραγωγής (π.χ. $\pm 3\%$). Αρκετές φορές ωστόσο, έχει παρατηρηθεί στην πράξη ασυμφωνία μεταξύ της τιμής της ονομαστικής ισχύος των Φ/Β πλαισίων (όπως αυτή προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές) και αυτής που υπολογίζεται βάσει μετρήσεων σε μια Φ/Β εγκατάσταση [1-3]. Η απόκλιση αυτή, καθιστά σκόπιμη σε πολλές περιπτώσεις την μέτρηση της ονομαστικής ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου (συνήθως η μετρούμενη τιμή είναι μικρότερη αυτής που αναγράφουν τα πλαίσια).

Για τη μέτρηση της ονομαστικής ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου, πρέπει να καταγραφεί η καμπύλη έντασης-τάσης σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής, ενώ ο συνηθέστερος τρόπος καταγραφής αυτής είναι με την χρήση ηλιακών προσομοιωτών. Ο ηλιακός προσομοιωτής είναι ένα εργαστηριακό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει έναν θάλαμο που διαθέτει μία πηγή παραγωγής φωτός (λαμπτήρας ειδικού τύπου και αντίστοιχου φάσματος με αυτού του ηλιακού φωτός), καθώς και τον απαραίτητο εξοπλισμό για την καταγραφή της καμπύλης έντασης-τάσης ενός Φ/Β πλαισίου (όπως ένα ηλεκτρονικό ελεγχόμενο φορτίο και το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των μετρήσεων). Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, όσον αφορά το είδος του λαμπτήρα (συνεχούς έντασης, παλμού, πολλαπλών παλμών) της δυνατότητας ελέγχου θερμοκρασίας, καθώς και προδιαγραφών [4]. Το πλεονέκτημα της χρήσης του ηλιακού προσομοιωτή έγκειται στο ότι καταγράφει την καμπύλη σε ελεγχόμενες συνθήκες, οι οποίες πολλές φορές είναι κοντά στις πρότυπες συνθήκες ώστε να απαιτούνται μικρές υπολογιστικές διορθώσεις. Λόγω της πολυπλοκότητάς του όμως και του τεχνητού φωτισμού που χρησιμοποιεί, είναι δυσχερής η χρήση του και η προσαρμογή του όταν απαιτείται να αξιολογηθούν Φ/Β πλαίσια διαφορετικής τεχνολογίας ή ακόμα και μόνο διαφορετικών διαστάσεων. Ενδεικτικά, οι δυσκολίες για τη χρήση του ηλιακού προσομοιωτή προκύπτουν από τη χρήση τεχνητού φωτισμού και συνδέονται με την ανομοιομορφία της έντασης του φωτός, τη διαφορά του φάσματος του λαμπτήρα συγκριτικά με αυτό του ηλιακού φωτός και την μεταβολή των χαρακτηριστικών της λάμπας με το χρόνο. Επίσης, προκειμένου ο εν λόγω εξοπλισμός να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση Φ/Β πλαισίων διαφορετικής τεχνολογίας, απαιτείται η εφαρμογή μιας ειδικής και επίπονης διαδικασίας για την ρύθμιση του εξοπλισμού και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα (έτσι ώστε να περιορίζεται κατά το δυνατόν περισσότερο η επιρροή των παραπάνω αρνητικών παραγόντων στην αβεβαιότητα των μετρήσεων). Έτσι στην πράξη η χρήση των ηλιακών προσομοιωτών ενδείκνυται περισσότερο στις περιπτώσεις όπου απαιτείται η μέτρηση ενός συγκεκριμένου τύπου πλαισίου σε ελεγχόμενες και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Η παραπάνω εφαρμογή θα μπορούσε να είναι η περίπτωση μιας γραμμής παραγωγής, όπου ο ηλιακός προσομοιωτής κατά την αρχική εγκατάσταση ρυθμίζεται και βαθμονομείται, ενώ παράλληλα παρέχεται και η δυνατότητα συχνού ελέγχου της ορθής λειτουργίας του εξοπλισμού με τη χρήση πλαισίων αναφοράς, τα οποία αγοράζονται και φυλάσσονται ειδικά για

το σκοπό αυτό. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι το κόστος αγοράς των ηλιακών προσομοιωτών είναι ιδιαίτερα υψηλό, γίνεται κατανοητό ότι η γρήγορη αντικατάσταση μιας τέτοιας επένδυσης δεν είναι εύκολη υπόθεση, με άμεσο αποτέλεσμα οι παλαιότεροι προσομοιωτές να μην καλύπτουν τις απαιτήσεις ομοιομορφίας της φωτεινής έντασης για τα περισσότερα σύγχρονα Φ/Β πλαίσια, καθώς η τάση της αγοράς είναι προς πλαίσια μεγαλύτερης επιφανείας. Η ανομοιομορφία της φωτεινής έντασης στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 5%, ώστε να μην επηρεάζεται σημαντικά η ορθότητα των μετρήσεων στην περιοχή της μέγιστης ισχύος της καμπύλης. Σημειώνεται τέλος ότι στα καλύτερα διεθνώς αναγνωρισμένα εργαστήρια η ακρίβεια της μέτρησης της ονομαστικής ισχύος κυμαίνεται περίπου στο 2.5%.

Στο εργαστήριο Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ η μέτρηση της ονομαστικής ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να γίνει τόσο με τη χρήση ηλιακού προσομοιωτή όσο και με τη μέτρηση της καμπύλης έντασης-τάσης με φορητό όργανο σε φυσικό ηλιακό φως. Στην δεύτερη περίπτωση οι συνθήκες της μέτρησης δεν είναι ελεγχόμενες και δεν αντιστοιχούν στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις πρέπει να αναχθούν με κατάλληλους μαθηματικούς υπολογισμούς σε συνθήκες πρότυπης δοκιμής. Για την αναγωγή μιας καμπύλης που έχει ληφθεί σε τυχαίες συνθήκες, σε συνθήκες πρότυπης δοκιμής, υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες και σε πολλά εργαστήρια χρησιμοποιούνται διάφορες παραλλαγές. Στο ΚΑΠΕ η αναγωγή γίνεται με επεξεργασία των μετρήσεων σύμφωνα με τις εξισώσεις που προκύπτουν από το πρότυπο IEC 60891 [5].

Αναλυτικότερα, κάθε σημείο I_1, V_1 της μετρηθείσας καμπύλης σε συνθήκες ακτινοβολίας E_1 (όπως μετρείται από αισθητήρα αναφοράς της ίδιας τεχνολογίας με το μετρούμενο πλαίσιο) και θερμοκρασίας T_1 ανάγεται σε αντίστοιχο σημείο I_2, V_2 της καμπύλης σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής με τις επόμενες μαθηματικές εξισώσεις:

$$I_2 = I_1 + I_{1,sc} \cdot (1000/E_1 - 1) + a \cdot (25 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s \cdot (I_2 - I_1) - K \cdot I_2 \cdot (25 - T_1) + b \cdot (25 - T_1) \quad (2)$$

Όπου $I_{1,sc}$ είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της μετρηθείσας καμπύλης, R_s η αντίσταση σειράς του πλαισίου, a ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε $A/^\circ C$, b ο θερμοκρασιακός συντελεστής της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε $V/^\circ C$ και K ένας συντελεστής διόρθωσης της καμπύλης σε $Ohms/^\circ C$.

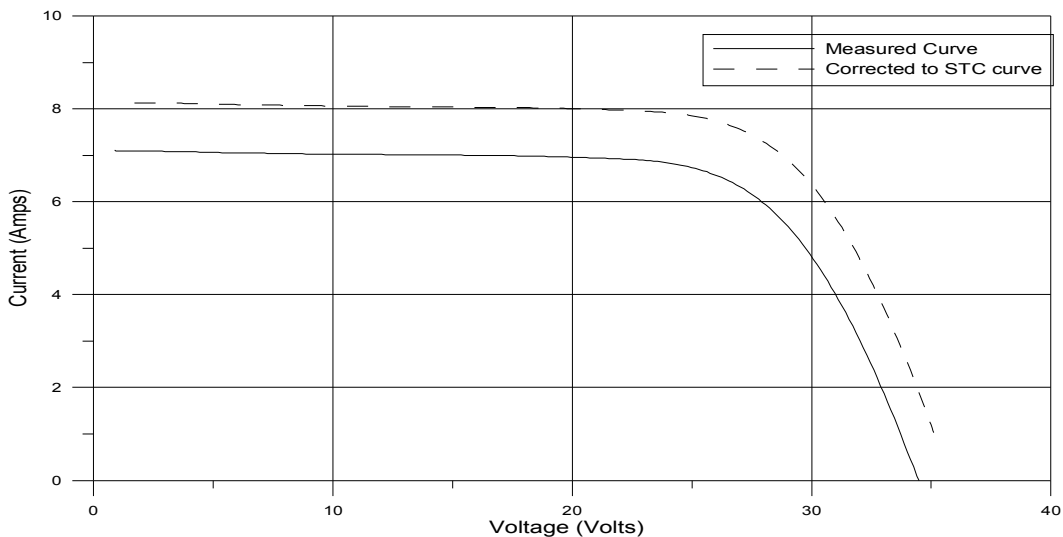
Προκειμένου τα σφάλματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή των παραπάνω μαθηματικών εκφράσεων να διατηρηθούν σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, θα πρέπει η μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης-τάσης (με τον παραπάνω εξοπλισμό) να γίνεται όταν δεν υπάρχουν σύννεφα πλησίον του ήλιου και η τιμή της ακτινοβολίας να είναι τουλάχιστον ίση με 800 W/m^2 . Λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδος γίνεται εμφανές ότι καθ'όλην τη διάρκεια του έτους υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης των μετρήσεων σε ηλιακό φως σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράψαμε προηγουμένως.

Ο φορητός εξοπλισμός που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμος στις περιπτώσεις όπου η αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου πρέπει υποχρεωτικά να γίνει στην περιοχή όπου είναι εγκατεστημένο το Φ/Β πάρκο και γι αυτό προτιμήθηκε να παρουσιαστεί έναντι του ηλιακού προσομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριό μας.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται φωτογραφίες από τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό της ονομαστικής ισχύος σε Φ/Β πλαίσια του εμπορίου.



Σχήμα 1: Φωτογραφία του εξοπλισμού για τη μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης-τάσης ενός Φ/Β πλαισίου με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός.



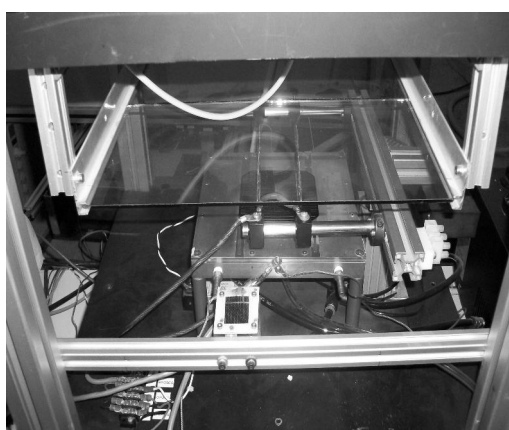
Σχήμα 2: Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων και της διόρθωσης αυτών σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60891.

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

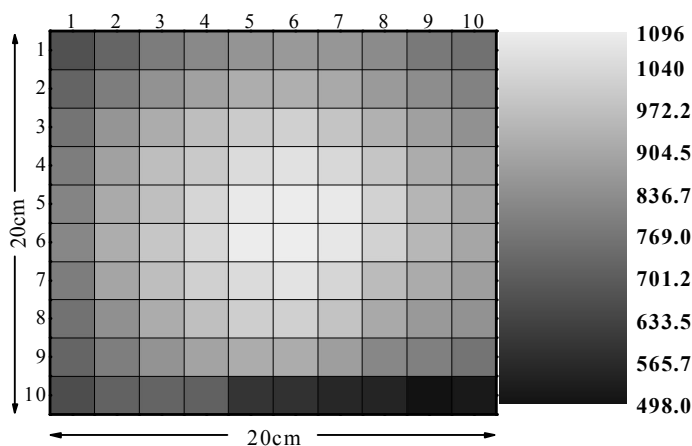
Για την αξιολόγηση Φ/Β στοιχείων, κυρίως κρυσταλλικού τύπου, υπάρχει διαθέσιμος στο ΚΑΠΕ σχετικός εξοπλισμός. Η μέτρηση των μεμονωμένων Φ/Β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου γίνεται σε ηλιακό προσομοιωτή, χρησιμοποιώντας μια ειδικά διαμορφωμένη βάση (Σχ. 3α). Με τον τρόπο αυτό το Φ/Β στοιχείο συνδέεται σε ένα ελεγχόμενο ηλεκτρικό φορτίο, ενώ παράλληλα μετρούνται και καταγράφονται τόσο οι ηλεκτρικές τιμές εξόδου αυτού όσο και η ένταση της ακτινοβολίας και η θερμοκρασία της επιφάνειας του στοιχείου μέσω ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος συλλογής δεδομένων. Τέλος ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται ένας ειδικός λαμπτήρας συνεχούς έντασης. Ο αρχικός σχεδιασμός του ηλιακού προσομοιωτή (από την κατασκευάστρια εταιρεία) προέβλεπε τη μέτρηση Φ/Β στοιχείων των οποίων οι διαστάσεις δεν ξεπερνούσαν τα 100cm². Για να μπορέσει λοιπόν να καμφθεί ο συγκεκριμένος περιορισμός έτσι ώστε ο ηλιακός προσομοιωτής να

είναι πλήρως λειτουργικός και για στοιχεία μεγαλύτερων διαστάσεων, χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες παρεμβάσεις στο ηλεκτρικό φορτίο, στο σύστημα συλλογής ρεύματος ενώ παράλληλα διενεργήθηκε νέα βαθμονόμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια έδρασης του στοιχείου προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια στις πειραματικές μετρήσεις.

Αν και η λύση των δύο πρώτων προβλημάτων απαιτούσε μόνο την αύξηση των συλλεκτήριων αγωγών ρεύματος (ακίδες επαφής) και την αντικατάσταση του φορτίου με ένα καινούργιο μεγαλύτερης ισχύος, το πρόβλημα της ανομοιομορφίας δεν ήταν ιδιαίτερα εύκολο να ξεπεραστεί λόγω της αδυναμίας αναπροσαρμογής των γεωμετρικών διαστάσεων του θαλάμου του προσωμοιωτή. Για την αντιμετώπιση λοιπόν αυτού του προβλήματος, διενεργήθηκε νέα χαρτογράφηση της ακτινοβολίας επί της συνολικής επιφάνειας της βάσης ($20 \times 20 \text{ cm}^2$), σε ανάλυση $2 \times 2 \text{ cm}^2$ (100 τετραγωνάκια, Σχ. 3β). Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του θαλάμου του ηλιακού προσωμοιωτή μπορούμε να θεωρήσουμε χωρίς σημαντικό σφάλμα ότι σε μία “στοιχειώδη” επιφάνεια διαστάσεων $2 \times 2 \text{ cm}^2$ η ακτινοβολία είναι σχεδόν σταθερή. Συνεπώς, η πυκνότητα του ρεύματος σε κάθε “στοιχειώδη” επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου είναι ανάλογη της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτή. Επιπρόσθετα, συνυπολογίζοντας την αρχή λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων, συμπεραίνεται αφ’ ενός μεν ότι το συνολικό ρεύμα του Φ/Β στοιχείου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των “στοιχειωδών” επιφανειών και αφ’ ετέρου δε ότι η τιμή αυτού είναι ανάλογη της μέσης τιμής της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια που καταλαμβάνει το στοιχείο. Βέβαια, για την ακριβή εκτίμηση της μέσης τιμής της ακτινοβολίας απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή ομοιομορφίας αυτής για το σύνολο των “στοιχειωδών” περιοχών που καταλαμβάνει το υπό μελέτη Φ/Β στοιχείο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω αντιμετώπιση για την επίλυση του προβλήματος της ανομοιομορφίας μπορεί να εφαρμοσθεί για την περίπτωση των μεμονωμένων Φ/Β στοιχείων, αλλά όχι όμως και για την περίπτωση ενός πλαισίου με ανομοιόμορφο φωτισμό όπου το ρεύμα ενός στοιχείου επηρεάζει τις τιμές των ρευμάτων των υπολοίπων στοιχείων, λόγω της εν σειρά σύνδεσης αυτών.



(α)



(β)

Σχήμα 3: Η ειδικά διαμορφωμένη βάση για τη μέτρηση Φ/Β στοιχείων (α), και η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας (σε μονάδες W/m^2) πάνω στην βάση (β).

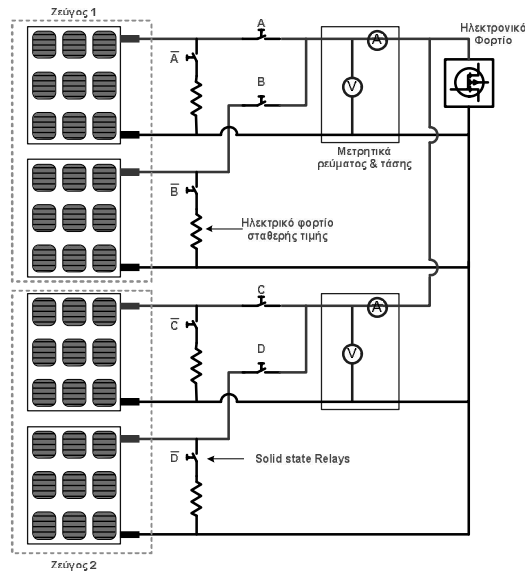
Ακολουθώντας την διαδικασία και τις διορθώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως, κατέστη εφικτή η χρήση του εν λόγω ηλιακού προσωμοιωτή για τη μέτρηση Φ/Β στοιχείων διαστάσεων 243.4 cm^2 . Μάλιστα, στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την αναβάθμιση του υπάρχοντος εξοπλισμού με αυτά ενός σύγχρονου ηλιακού προσωμοιωτή, οι διαφορές που προέκυψαν ήταν ελάχιστες επαληθεύοντας έτσι την ορθότητα της μεθοδολογίας βάσει της οποίας διενεργούνται οι μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β στοιχείων στο εργαστήριό μας.

4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΥΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού δικτύου εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων, DER-Lab (www.der-lab.net), το τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ ανέπτυξε ένα σύστημα διερεύνησης της μακρόχρονης λειτουργικής συμπεριφοράς των Φ/Β πλαισίων σε πραγματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια εργαστηριακή διάταξη η οποία καταγράφει αφ' ενός μεν τα χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη των Φ/Β πλαισίων (I_{SC} , I_{MPP} , V_{OC} , V_{MPP}) σε χρονικά διαστήματα των 15 δευτερολέπτων και αφ' ετέρου τις χαρακτηριστικές καμπύλες έντασης-τάσης με τη συμπλήρωση χρονικού διαστήματος ενός λεπτού. Επιπρόσθετα, για την απόκτηση μιας ολοκληρωμένης εικόνας της λειτουργικής συμπεριφοράς των πλαισίων, η διάταξη καταγράφει τόσο τη θερμοκρασία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου όσο και τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής στην οποία διεξάγονται οι μετρήσεις (θερμοκρασία περιβάλλοντος, άμεση, διάχυτη και ολική ακτινοβολία, ταχύτητα του ανέμου, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση).

Ο σκοπός των παραπάνω μετρήσεων είναι διττός. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται όχι μόνο η μελέτη της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές αλλά και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τους συντελεστές επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοικτού κυκλώματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα παράλληλης παρακολούθησης της λειτουργικής συμπεριφοράς δύο ζευγών Φ/Β πλαισίων ίδιων ή διαφορετικών χαρακτηριστικών, ελαχιστοποιώντας με αυτόν το τρόπο το απαιτούμενο ηλεκτρονικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Μάλιστα, έχοντας ως ζητούμενο την ανάπτυξη μιας γενικής διάταξης η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση Φ/Β πλαισίων διαφορετικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, παρέχεται η δυνατότητα προσαρμογής των κλιμάκων των μετρητικών διατάξεων στις τιμές των υπό δοκιμή πλαισίων με την προϋπόθεση βέβαια ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος δεν ξεπερνά τα 60V, το ρεύμα βραχυκύκλωσης τα 12A και η ισχύς του πλαισίου στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος τα 400W. Από μια άλλη οπτική γωνία, η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της ακρίβειας των μετρούμενων μεγεθών. Τέλος, επισημαίνεται ότι με κατάλληλη τροποποίηση του κυκλώματος ελέγχου, η εν λόγω διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση Φ/Β πλαισίων με μεγαλύτερες τιμές τάσης ανοικτού κυκλώματος (έως και 100V). Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται το γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων.



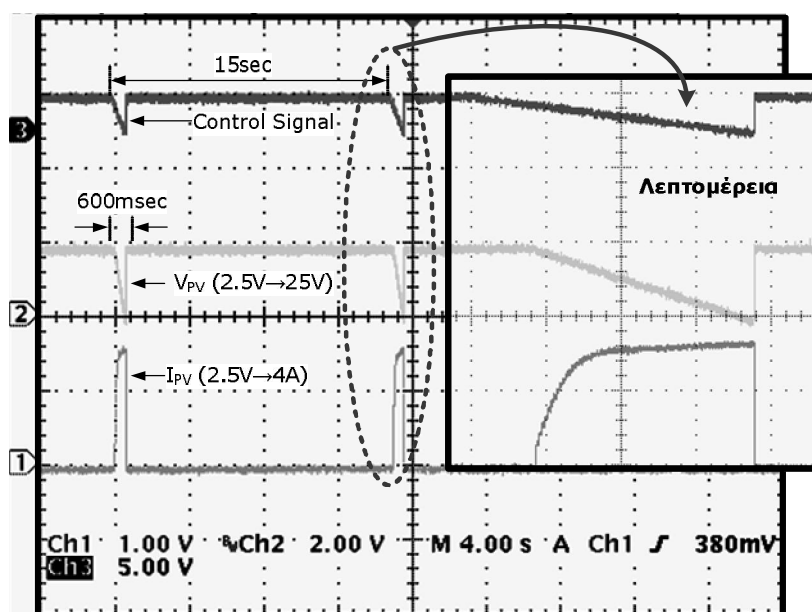
Σχήμα 4: Γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων.

Για τη μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιούνται αισθητήρες τύπου Hall Effect, ενώ για τη σάρωση των χαρακτηριστικών καμπυλών έντασης-τάσης συνδέεται στα άκρα του πλαισίου ελεγχόμενο ηλεκτρικό φορτίο καταγράφοντας 150 ζεύγη τιμών τάσης και ρεύματος. Επίσης, έχοντας ως στόχο την ορθή ενεργοποίηση του μηχανισμού γήρανσης των Φ/Β πλαισίων, στα χρονικά διαστήματα στα οποία δεν διενεργούνται μετρήσεις τα πλαίσια συνδέονται σε ηλεκτρικά φορτία σταθερής τιμής, τα οποία υπολογίστηκαν έτσι ώστε να αναγκάζουν το πλαίσιο να λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας. Στον πίνακα I παρατίθεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη διερεύνηση της μακρόχρονης λειτουργικής συμπεριφοράς των Φ/Β πλαισίων σε πραγματικές συνθήκες καθώς επίσης και οι ακρίβειες των χρησιμοποιούμενων οργάνων.

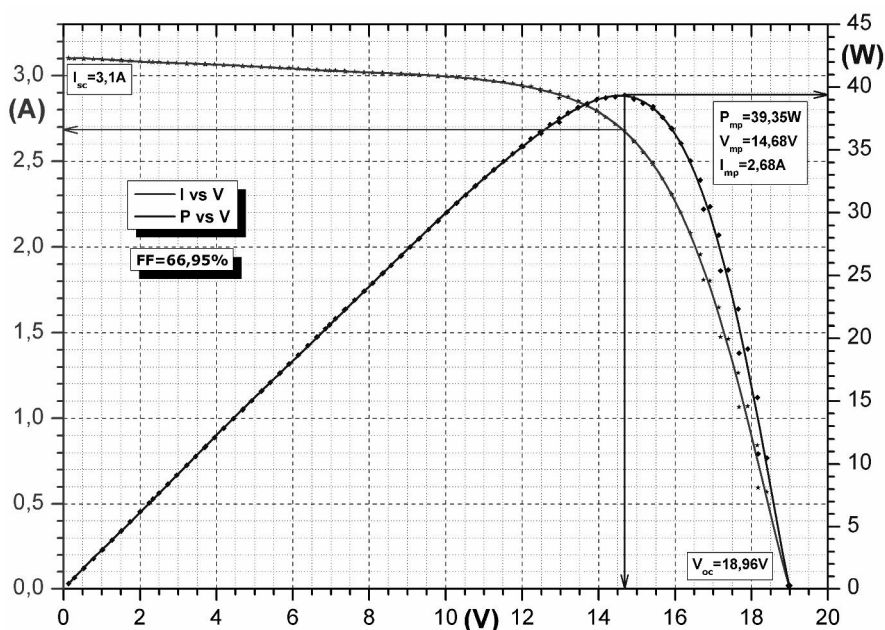
	Εξοπλισμός	Ακρίβεια μέτρησης
Μέτρηση & Καταγραφή των χαρακτηριστικών ηλεκτρικών μεγεθών (I_{SC} , I_{MPP} , V_{OC} , V_{MPP}) και των καμπυλών I-V και P-V του Φ/Β πλαισίου:	Εργαστηριακό μετρητικό και καταγραφικό σύστημα με αισθητήρες τάσης και ρεύματος τύπου Hall Effect, ελεγχόμενο ηλεκτρικό φορτίο, ηλεκτρικά φορτία σταθερής τιμής και Data logger <ul style="list-style-type: none"> Μέγιστη μετρούμενη τιμή τάσης: $60V_{DC}$ Μέγιστη μετρούμενη τιμή ρεύματος: $12A_{DC}$ Δυνατότητα ρύθμισης των κλιμάκων μέτρησης της τάσης και του ρεύματος Αποθήκευση 150 σημείων/χαρακτηριστική τάσης και ρεύματος Χρονική περίοδος μετρήσεων: $\approx 600ms$ 	I_{MPP} , I_{SC} , V_{MPP} , V_{OC} : $\pm 1\%$ σε συνθήκες πλησίον των STC (εκτιμούμενη ακρίβεια)
Μέτρηση ακτινοβολίας	Ολική: Kipp&Zonen pyranometer CM11	secondary standard according to the WMO classification
	Διάχυτη: Kipp&Zonen pyranometer CM11 mounted on a shadow ring stand	secondary standard according to the WMO classification
	Άμεση: Kipp&Zonen pyrhelimeter CH11 mounted on a 2 axis solar tracker, sci-tecinstruments	first class
	Στο επίπεδο του πλαισίου: ISET Sensor (μονό/πολύ κρυσταλλικό & άμορφο)	$< \pm 4\%$ κρυσταλλικό $< \pm 5\%$ άμορφο
Μέτρηση θερμοκρασίας	Κελίου αναφοράς: Pt1000 (ενσωματωμένο στον ISET Sensor)	$\pm 0,315K + 0,002 \times t $ $< +/- 0,5^\circ C$
	Περιβάλλοντος: Delta OHM-HD9009TR	$\pm 0.1\%$
	Πλάτης πλαισίου: Foil sensor platinum, pt 100 class B	$\pm 0.3K + 0.005 \times t $
Μέτρηση ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου	NRG 40 Anemometer	$\pm 0.1 \text{ m/s}$
	F460 Wind Direction	$\pm 2^\circ$
Μέτρηση υγρασίας	Delta OHM-HD9009TR	$\pm 2\%$
Μέτρηση ατμοσφαιρικής πίεσης	Vaisala PTB 101B Analog Barometer	$\pm 1.5 \text{ hPa}$ ($20^\circ C$)
Κελί αναφοράς	ISET Sensor	$< +/- 4\%$ κρυσταλλικό $< +/- 5\%$ άμορφο
Data logger	CAMPBELL SCIENTIFIC SERIES	Ακρίβεια μετρούμενων μεγεθών (V_{PV} , I_{PV}): 12-16 Bit

Πίνακας I: Συνοπτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την μέτρηση και την καταγραφή των χαρακτηριστικών ηλεκτρικών μεγεθών των Φ/Β πλαισίων, των συνθηκών λειτουργίας αυτών και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Στο σχήμα 5, παρατίθενται τα παλμογραφήματα του σήματος ελέγχου του ηλεκτρονικού φορτίου και των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου MSX60 της εταιρείας SOLAREX. Τα αποτελέσματα αυτά συλλέχθηκαν στο στάδιο αξιολόγησης του τρόπου λειτουργίας της αναπτυχθείσας εργαστηριακής διάταξης. Τέλος, στο σχήμα 6 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για το ίδιο πλαίσιο, ύστερα από την επεξεργασία των μετρήσεων που έχει καταγράψει ο Data logger σε κατάλληλο λογισμικό πακέτο.



Σχήμα 5: Παλμογραφήματα του σήματος ελέγχου του ηλεκτρονικού φορτίου, των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος εξόδου Φ/Β πλαισίου MSX60 της εταιρείας SOLAREX και μεγέθυνση αυτών.



Σχήμα 6: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης για το Φ/Β πλαίσιο MSX60 της εταιρείας SOLAREX ύστερα από την επεξεργασία των μετρήσεων που έχει καταγράψει ο Data logger (CAMPBELL SCIENTIFIC SERIES) σε κατάλληλο λογισμικό πακέτο.

Σημαντικό κομμάτι στην όλη διαδικασία αξιολόγησης της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων σε ετήσια βάση αποτελεί και η κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων, οι οποίες συνιστούν μεγάλο όγκο δεδομένων λόγω της καταγραφής της καμπύλης ανά μικρό χρονικό διάστημα. Οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση και βελτίωση των μαθηματικών μοντέλων που αφορούν στην εκτίμηση της ετήσιας απόδοσης Φ/Β συστημάτων στο πεδίο βάσει των εργαστηριακών μετρήσεων των Φ/Β πλαισίων.

Με την υλοποίηση της εφαρμογής αυτής εκτιμάται ότι θα αποκτηθούν χρήσιμες πληροφορίες, όσον αφορά την ετήσια απόδοση Φ/Β πλαισίων διαφόρων τεχνολογιών στις συγκεκριμένες συνθήκες της Ελλάδος. Επιπλέον η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καλύτερο χαρακτηρισμό Φ/Β πλαισίων μέσω του προσδιορισμού τεχνικών παραμέτρων τους, όπως οι θερμοκρασιακοί συντελεστές τους, καθώς και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σωστή σχεδίαση Φ/Β συστημάτων όσον αφορά την συνεργασία της Φ/Β συστοιχίας με τον μετατροπέα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η υποδομή και η εμπειρία του ΚΑΠΕ στο αντικείμενο της αξιολόγησης των χαρακτηριστικών τιμών Φ/Β στοιχείων ή πλαισίων. Ιδιαίτερος καταδείχθηκαν οι δυσκολίες για την μέτρηση της ονομαστικής ισχύος μέσω της καταγραφής της καμπύλης έντασης-τάσης. Η διαδικασία είναι σύνθετη, και πολλές φορές δεν αρκεί η απλή χρήση ενός μετρητικού οργάνου. Αντιθέτως είναι πολύ σημαντική η εμπειρία και η εις βάθος κατανόηση της διαδικασίας μέτρησης ώστε να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επίσης παρουσιάστηκε το σύστημα διερεύνησης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων σε μακρόχρονη έκθεση αυτών στο πεδίο, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο ΚΑΠΕ, και εκτιμάται ότι από την χρήση του θα προκύψουν πολλά χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την ετήσια απόδοση Φ/Β πλαισίων διαφόρων τεχνολογιών στις συγκεκριμένες συνθήκες της Ελλάδος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Chianese et al., '18 types of PV modules under the lens', 16th European PV Solar Energy Conference, Glasgow 2000
- [2] G. Friesen et al., 'PV module power comparison within the European project "PV-Enlargement"', 21st European PV Solar Energy Conference, Dresden 2006.
- [3] B. Ziensser et al., 'Annual energy yield of 13 photovoltaic technologies in Germany and in Cyprus, 22nd European PV Solar Energy Conference, Milan 2007
- [4] IEC-EN 60904-9 'Photovoltaic devices. Part 9: Solar simulator performance requirements'
- [5] IEC 60891 'Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices'