

Υπηρεσίες αξιολόγησης αντιστροφών Φ/Β συστημάτων ισχύος έως 12kVA

Κυρίτσης Αναστάσιος, Ρίκος Ευάγγελος, Τσελεπής Στάθης

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας

Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Τηλ. +30.210.6603371, fax +30.210.6603318

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εργαστηριακή υποδομή του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ και η διαδικασία διερεύνησης της συμβατότητας της λειτουργίας Φ/Β αντιστροφών ισχύος έως 12kVA με τους εγχώριους κανονισμούς και τα διεθνή πρότυπα. Οι παραπάνω δοκιμές και μετρήσεις παρουσιάζονται μέσω της αξιολόγησης ενός εμπορικού Φ/Β αντιστροφέα που έγινε στα πλαίσια συμμετοχής του ΚΑΠΕ μαζί με το ΕΜΠ στο Ευρωπαϊκό δίκτυο εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων, DER-Lab (www.der-lab.net).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρέχεται υπό τη μορφή συνεχούς τάσης και ρεύματος. Για να καταστεί λοιπόν εφικτή η τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος (Ε.Ρ.) με την ενέργεια που παράγεται από τις φωτογεννήτριες, απαιτείται η διαμεσολάβηση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων, των αντιστροφών. Η προσαρμογή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου Ε.Ρ. είναι δυνατόν να πραγματοποιείται σε ένα ή περισσότερα εν σειρά συνδεδεμένα στάδια επεξεργασίας της ηλεκτρικής ισχύος. Για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει αυτές οι ηλεκτρονικές διατάξεις να ονομάζονται στο σύνολό τους ηλεκτρονικοί μετατροπείς και το τμήμα τους που αναλαμβάνει τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη να ονομάζεται αντιστροφέας. Όπως όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνδέονται στο δίκτυο Ε.Ρ, έτσι και οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς των Φ/Β συστημάτων οφείλουν να υπόκεινται στις προδιαγραφές που ορίζονται από τους κανονισμούς και τα πρότυπα που έχουν θεσπιστεί ή υιοθετηθεί από τους Διαχειριστές των ΣΗΕ. Συγκεκριμένα, η σύνδεση μικρών διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.), θεωρείται αποδεκτή όταν η ενέργεια που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ισχύος που παρέχεται στους άλλους συνδεδεμένους χρήστες (καταναλωτές ή παραγωγούς), δεν διαταράσσει την ορθή λειτουργία των μέσων ρύθμισης και προστασίας του δικτύου και δεν θέτει σε κίνδυνο πρόσωπα και εγκαταστάσεις [1-8].

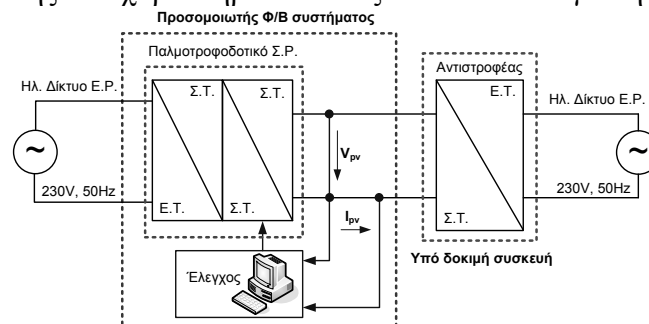
2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΕ, ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κάθε διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε δύο επιμέρους δομικές μονάδες. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και τον

ηλεκτρονικό μετατροπέα, ο οποίος αναλαμβάνει την προσαρμογή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις προδιαγραφές του δικτύου χαμηλής τάσης. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων καθορίζει τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, ενώ η εν σειρά και παράλληλη σύνδεση αυτών προσδιορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τιμές της τάσης και του ρεύματος εισόδου) των μετατροπέων που θα χρησιμοποιηθούν.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις τεκμαίρεται ότι για την πειραματική αξιολόγηση των αντιστροφών που χρησιμοποιούνται στις Φ/Β εφαρμογές, απαιτούνται επίπονες προσπάθειες και μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς οι εν λόγω δοκιμές εξαρτώνται άμεσα από τις κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία και ακτινοβολία) οι οποίες καθορίζουν τη λειτουργική συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων. Έτσι, πολλές φορές, καθίσταται αδύνατη χρονικά μία ολοκληρωμένη δοκιμή των αντιστροφών στην περίπτωση που για την τροφοδότησή τους χρησιμοποιούνται εμπορικά Φ/Β πλαίσια. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση της άρτιας συνεργασίας μεταξύ των ηλεκτρονικών μετατροπέων και διαφορετικών τύπων Φ/Β πλαισίων (διαφορετικές τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος) απαιτούν την εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων διαφορετικής τεχνολογίας, γεγονός το οποίο καθιστά απαγορευτικό το κόστος της απαιτούμενης εργαστηριακής υποδομής. Για τους λόγους αυτούς, το τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών, ανέπτυξε ένα σύστημα εξομοίωσης των χαρακτηριστικών εξόδου τόσο μεμονωμένων Φ/Β γεννητριών όσο και συνδυασμού αυτών σε παράλληλες και σε σειρά συνδεσμολογίες [9-11]. Με τη διάταξη αυτή ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους του συστήματος εξομοίωσης, ώστε να προσεγγίζονται οι χαρακτηριστικές εξόδου οποιασδήποτε Φ/Β συστήματος, ενώ παράλληλα μπορεί να ρυθμίσει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του πλαισίου σχηματίζοντας έτσι την επιθυμητή χαρακτηριστική εξόδου.

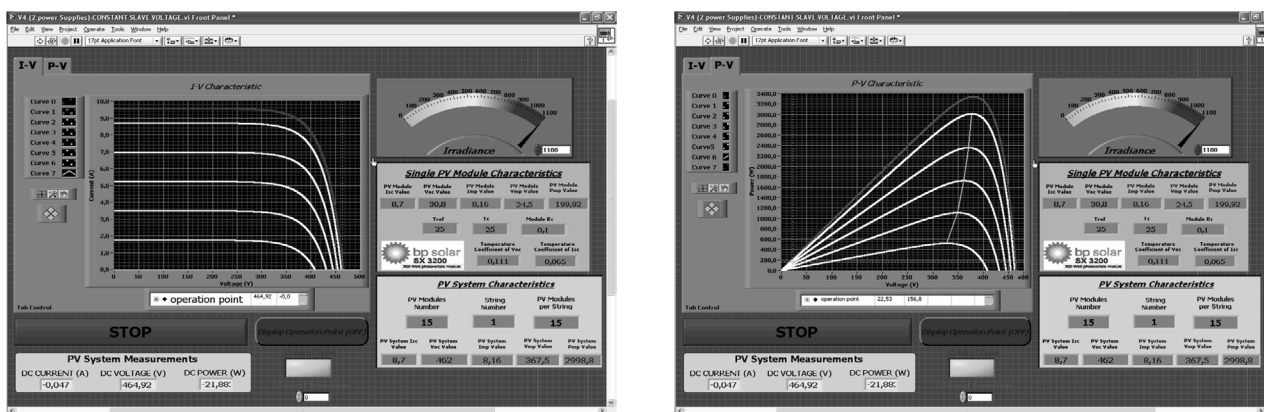
Η λειτουργία του συστήματος εξομοίωσης Φ/Β χαρακτηριστικών βασίζεται στην μαθηματική μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών εξόδου των Φ/Β πλαισίων, τη λήψη μετρήσεων, την επεξεργασία τους και τον προγραμματισμό της χαρακτηριστικής εξόδου των διαθέσιμων παλμοτροφοδοτικών συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) έτσι ώστε αυτή να συμπίπτει με τη χαρακτηριστική εξόδου του επιθυμητού Φ/Β συστήματος. Αναλυτικότερα, το σύστημα που υλοποιήθηκε απαρτίζεται από παλμοτροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος (ELGAR DC Power Supplies, Model DHP 200-25), ένα προσωπικό υπολογιστή, μία κάρτα συλλογής δεδομένων (PCI-6221 της National Instruments), αισθητήρες τύπου Hall Effect για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου των παλμοτροφοδοτικών και κατάλληλο λογισμικό (για την επεξεργασία των μετρήσεων και τον έλεγχο των παλμοτροφοδοτικών) το οποίο αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα Labview ver 8.0 της National Instruments. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος εργαστηριακής εξομοίωσης των χαρακτηριστικών εξόδου των Φ/Β γεννητριών.



Σχήμα 1: Γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος εργαστηριακής εξομοίωσης των χαρακτηριστικών εξόδου των Φ/Β γεννητριών.

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών εξόδου του Φ/Β συστήματος, το λογισμικό χρησιμοποιεί το μοντέλο της παρεμβολής [9-12]. Συγκεκριμένα, ο χρήστης αρχικά καλείται να εισάγει τις χαρακτηριστικές ηλεκτρικές τιμές του πλαισίου αναφοράς της Φ/Β εγκατάστασης (V_{MP} ,

I_{MP} , V_{OC} , I_{SC}) στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (Standard Test Conditions, S.T.C.), καθώς επίσης και τους συντελεστές επίδρασης της θερμοκρασίας για το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοικτού κυκλώματος. Στη συνέχεια εισάγεται ο αριθμός των πλαισίων που απαρτίζουν τις στοιχειοσειρές καθώς και ο αριθμός των παράλληλων στοιχειοσειρών. Με βάση τις παραπάνω τιμές το λογισμικό υπολογίζει τις εξισώσεις που διέπουν την τάση και το ρεύμα εξόδου του Φ/Β συστήματος, για οποιαδήποτε ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι φόρμες εισαγωγής των παραπάνω δεδομένων ενώ παράλληλα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της Φ/Β εγκατάστασης. Επίσης, το λογισμικό που αναπτύχθηκε παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να διερευνήσει τη λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων σε συνθήκες μερικής σκίασης, καθορίζοντας το ποσοστό σκίασης σε κάθε ένα πλαίσιο της Φ/Β εγκατάστασης ξεχωριστά.



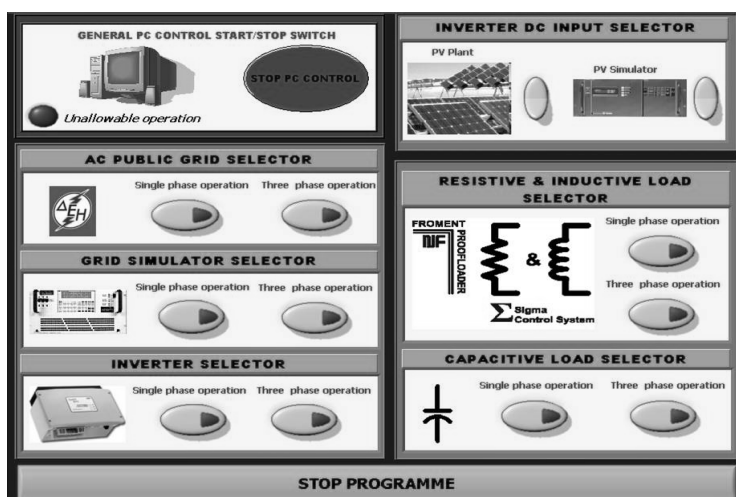
Σχήμα 2: Φόρμες εισαγωγής των χαρακτηριστικών ηλεκτρικών τιμών του πλαισίου αναφοράς, της δομής του Φ/Β συστήματος, της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και απεικόνιση των χαρακτηριστικών καμπυλών της Φ/Β εγκατάστασης.

Επιπρόσθετα, για την αξιολόγηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξόδου των υπό δοκιμή ηλεκτρονικών μετατροπέων, το εργαστήριο Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ είναι εφοδιασμένο με προγραμματιζόμενο εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου X.T. 12kVA (AC programmable power source 3120ASXT/UPC3) της εταιρείας Pacific Power Source Inc. Η χρησιμοποίηση του εν λόγω εξοπλισμού σε συνδυασμό με τα ωμικά και ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία της εταιρείας Σ SIGMA FROMENT PROOFLOADER μέγιστης ισχύος 100kW (που διαθέτει το εργαστήριό μας), αποσκοπεί στη απρόσκοπτη διερεύνηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξόδου των ηλεκτρονικών μετατροπέων, διότι με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επίδραση τυχόν ανωμαλιών του ηλεκτρικού δικτύου στη λειτουργία των υπό δοκιμή συσκευών. Ο προαναφερθείσας εξοπλισμός σε συνδυασμό με τα επαγωγικά και ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία της Σ SIGMA FROMENT PROOFLOADER μέγιστης ισχύος 100kVA (που διαθέτει το εργαστήριό μας) και τα χωρητικά φορτία που σχεδιάζεται να προστεθούν στον εξοπλισμό του εργαστηρίου, παρέχει επιπλέον τη δυνατότητα διερεύνησης της λειτουργία ηλεκτρονικών μετατροπέων που προορίζονται για αυτόνομες εφαρμογές.

Η επιλογή της πηγής τροφοδότησης των υπό δοκιμή ηλεκτρονικών μετατροπέων καθώς και η επιλογή του συστήματος στο οποίο θα συνδεθεί η έξοδος αυτών (ηλεκτρικό δίκτυο, εξομοιωτής ηλεκτρικού δικτύου, επιλογή φορτίων, κ.λ.π.) πραγματοποιείται πλήρως αυτοματοποιημένα μέσω ενός ηλεκτρικού πίνακα ο οποίος ελέγχεται από προσωπικό υπολογιστή και κατάλληλο λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα Labview ver 8.0 της National Instruments. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται ο ηλεκτρικός αυτοματοποιημένος πίνακας επιλογής ηλεκτρικών συνδέσεων, καθώς επίσης και η κονσόλα ελέγχου μέσω της οποίας ο χρήστης επιλέγει τις επιθυμητές συνδεσμολογίες.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η εργαστηριακή υποδομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της λειτουργίας τόσο μονοφασικών ηλεκτρονικών μετατροπέων όσο και τριφασικών, ενώ παράλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος ο χρήστης μπορεί να επιλέξει για την τροφοδότηση του μετατροπέα το ήδη υπάρχων στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Φ/Β σύστημα

ισχύος 2.5kW, όπως επίσης να συνδέσει την έξοδο της υπό διερεύνησης συσκευής στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο X.T. Τέλος, για την ορθή αποτύπωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των αντιστροφών, το τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ είναι εφοδιασμένο με τον απαιτούμενο εξοπλισμό συμπεριλαμβανομένου μεταξύ άλλων αναλυτή ενέργειας Power Guide 4400 της εταιρείας Dranetz BMI, ψηφιακό μετρητή ενέργειας WT2030 της εταιρείας Yokogawa, ψηφιακό παλμογράφο TDS3054 και αμπεροτσιμπίδες A6303 της εταιρείας Tektronix, True RMS πολύμετρα των εταιρειών Fluke και Extech.



Σχήμα 3: Αυτοματοποιημένος ηλεκτρικός πίνακας επιλογής ηλεκτρικών συνδέσεων και κονσόλα ελέγχου αυτού.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η διάταξη εξομοίωσης Φ/Β χαρακτηριστικών παρέχει στο εργαστήριο Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ μία ολοκληρωμένη λύση για την πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας των ηλεκτρονικών μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στις Φ/Β ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, καθώς καθίσταται δυνατή εντός του εργαστηρίου, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες, η διερεύνηση της λειτουργίας των εν λόγω αντιστροφών.

3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ AURORA PVI-3.0-OUTD-S-IT ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ POWER ONE

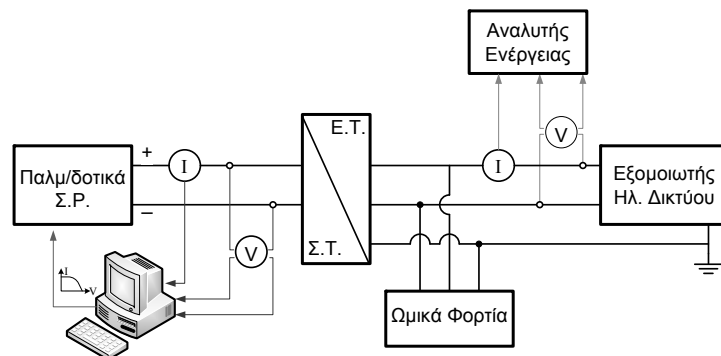
Στα πλαίσια συμμετοχής του ΚΑΠΕ στο Ευρωπαϊκό δίκτυο εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων, DER-Lab, αξιολογήθηκε η λειτουργία του εμπορικού αντιστροφέα Aurora PVI-3.0-OUTD-S-IT της εταιρείας Power One. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος που εγχέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και μετρήθηκε πιθανή συνεχής συνιστώσας σε αυτό, μετρήθηκαν οι οριακές τιμές της τάσης και της συχνότητας που προκαλούν την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας και καταγράφηκε ο απαιτούμενος χρόνος ενεργοποίησης αυτών, ελέγχθηκε η ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας λόγω ρευμάτων διαρροής και καταγράφηκε η επίδραση της τιμής αυτών στον χρόνο ενεργοποίησης των προστασιών. Τέλος, διενεργήθηκε χαρτογράφηση της ενεργειακής απόδοσης του αντιστροφέα και αξιολογήθηκε ο ελεγκτής μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής αυτού σε συνθήκες μερικής σκίασης.

3.1 Διερεύνηση του αρμονικού περιεχόμενου του ρεύματος εξόδου του ηλεκτρονικού μετατροπέα και μέτρηση πιθανής συνεχούς συνιστώσας

Η υψίσυχη διακοπτική λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα προκαλεί την εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην κυματομορφή του ρεύματος που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτές οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες είναι δυνατόν να

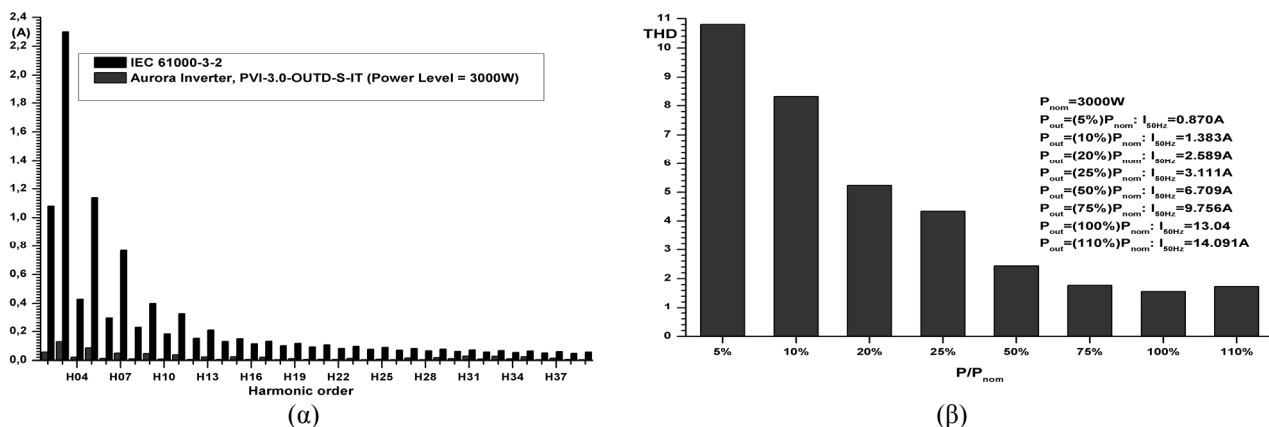
προκαλέσουν προβλήματα τόσο στο ίδιο το δίκτυο και σε εγκαταστάσεις που είναι συνδεδεμένες σε αυτό, όσο και σε παρακείμενες ηλεκτρονικές συσκευές. Αν και η ένταξη περιορισμένου αριθμού Φ/Β ηλεκτρονικών μετατροπέων δεν είναι δυνατό να επηρεάσει αισθητά την ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου, δε είναι βέβαιο ότι συμβαίνει το ίδιο και στην περίπτωση ευρείας χρησιμοποιήσεως των παραπάνω μονάδων. Για την αποτροπή της εμφάνισης των προαναφερθέντων ανεπιθύμητων καταστάσεων, η έγχυση αρμονικών από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς των Φ/Β συστημάτων που συνδέονται στο δίκτυο Χ.Τ., πρέπει να εναρμονίζεται με τις προϋποθέσεις που προβλέπονται από το πρότυπο IEC 61000-3-2. Η μέγιστη τάξη αρμονικών που λαμβάνεται υπόψη είναι η 40^η, ενώ ο έλεγχος των αρμονικών πραγματοποιείται μόνο για την κανονική λειτουργία των εγκαταστάσεων και όχι κατά τις μεταβατικές περιόδους. Πέρα από τις παραπάνω προδιαγραφές, ο Διαχειριστής του Δικτύου επιβάλλει, ως απαραίτητη προϋπόθεση για τη σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στα δίκτυα διανομής, την επίτευξη Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, T.H.D.) του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα τιμής μικρότερη ή οριακά ίση με 5% και μέγιστη τιμή εγγεόμενου συνεχούς ρεύματος μικρότερη από 0.5% της τιμής του ονομαστικού ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Όσον αφορά τη τιμή του Συντελεστή Ισχύος (Power Factor, PF), οι εν λόγω αντιστροφείς επιτυγχάνουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές PF (λόγω της λογικής χρησιμοποίησής τους) καλύπτοντας έτσι την οριακή τιμή 0.9 που τίθεται από τους Διαχειριστές του Δικτύου για τη σύνδεση ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων στο δίκτυο Χ.Τ. (για επαγωγική και χωρητική συμπεριφορά) [13].

Στο σχήμα 4 παρατίθεται το γενικό δομικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο μετρήθηκε το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.



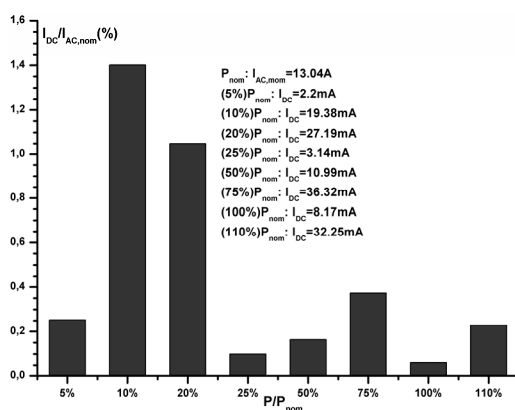
Σχήμα 4: Γενικό δομικό διάγραμμα για τη μέτρηση του αρμονικού περιεχόμενου του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.

Για τη διερεύνηση της λειτουργίας του υπό δοκιμή ηλεκτρονικού μετατροπέα, εξομοιώθηκε Φ/Β σύστημα ονομαστικής ισχύος 3kW, το οποίο απαρτιζόταν από 15 εν σειρά συνδεδεμένα πλαίσια SX3200 της εταιρείας BP. Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ήταν 367.5V και 8.16A αντίστοιχα, ενώ οι τιμές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ήταν 462V και 8.7A αντίστοιχα (οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών). Η επιλογή του εν λόγω Φ/Β συστήματος έγινε έτσι ώστε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη του να μην αποκλίνουν σημαντικά από τις ονομαστικές τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μεγεθών του υπό εξέταση ηλεκτρονικού μετατροπέα. Μολονότι σύμφωνα με του εγχώριους κανονισμούς απαιτείται η συμμόρφωση του αρμονικού περιεχόμενου του ρεύματος εξόδου του υπό δοκιμή αντιστροφέα και ο υπολογισμός του Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης για το ονομαστικό επίπεδο ισχύος, στα πλαίσια αξιολόγησης της λειτουργίας αντιστροφέων στο Ευρωπαϊκό δίκτυο εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων, οι παραπάνω μετρήσεις επαναλήφθηκαν στο 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και 110% της ονομαστικής τιμής της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Οι παραπάνω μετρήσεις και υπολογισμοί παρατίθενται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: (α): Αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα για το ονομαστικό επίπεδο ισχύος και σύγκριση αυτού με τα όρια του IEC 61000-3-2
(β): Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα στο 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και 110% της ονομαστικής τιμής της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα.

Τέλος, στο σχήμα 6 παρατίθενται οι μετρήσεις συνεχούς συνιστώσας στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα στο 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και 110% της ονομαστικής τιμής της ισχύος εξόδου του ηλεκτρονικού μετατροπέα σε αντίθεση με του εγχώριους κανονισμούς που προβλέπουν τη μέτρηση αυτής μόνο στο ονομαστικό επίπεδο ισχύος. Οι εν λόγω μετρήσεις είναι ιδιαίτερης σημασίας στην περίπτωση που στην κυκλωματική τοπολογία του αντιστροφέα δεν περιλαμβάνεται χαμηλόσυχνος μετασχηματιστής (Μ/Σ) (περίπτωση του υπό δοκιμή αντιστροφέα). Σκοπός της μέτρησης συνεχούς συνιστώσας στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα είναι η διερεύνηση πιθανής εμφάνισης φαινομένων κορεσμού στους μετασχηματιστές του δικτύου στην περίπτωση ευρείας χρησιμοποίησεως αυτού του τύπου ηλεκτρονικών μετατροπέων.



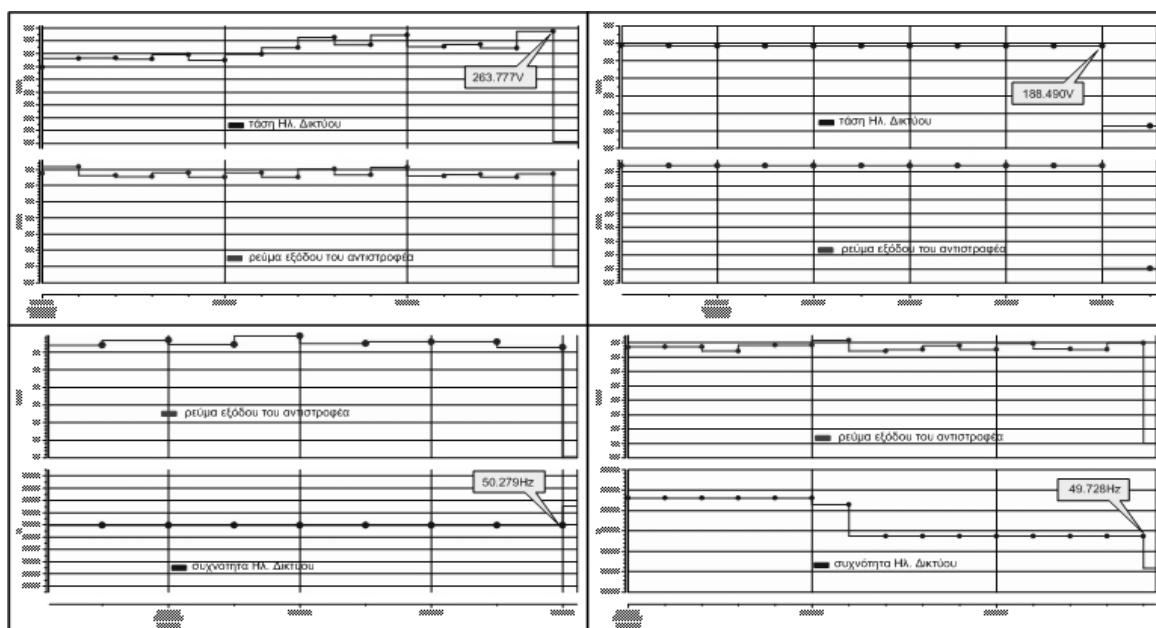
Σχήμα 6: Έγχυση συνεχούς ρεύματος (ως ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα) στο ηλεκτρικό δίκτυο στο 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και 110% της ονομαστικής τιμής της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα.

3.2 Διερεύνηση της ικανότητας του ηλεκτρονικού μετατροπέα να αντιλαμβάνεται καταστάσεις απομονωμένης λειτουργίας

Στα πλαίσια αξιολόγησης της λειτουργίας αντιστροφέων στο Ευρωπαϊκό δίκτυο εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων διερευνήθηκε η ικανότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων να αντιλαμβάνονται καταστάσεις απομονωμένης λειτουργίας στην περίπτωση που η τάση ή η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου μεταβαίνουν σε τιμές εκτός του επιτρεπόμενου παραθύρου διακύμανσης των παραπάνω ηλεκτρικών μεγεθών. Η ανίχνευση καταστάσεων απομονωμένης λειτουργίας αποτελεί ένα από τα βασικά κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται

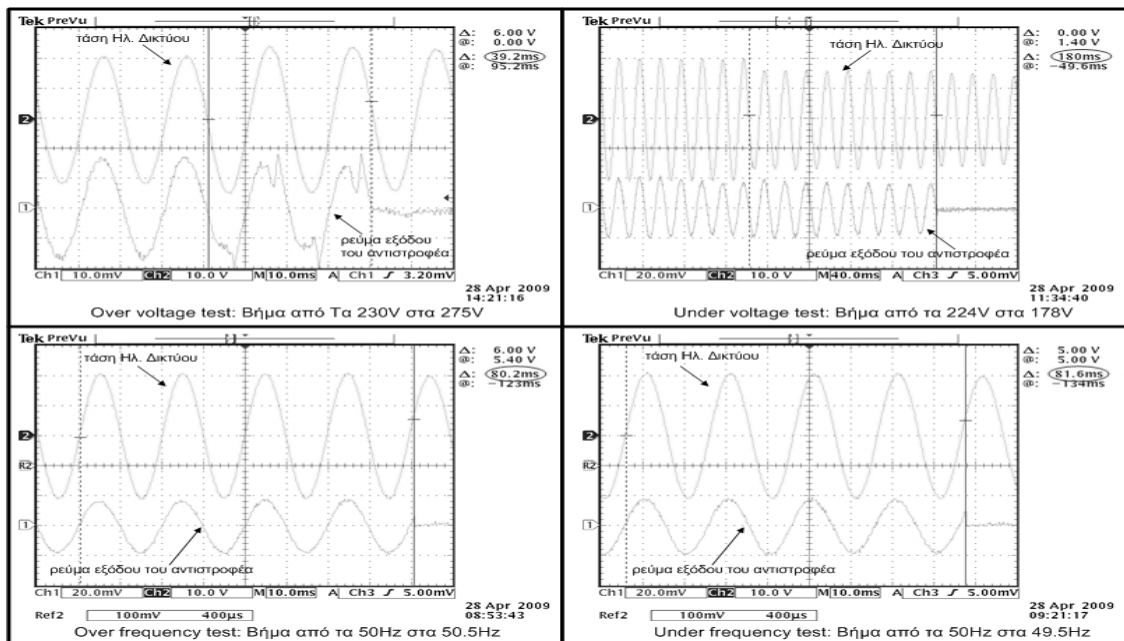
προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση ενός Φ/Β συστήματος στο ΣΗΕ. Οι λόγοι που επιβάλλουν την ανίχνευση αυτών των καταστάσεων έγκεινται στη διασφάλιση υψηλής ποιότητας παρεχόμενης ενέργειας στους καταναλωτές και κυρίως η ασφάλεια εγκαταστάσεων και προσώπων [14, 15].

Το γενικό δομικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο διενεργήθηκαν τα εν λόγω πειράματα είναι ίδιο με αυτό που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4. Η πειραματική διαδικασία προέβλεπε αρχικά την εύρεση των οριακών τιμών της τάσης και της συχνότητας που προκαλούν την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας (under/over voltage & frequency trip values) και στη συνέχεια τη μέτρηση του χρόνου ενεργοποίησης αυτών μέσω της απότομης μεταβολής των παραπάνω χαρακτηριστικών ηλεκτρικών μεγεθών από τις ονομαστικές του τιμές (230V και 50Hz) σε τιμές εκτός του επιτρεπόμενου παραθύρου διακύμανσης τους [16]. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται στα σχήματα 7 και 8.



Σχήμα 7: Εύρεση των οριακών τιμών (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) της τάσης και της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου που προκαλούν την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας έναντι φαινόμενο νησίδας.

Με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως γίνεται κατανοητό ότι ο έλεγχος των συστημάτων προστασίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα έναντι φαινομένων νησίδας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το τρόπο λειτουργίας των παθητικών μεθόδων. Οι παθητικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η ενέργεια που παρέχεται από τα Φ/Β συστήματα στο δίκτυο Χ.Τ. είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με την ενέργεια που καταναλώνεται από τα φορτία. Εάν όμως η συχνότητα συντονισμού του απομονωμένου τμήματος του δικτύου (μαζί με τα φορτία που είναι συνδεδεμένα σε αυτό) είναι ίση με 50Hz και η ζητούμενη από τα φορτία ισχύς μπορεί να παρασχεθεί από τις φωτογεννήτριες, οι παραπάνω μέθοδοι αποτυγχάνουν να ανιχνεύουν την αποκοπή του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου. Στην πράξη για την αποφυγή του προαναφερθέντος προβλήματος η πλειονότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων χρησιμοποιεί συνδυασμό παθητικών και ενεργητικών μεθόδων. Οι ενεργητικές μέθοδοι προκαλούν κάποια ηλεκτρική διαταραχή στον κοινό κόμβο σύνδεσης του ηλεκτρονικού μετατροπέα με το δίκτυο Χαμηλής Τάσης και από το αποτέλεσμα αυτής της διαταραχής γίνεται αντιληπτό εάν έχει επέλθει η κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας. Στις ενεργητικές μεθόδους ανίχνευσης του “φαινομένου νησίδας”, συγκαταλέγεται και αυτή της μέτρησης της εμπέδησης του δικτύου σε συγκεκριμένες τιμές συχνότητας (VDE 0126-1-1), μέθοδος με την οποία ήταν εξοπλισμένοι και ο υπό δοκιμή ηλεκτρονικός μετατροπέας [17].



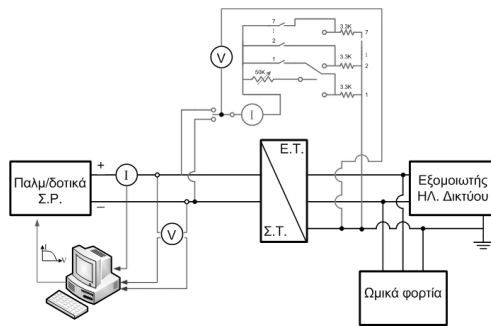
Σχήμα 8: Καταγραφή του χρόνου ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας έναντι φαινόμενο νησίδιας στην περίπτωση που η τάση και η συχνότητα μεταβληθούν ακαριαία από τις ονομαστικές τους τιμές σε τιμές εκτός του επιτρεπόμενου παραθύρου διακύμανσης αυτών.

3.3 Διερεύνηση της ικανότητας του ηλεκτρονικού μετατροπέα να ανιχνεύει ρεύματα διαρροής

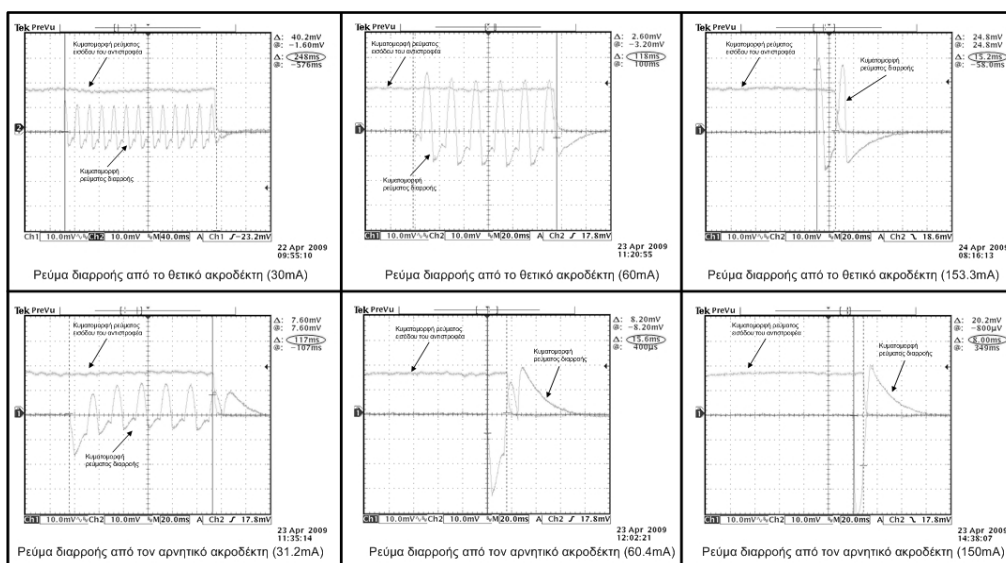
Στις περιπτώσεις των Φ/Β εγκαταστάσεων όπου οι χρησιμοποιούμενοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς δεν εμπεριέχουν Μ/Σ στην κυκλωματική τους τοπολογία, είναι πιθανή η εμφάνιση ρευμάτων διαρροής μεταξύ του θετικού (ή αρνητικού) πόλου της Φ/Β εγκατάστασης και του ηλεκτρικού δικτύου. Τα ρεύματα διαρροής παρουσιάζονται κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος, και η τιμή τους δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια καθώς εξαρτώνται όχι μόνο από τον τύπο των πλαισίων, αλλά επίσης από την τοπολογία του ηλεκτρονικού μετατροπέα καθώς και τις καιρικές συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των ρευμάτων διαρροής στα Φ/Β συστήματα, τα κυκλώματα προστασίας των ηλεκτρονικών μετατροπέων δεν διακόπτουν τη λειτουργία των μετατροπέων όταν η τιμή τους ξεπεράσει τα 30mA, αλλά αντιθέτως ανιχνεύουν τις απότομες αυξητικές μεταβολές αυτών, έχοντας βέβαια μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή μόνιμου ρεύματος διαρροής πέραν της οποίας η λειτουργία των μετατροπέων διακόπτεται ακαριαία.

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω παρατηρήσεις και χρησιμοποιώντας το γενικό δομικό διάγραμμα του σχήματος 9, μετρήθηκε καταρχάς η μέγιστη τιμή του ρεύματος διαρροής που επιφέρει τη διακοπή της λειτουργίας του υπό δοκιμή μετατροπέα και στη συνέχεια κατεγράφησαν οι απαιτούμενοι χρόνοι ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας για μεταβολές της τάξης των 30, 60 και 150mA.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ρεύματα διαρροής εξαρτώνται από την κυκλωματική τοπολογία του μετατροπέα, οι παραπάνω χρόνοι μετρήθηκαν τόσο για την περίπτωση όπου η διαρροή εμφανίζεται μεταξύ του αρνητικού πόλου της Φ/Β εγκατάστασης και του ηλεκτρικού δικτύου όσο και μεταξύ του θετικού πόλου και του ηλεκτρικού δικτύου. Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ρευμάτων διαρροής για τις παραπάνω περιπτώσεις, ενώ στον πίνακα I παρατίθενται συγκεντρωτικά αφ' ενός μεν οι χρόνοι ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και αφ' ετέρου η τιμή της αντίστασης (μεταξύ πόλου του Φ/Β συστήματος και του ηλεκτρικού δικτύου) που επιφέρει την επιθυμητή τιμή των ρευμάτων διαρροής. Τέλος, η μέγιστη τιμή του ρεύματος διαρροής που επιφέρει τη διακοπή της λειτουργίας του υπό δοκιμή μετατροπέα ήταν 276mA και εμφανίστηκε στην περίπτωση που η διαρροή δημιουργήθηκε μεταξύ του θετικού πόλου της Φ/Β εγκατάστασης και του ηλεκτρικού δικτύου.



Σχήμα 9: Γενικό δομικό διάγραμμα για τη μέτρηση των ρευμάτων διαρροής και την καταγραφή του απαιτούμενου χρόνου ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας.



Σχήμα 10: Κυματομορφές των ρευμάτων διαρροής (τόσο από το θετικό όσο και από τον αρνητικό ακροδέκτη του Φ/Β συστήματος) και καταγραφή του απαιτούμενου χρόνου ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας.

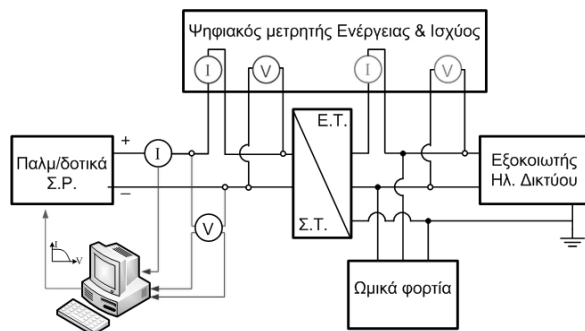
| | Διαρροή μέσω του θετικού ακροδέκτη | Διαρροή μέσω του αρνητικού ακροδέκτη | |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|-------|
| Τιμή ρεύματος διαρροής που επιφέρει την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας (mA) | 30 | 31.2 | 30mA |
| Χρόνος ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας (msec) | 248 | 117 | |
| Τιμή αντίστασης (Ω) | 4140 | 4285 | |
| Τιμή ρεύματος διαρροής που επιφέρει την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας (mA) | 60 | 60.4 | 60mA |
| Χρόνος ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας (msec) | 118 | 15.6 | |
| Τιμή αντίστασης (Ω) | 2153 | 1957 | |
| Τιμή ρεύματος διαρροής που επιφέρει την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας (mA) | 153.3 | 150 | 150mA |
| Χρόνος ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας (msec) | 15.2 | 8 | |
| Τιμή αντίστασης (Ω) | 797.5 | 842 | |

Πίνακας I: Χρόνοι ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας για τιμές ρευμάτων διαρροής 30, 60 και 150mA (μεταξύ θετικού/ή αρνητικού πόλου του Φ/Β συστήματος και του ηλεκτρικού δικτύου) και καταγραφή της τιμής της αντίστασης που επιφέρει τις εν λόγω τιμές ρευμάτων διαρροής.

3.4 Χαρτογράφηση της ενεργειακής απόδοσης του ηλεκτρονικού μετατροπέα

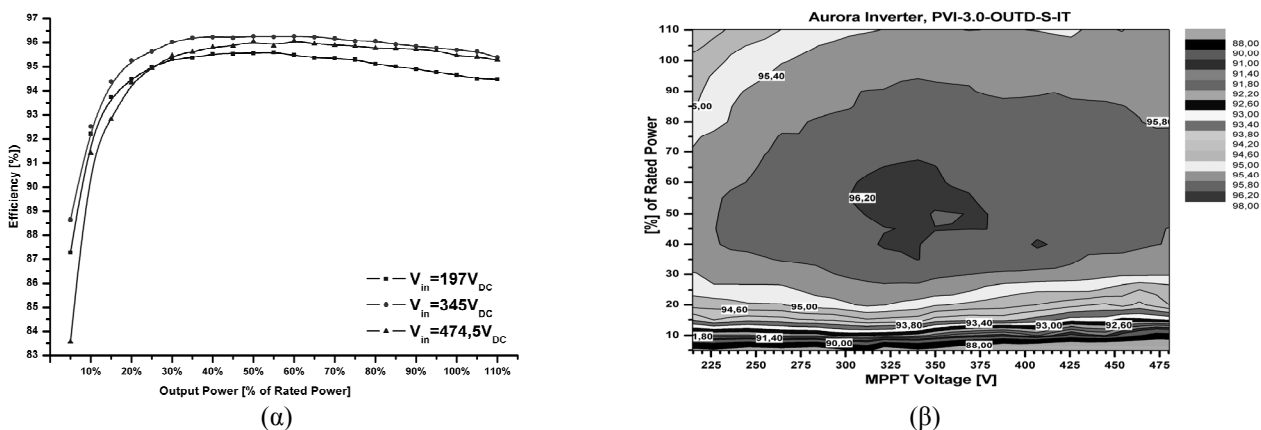
Η απόδοση των ηλεκτρονικών μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα, δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μιας ωρολογιακής ημέρας. Συγκεκριμένα, εφόσον η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι εν λόγω μετατροπείς δεν λειτουργούν σε ένα σταθερό σημείο λειτουργίας. Επομένως, ο βαθμός απόδοσης τους μεταβάλλεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Βάσει αυτής της παρατήρησης προκύπτει, εύλογα, ότι η μέγιστη τιμή απόδοσης ενός μετατροπέα δεν επαρκεί για την αξιολόγηση της αποδοτικότητάς του.

Στο σχήμα 11 παρατίθεται το γενικό δομικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο μετρήθηκε ο βαθμός απόδοσης του υπό δοκιμή ηλεκτρονικού μετατροπέα. Σύμφωνα με τη διαδικασία αξιολόγησης της λειτουργίας Φ/Β ηλεκτρονικών μετατροπέων στο Ευρωπαϊκό δίκτυο εργαστηρίων Διεσπαρμένων Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων, μετρήθηκε η απόδοση του μετατροπέα στο 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και 110% της ονομαστικής τιμής της ισχύος εξόδου του, για τρεις διαφορετικές τιμές τάσης εισόδου (ελάχιστη, ονομαστική και μέγιστη). Οι εν λόγω τιμές αναφέρονται στην τάση του Φ/Β συστήματος στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 12.(α).



Σχήμα 11: Γενικό δομικό διάγραμμα για τη διερεύνηση της ενεργειακής απόδοσης του ηλεκτρονικού μετατροπέα.

Επιπρόσθετα για την απόκτηση μιας πληρέστερης εικόνας της ενεργειακής απόδοσης του υπό δοκιμή ηλεκτρονικού μετατροπέα, διενεργήθηκε η χαρτογράφηση αυτού ώστε να αποτυπωθεί πλήρως η ενεργειακή του συμπεριφορά σε ευρύ πλήθος δυνατών σημείων λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα αυτού του εγχειρήματος παρουσιάζονται στο σχήμα 12.(β). Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις δεν βασίζεται στην διενέργεια στιγμιαίων μετρήσεων (single shoot measurements), αλλά αντιθέτως στον υπολογισμό μέσω των τιμών ισχύος εισόδου και εξόδου σε διάστημα είκοσι δευτερολέπτων.



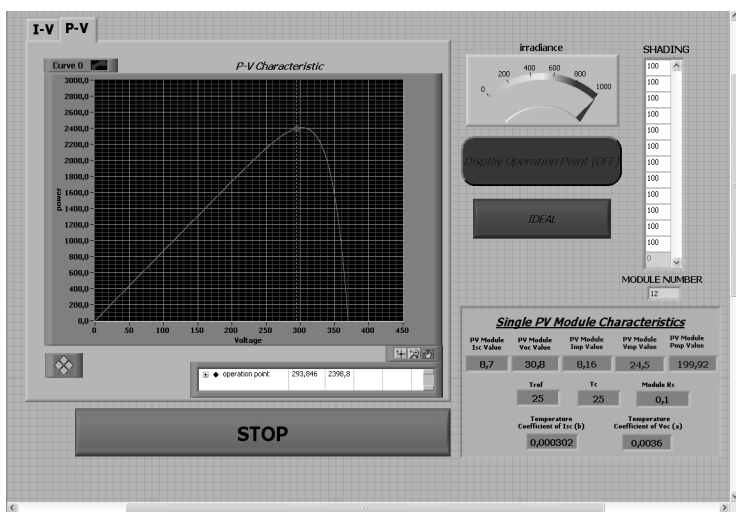
Σχήμα 12: (α): Χαρακτηριστικές καμπύλες του βαθμού απόδοσης του μονοφασικού ηλεκτρονικού μετατροπέα συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος για τρεις χαρακτηριστικές τιμές της τάσης εισόδου (β): Χαρτογράφηση της ενεργειακής απόδοσης του μονοφασικού ηλεκτρονικού μετατροπέα.

3.5 Αξιολόγηση του ελεγκτή μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής σε συνθήκες μερικής σκίασης

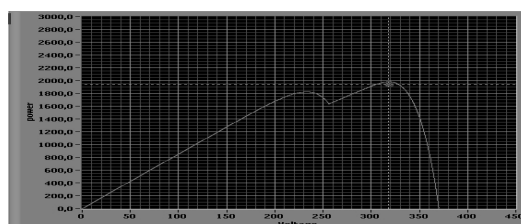
Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από ένα Φ/Β σύστημα, εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της φωτογεννήτριας. Συνεπώς, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής συνεισφοράς των παραπάνω συστημάτων σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, έγκειται στην ικανότητα (εξαναγκασμό) της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να λειτουργεί συνεχώς στο έκαστο σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος (Maximum Power Point, M.P.P.), ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Στην πλειονότητα των Φ/Β ηλεκτρονικών μετατροπέων ο αλγόριθμος εύρεσης του σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος επιτρέπει την εκμετάλλευση των Φ/Β γεννητριών σε ποσοστό μεγαλύτερο από 98% σε στατικές καταστάσεις ή αργές μεταβολές [18]. Ένα στοιχείο όμως που δυσκολεύει τον ακριβή προσδιορισμό του M.P.P, είναι η μερική σκίαση της Φ/Β εγκατάστασης. Έχοντας ως ζητούμενο την αξιολόγηση του ελεγκτή μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής του ηλεκτρονικού μετατροπέα σε συνθήκες ανομοιομορφης σκίασης διερευνήθηκε η λειτουργία του υπό δοκιμή μετατροπέα σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης χρησιμοποιώντας το γενικό δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.

Στο σχήμα 13(α) απεικονίζεται η φόρμα εισαγωγής των συνθηκών μερικής σκίασης στο σύστημα εξομοίωσης Φ/Β χαρακτηριστικών και η ιδανική καμπύλη (χωρίς σκίαση) για την περίπτωση ενός Φ/Β συστήματος 12 πλαισίων SX3200 της εταιρείας BP. Συγκεκριμένα, στο λογισμικό που αναπτύχθηκε ο χρήστης καλείται να επιλέξει αφ' ενός των αριθμών των πλαισίων του Φ/Β συστήματος που επιθυμεί να υποβάλει σε συνθήκες σκίασης και αφ' ετέρου να επιλέξει το ποσοστό σκίασης του κάθε πλαισίου ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αξιολόγηση του ελεγκτή μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής σε οποιοσδήποτε συνθήκες σκίασης.

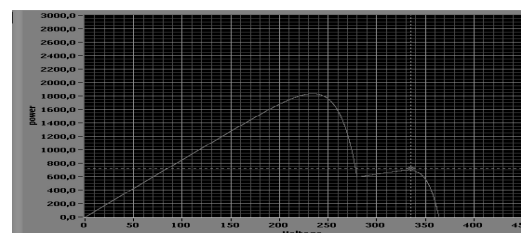
Στα σχήματα 13(β) και 13(γ) παρατίθενται μερικά από τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στις περιπτώσεις σκίασης τριών πλαισίων σε ποσοστά 25% και 75%. Οι επιπτώσεις της σκίασης συγκριτικά με την ιδεατή λειτουργία του Φ/Β συστήματος μπορούν εύκολα να προκύψουν από τη σύγκριση των σχημάτων 13(α)-(γ). Επιπρόσθετα, από τη μελέτη του σχήματος 13(γ) τεκμαίρεται ότι ο ελεγκτής μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής αδυνατεί να εντοπίσει πάντα το σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος ακόμα και στην περίπτωση που δεν αλλάζει ο αριθμός των πλαισίων που σκιάζονται αλλά μόνο το ποσοστό σκίασης αυτών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη σημασία του προβλήματος που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι ηλεκτρονικοί μετατροπέες των Φ/Β συστημάτων.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 13:

- (α): Φόρμα εισαγωγής των συνθηκών μερικής σκίασης και απεικόνιση των χαρακτηριστικών καμπυλών της Φ/Β εγκατάστασης.
- (β): Περίπτωση μερικής σκίασης όπου τρία πλαίσια σκιάζονται σε ποσοστό 25%
- (γ): Περίπτωση μερικής σκίασης όπου τρία πλαίσια σκιάζονται σε ποσοστό 75%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας την παρουσίαση της πειραματικής διερεύνησης του μονοφασικού ηλεκτρονικού μετατροπέα Aurora PVI-3.0-OUTD-S-IT της εταιρείας Power One, αξίζει να επισημάνουμε ότι οι απόκλιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των στοιχείων τα οποία παρέχει ο κατασκευαστής ήταν αρκετά μικρή, αποδεικνύοντας έτσι την αρτιότητα τόσο της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε όσο και της υλικοτεχνικής υποδομής του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κυρίτης Αναστάσιος: “Βέλτιστος σχεδιασμός υψίσυχνου μονοφασικού αντιστροφέα για τη διασύνδεση Φ/Β συστημάτων μικρής ισχύος με το δίκτυο Χ.Τ.”, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009.
- [2] IEC 61000-3-2:2000 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits-Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16\text{A}$ per phase).
- [3] IEC 61000-3-3:1994/A1:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits-Section 3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current $\leq 16\text{A}$.
- [4] IEC 61000-3-4:1998 (TR) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits-Section 4: Limitation of emission of harmonic current in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A .
- [5] IEC 61000-3-5:1994 (TR) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits-Section 5: Limitation of voltage fluctuation and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A .
- [6] European Norm EN 50160: “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, CENELEC 1999.
- [7] Οδηγία Διανομής Νο. 129 της ΔΕΗ: “Τεχνικές προδιαγραφές για τη Σύνδεση Παραγωγών στα Δίκτυα Διανομής”, Αθήνα Μάρτιος 2004, υπό διαμόρφωση.
- [8] Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου: “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Σύνδεση Εγκαταστάσεων Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής”, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003.
- [9] Ε. Τατάκης (Επιστημονικός Υπεύθυνος), Α. Κυρίτης, Ι. Κομπούγιας, Α. Νανάκος, Έκθεση Ενδιάμεσης Φάσης Προόδου του Ερευνητικού Προγράμματος ΠΕΝΕΔ με κωδικό 03ΕΔ440, “Τεχνοοικονομική σύγκριση και ανάπτυξη βέλτιστων υψίσυχνων μονοφασικών μετατροπέων, ενσωματωμένων σε φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, για άμεση διασύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής Ενέργειας”, Απρίλιος 2008.
- [10] Nanakos A.C., Tatakis E.C., “Static and dynamic response of a photovoltaic characteristics simulator”, 13th European Conference on Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), September 1 – 3, 2008, Poznan, Poland, pp. 1827 –1833.
- [11] Νανάκος Α., Τατάκης Ε., Κομπούγιας Ι., “Εργαστηριακή εξομοίωση των χαρακτηριστικών εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου”, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών ΗΜΜΥ με θέμα: “Τεχνολογίες Αιχμής: Έρευνα, Ανάπτυξη, Εφαρμογή”, Αθήνα (Ελλάδα), 25 - 26 Μαΐου, 2007, άρθρο σε CD
- [12] K. Khouzam, C. Ly, C.K. Koh, P.Y. Ng, "Simulation and Real -Time Modelling of Space Photovoltaic Systems", IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC'1994), Vol. 2, Dec. 5-9, 1994, Hawaii, pp.2038-2041.
- [13] John Nickoletatos, Stathis Tselepis, Anastasios Kyritsis, George Zografakis: “CRES Laboratory: Evaluation of Photovoltaic Inverters”, 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, OTTI Renewable Energies, Glyfada (Greece), May 29-30, 2008, paper on CD.
- [14] IEC 62116: Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters.
- [15] N. Cullen, J. Thornycroft, A. Collinson: International Energy Agency Report, IEA PVPS T5-08: 2002 “Risk Analysis of Islanding of Photovoltaic Power Systems within Low Voltage Distribution Networks”, March 2002, [Online]. Available: www.iea-pvps.org.
- [16] Groppi, F. (CESI RICERCA) – Testing of anti-islanding protections for grid-connected inverters – International conference on Clean Electrical Power 2007 (ICCEP2007) – Capri 21-23 May 2007.
- [17] VDE 0126-1-1: Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid.
- [18] T. Esmar, P. L. Chapman: “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.22, No. 7, pp.439-449, June 2007.