ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ Χ.Τ. ΜΕ ΥΨΗΛΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ Α.Π.Ε.

Δ. Βογλίτσης[1], Φ. Βαλσαμάς[1], Ν. Ρηγογιάννης[1], Ν. Παπανικολάου[1]
[1]Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών

e-mail: npapanik@ee.duth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μελέτη των ενεργών τεχνικών ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης οι οποίες είναι κατάλληλες για τους μικροαντιστροφείς (MICs - Module Integrated Converters), υπό το πρίσμα της μαζικής διείσδυσης διεσπαρμένων φωτοβολταϊκών μονάδων (Φ/Β). Με σκοπό τη σύγκριση αυτών των μεθόδων υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας και προδιαγραφές, καθορίζεται μία διαδικασία πειραματικών δοκιμών και αξιολόγησης με κριτήρια τη ζώνη μη ανίχνευσης (Non Detection Zone, NDZ), τη ζώνη εσφαλμένης ανίχνευσης (False Detection Zone, FDZ) και τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις υψηλής ποιότητας ισχύος. Με βάση τα συγκριτικά αποτελέσματα, προτείνονται οι καταλληλότερες μέθοδοι για μελλοντική εφαρμογή στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (Χ.Τ.).

Λέξεις-Κλειδιά: διεσπαρμένη παραγωγή, φαινόμενο νησιδοποίησης, μικροαντιστροφείς

Abstract

This paper presents a comprehensive study of active anti-islandic techniques suitable for micro-inverters (MICs - Module Integrated Converters) which considers the high penetration level prospect of distributed PVs. In order to compare these methods under the same operating conditions and specifications, a benchmark is set based on zero Non-Detection Zone (NDZ), False Detection Zone (FDZ) and power-quality requirements compliance. Based on comparative results, the most suitable methods for future implementation in low-voltage distribution networks are suggested.

Keywords: distributed generation, islanding detection, micro-inverters

1. Εισαγωγή

Τα μικρής κλίμακας διεσπαρμένα Φ/Β συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο Χ.Τ. έχουν αναπτυχθεί εκτεταμένα τα τελευταία χρόνια, με τις οικιακές εφαρμογές να κατέχουν το σημαντικότερο μερίδιο σ' αυτήν την αναπτυσσόμενη αγορά (Yang et al. 2015). Σήμερα, η παγκόσμια τάση στους Φ/Β αντιστροφείς διασύνδεσης γι' αυτές τις εφαρμογές, είναι η τεχνολογία των μικροαντιστροφέων (Module Integrated Converter, MIC) (, Li et al. 2008, Nanakos et al. 2015, Tamyurek et al. 2015, Voglitsis et al. 2017). Αυτή η εξαιρετικά ευέλικτη τεχνολογία επιτυγχάνει βέλτιστη εκμετάλλευση του Φ/Β συστήματος και μέγιστη αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής. Έτσι, όταν πρόκειται για πυκνοκατοικημένες

περιοχές όπου τα προβλήματα χώρου είναι αναπόφευκτα, οι μικροαντιστροφείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ιδανικά, συνιστώντας μια πολύ ελκυστική λύση.

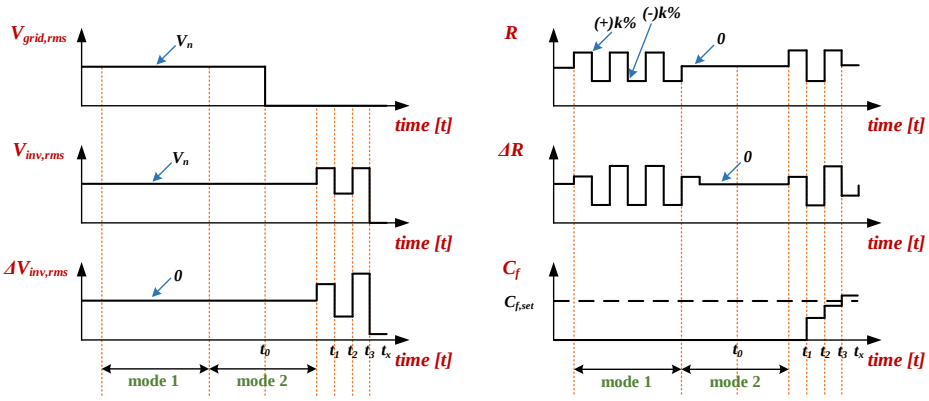
Η υψηλή προοπτική διείσδυσης των διεσπαρμένων Φ/Β συστημάτων έχει επιφέρει αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τους Φ/Β αντιστροφείς σήμερα (Yang et al. 2015, Yang et al. 2016), υπογραμμίζοντας, μεταξύ άλλων, την ανάγκη ισχυρών χαρακτηριστικών προστασίας κατά του φαινομένου της νησιδοποίησης (AN), ακόμη και σε δίκτυα διανομής Χ.Τ. Σ' αυτό το πλαίσιο οι MICs θα πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με αξιόπιστα συστήματα ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης.

Με βάση τις υπάρχουσες επιστημονικές εργασίες που συνοψίζουν τις σημαντικότερες ενεργές τεχνικές AN (Ahmad et al. 2013, Bower et al. 2002, Datta et al. 2016, Kyritsis et al. 2016, Mahat et al. 2008, Teoh et al. 2011), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το ζήτημα αυτό δεν έχει καλυφθεί επαρκώς από τη βιβλιογραφία για την περίπτωση των MICs. Αυτό οφείλεται κυρίως στον εγγενή μοναδιαίο συντελεστής μετατόπισης (Displacement Power Factor, DPF) της εν λόγω τεχνολογίας, μην επιτρέποντας έτσι τον σχηματισμό αρμονικών συνιστωσών ρεύματος. Επιπρόσθετα, παρεμποδίζεται και η εφαρμογή τεχνικών AN που στηρίζονται στη μετατόπιση της συχνότητας, όπως οι AFD, SFS και SMSFS (Bower et al. 2002). Τέλος, η μονοκατευθυντική ροή ισχύος των τοπολογιών αυτών δεν επιτρέπει τις τεχνικές που βασίζονται σε μεταβολή της αέργου ισχύος, όπως αυτή στην εργασία (Chen et al. 2016).

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μελέτη των τεχνικών ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης, κατάλληλων για MICs. Η σύγκριση υποστηρίζεται από εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις σε έναν πρωτότυπο μικροαντιστροφέα, καταλήγοντας σε ορισμένα πολύτιμα συμπεράσματα από την οπτική γωνία των MICs.

2. Περιγραφή των επιλεγμένων μεθόδων AN

2.1 Μέθοδοι διαταραχής της ενεργού ισχύος - Συσχετιστική μέθοδος ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης με διαταραχή στο πλάτος του ρεύματος



Σχήμα 1. Βασικές κυματομορφές στην εργασία (Yu et al. 2011)

Αυτή η μέθοδος διαταράσσει περιοδικά το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα (δηλαδή το ΔR στο σχήμα 1), έτσι ώστε να προκαλέσει διαταραχή στη τάση εξόδου του αντιστροφέα (Yu et al. 2011). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν υπολογίζει τη εμπέδηση, αλλά εκτιμά την προκαλούμενη διαταραχή εμμέσως, μέσω ενός αλγόριθμου συσχέτισης. Ο δείκτης

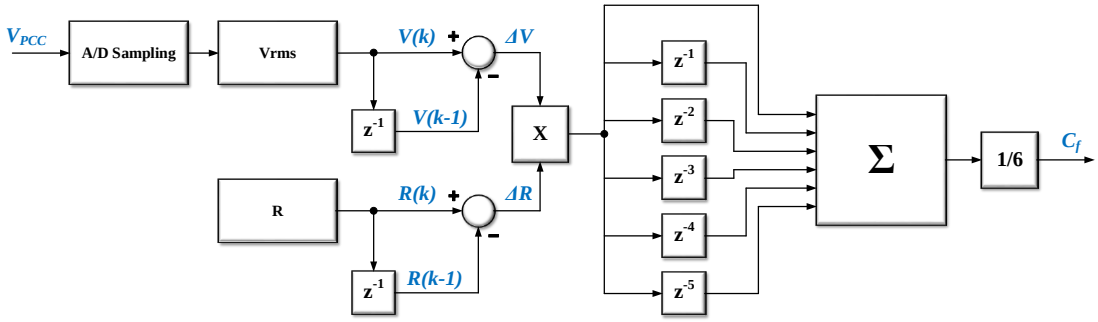
συσχέτισης C_f υπολογίζεται μέσω ενός κινούμενου παραθύρου 6 κύκλων χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$C_f = \frac{1}{N} \sum_{k=i-N}^{i-1} \Delta V_{PCC,rms}[k] \times \Delta R[k] \ (1)$$

$$\Delta V_{PCC,rms}[k] = V_{PCC,rms}[k] - V_{PCC,rms}[k-1] \ (2)$$

$$\Delta R[k] = R[k] - R[k-1] \ (3)$$

N είναι ο αριθμός των περιόδων όπου το C_f υπολογίζεται, $V_{inv,rms}[k]$ είναι η μετρούμενη ενεργός τιμή της τάσης για την περίοδο k και R[k] είναι το ποσοστό της διαταραχής βάσει του ονομαστικού ρεύματος. Ένας πιθανός τρόπος για τη υλοποίηση αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Η νησιδοποίηση μπορεί αποτελεσματικά να ανιχνευθεί συγκρίνοντας το C_f με ένα όριο, $C_{f,thr}$, η υπέρβαση του οποίου είναι η ένδειξη ότι ο αντιστροφέας έχει αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Επομένως, το $C_{f,thr}$ πρέπει να καθοριστεί αναλόγως, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη προσδοκώμενη τιμή του C_f στην κατάσταση νησιδοποίησης. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδους είναι οι μηδενικές ζώνες NDZ και FDZ. Όμως, αυτή η μέθοδος διαταράσσει την ισχύ εξόδου του αντιστροφέα, προκαλώντας έτσι πολλά προβλήματα (Flicker, μεταβατικά φαινόμενα, κ.τ.λ.), ιδιαίτερα υπό υψηλό ποσοστό διείσδυσης. Άλλο ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η διαταραχή του ρεύματος πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, έτσι ώστε να αποφευχθεί το εσφαλμένο άνοιγμα του διακόπτη λόγω τυχαίων συμβάντων, επιβαρύνοντας την ποιότητα ισχύος. Συνεπώς, ένας συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας του συστήματος είναι αναπόφευκτος.



Σχήμα 2. Χονδρικό διάγραμμα υλοποίησης της μεθόδου (Yu et al. 2011)

2.2 Μέθοδοι έγχυσης αρμονικών συνιστωσών

2.2.1 Μέθοδος ΑΝ που βασίζεται στον αλγόριθμο Goertzel

Αυτή η μέθοδος εγχέει συνεχόμενα $9^{ης}$ τάξης αρμονική συνιστώσα ρεύματος και υπολογίζει την απόκριση του δικτύου μέσω του αλγόριθμου Goertzel (Kim et al. 2011). Επειδή η $Z_{pcc,9th}$ (εμπέδηση εξόδου του αντιστροφέα στην $9^{η}$ αρμονική) είναι μικρότερη κατά τη διασύνδεση με το δίκτυο σε σύγκριση με τη νησιδοποιημένη λειτουργία, η προκαλούμενη $V_{pcc,9th}$ (η $9^{ης}$ τάξης αρμονική συνιστώσα στο σημείο σύνδεσης - Point of Common Coupling, PCC) είναι μικρότερη υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, το φαινόμενο της νησίδας μπορεί να ανιχνευθεί συγκρίνοντας τη $V_{pcc,9th}$ με ένα προκαθορισμένο όριο. Αυτό το όριο καθορίζεται από τη ελάχιστη προσδοκώμενη $V_{pcc,9th}$ κατά την κατάσταση νησιδοποίησης.

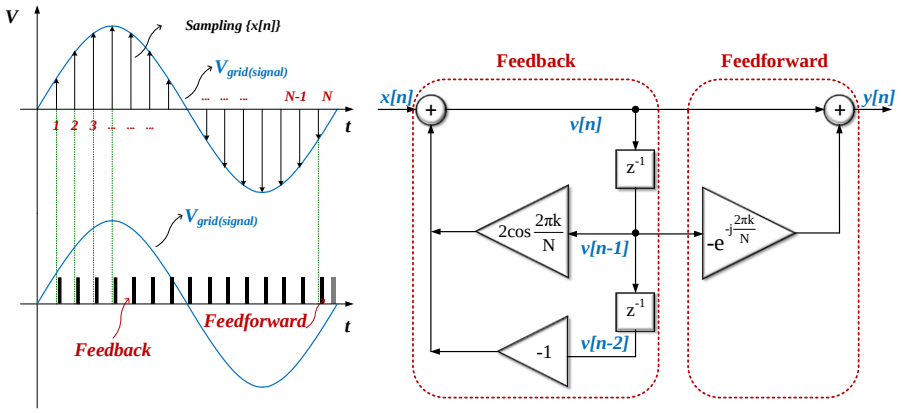
Ο αλγόριθμος Goertzel υπολογίζει άμεσα το πλάτος και τη φάση της αρμονικής συνιστώσας της τάσης που ενδιαφερόμαστε. Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το N-σημείο του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) σύμφωνα με τη εξίσωση (4), με αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτούμενων μαθηματικών πράξεων που χρειάζονται για τον υπολογισμό του αρμονικού περιεχομένου.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \times e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)\cdot n\cdot k} \quad (4)$$

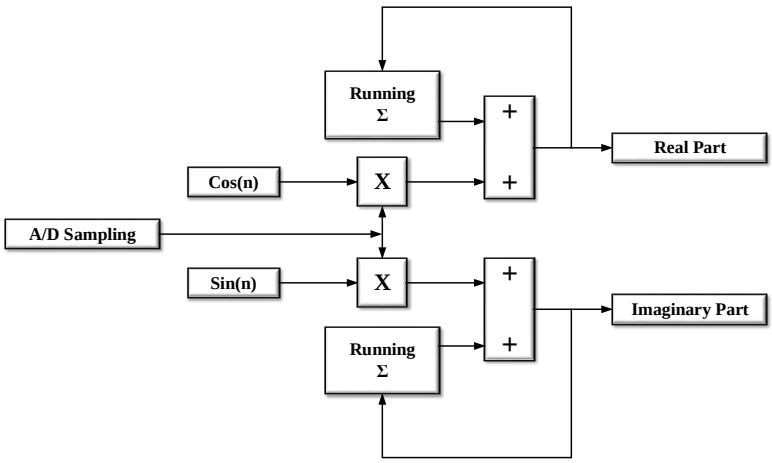
$$k = N \times f_{int}/f_s \quad (5)$$

x[n] είναι το σήμα εισόδου (n = 0, 1,… N-1), k ο δείκτης για μια συγκεκριμένη συχνότητα (k = 0, 1, 2,… N-1), N ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος εισόδου και f_s, f_{int} οι συχνότητες δειγματοληψίας και ενδιαφέροντος αντίστοιχα.

Το χονδρικό διάγραμμα υλοποίησης αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3, έχοντας ως βάση τον Z-μετασχηματισμό του αλγόριθμου Goertzel. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το χαμηλό υπολογιστικό κόστος (σε σύγκριση με τον αλγόριθμο Fourier). Επιπλέον, η ζώνη NDZ της μεθόδου αυτής μπορεί να μειωθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής του προκαθορισμένου ορίου που διακρίνει τις δύο καταστάσεις (νησιδοποίησης και διασύνδεσης με το δίκτυο). Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη ζώνης FDZ δεν μπορεί να αποφευχθεί, όπως θα δειχθεί σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 3. Χονδρικό διάγραμμα υλοποίησης της μεθόδου (Kim et al. 2011)



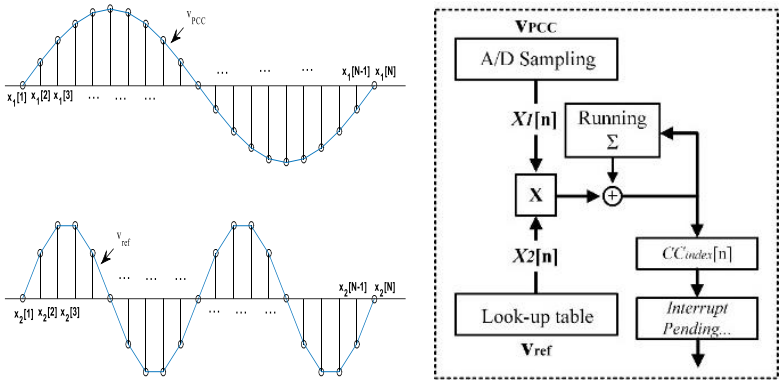
Σχήμα 4. Χονδρικό διάγραμμα υλοποίησης της μεθόδου (Asiminoaei et al. 2005)

2.2.2 Εκτίμηση της εμπέδησης του δικτύου σε συγκεκριμένη συχνότητα

Σε αυτήν τη μέθοδο μία αρμονική συνιστώσα ρεύματος σε συγκεκριμένη συχνότητα εγχέεται περιοδικά στο PCC. Η εμπέδηση σε αυτήν τη συχνότητα υπολογίζεται και εκτιμάται η κατάσταση του αντιστροφέα (Asiminoaei et al. 2005, Voglitsis et al. 2017,). Η εμπέδηση στη συγκεκριμένη συχνότητα συνήθως υπολογίζεται με DFT, μετρώντας την τάση και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα στη συγκεκριμένη αρμονική (V_h, I_h αντίστοιχα). Η παρακάτω εξίσωση προσδιορίζει την τιμή της εμπέδησης στη συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ ένας τρόπος υλοποίησης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.

$$Z_h = V_h / I_h \quad (6)$$

Ο υπολογισμός της εμπέδησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατάστασης του αντιστροφέα, σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE 929-2000 και IEEE 1547, θέτοντας ένα όριο (Z_{thr}), καθώς και με το γερμανικό πρότυπο VDE-0126-1-1. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μηδενική ζώνη NDZ. Όμως, όσον αφορά τις απαιτήσεις από τα πρότυπα IEEE 929-2000 και IEEE 1547, ο καθορισμός ενός ορίου που εξασφαλίζει τόσο την αποφυγή εσφαλμένου ανοίγματος του διακόπτη όσο και τη διατήρηση του NDZ δεν είναι πάντα εφικτός. Συνεπώς, η παρουσία ζώνης FDZ είναι μερικές φορές αναπόφευκτη. Τέλος, η υλοποίηση του DFT στη V_h καθώς και στην I_h αυξάνει ραγδαία το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου αυτής.



Σχήμα 5. Χονδρικό διάγραμμα υλοποίησης της μεθόδου (Voglitsis 2018)

2.2.3 Μέθοδος cross-correlation

Σε αυτήν τη μέθοδο εγχέεται περιοδικά μία αρμονική συνιστώσα ρεύματος $2^{ης}$ τάξης στο PCC και εκτιμάται η απόκριση του δικτύου μέσω ενός αλγορίθμου συσχέτισης σημάτων (Voglitsis 2018). Παρόμοια με τις προηγούμενες μεθόδους, η μέθοδος εκμεταλλεύεται τις διαφορετικές εμπεδήσεις στην έξοδο του αντιστροφέα στις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Επομένως, ένα όριο (CC_{thr}) πρέπει να οριστεί και η κατάσταση νησιδοποίησης ανιχνεύεται όταν η τιμή του δείκτη συσχέτισης (CC_{index}) ξεπεράσει το προκαθορισμένο όριο. Το CC_{index} υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$CC_{index} = v_{pcc} \otimes v_{ref} \quad (7)$$

CC_{index} είναι ο δείκτης συσχέτισης, v_{pcc} η μετρούμενη τάση στο PCC και v_{ref} το σήμα αναφοράς στη συχνότητα ενδιαφέροντος. Ένας πιθανός τρόπος για τη υλοποίηση της (7) παρουσιάζεται στο σχήμα 5. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μηδενική ζώνη NDZ και το χαμηλό υπολογιστικό κόστος υλοποίησής της. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί την έγχυση μεγάλων αρμονικών συνιστωσών ρεύματος, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η ποιότητα ισχύος. Παρ' όλα αυτά, η FDZ δεν μπορεί να αποφευχθεί, μπορεί

όμως να μειωθεί λόγω της ευελιξίας του αλγορίθμου συσχέτισης σημάτων. Τέλος, η επιλογή της τάξης της εγχεόμενης αρμονικής είναι υψίστης σημασίας για την FDZ και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

3. Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα, οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν αξιολογούνται και συγκρίνονται πειραματικά, υπό συνθήκες υψηλών ποσοστών διείσδυσης· αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης των τιμών ωμικής αντίστασης και επαγωγικής αντίδρασης του δικτύου. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε έναν πειραματικό πάγκο δοκιμών, όπου ένας MIC μέγιστης ισχύος 500 W έχει χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση με το δίκτυο. Η υλοποίηση των εναλλακτικών σχημάτων AN, ο έλεγχος της πειραματικής διαδικασίας και η συλλογή των μετρήσεων υλοποιούνται σε μία μονάδα dSPACE MicroLabBox. Τέλος, τα ονομαστικά στοιχεία του δικτύου είναι $V_{grid,rms}$ = 90 V ± 15% / 50 Hz και x_r =1 (όπου x_r ο λόγος της επαγωγικής αντίδρασης προς την ωμική ανίσταση του δικτύου, στο PCC), ενώ το μέγιστο ποσοστό διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής μέσω του MIC (η εγχεόμενη ενεργή ισχύς ως ποσοστό της στάθμης βραχυκύκλωσης στο PCC) ορίστηκε στην τιμή a = 35%. Επισημαίνεται ότι η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή με βάση τα σημερινά δεδομένα παραγωγής από διεσπαρμένες Φ/Β μονάδες στα δίκτυα Χ.Τ., αναφέρεται δε σε ασθενές δίκτυο Χ.Τ.

Πίνακας 1. Προδιαγραφές των εφαρμοζόμενων μεθόδων.

	Μοτίβο	Έγχυση % (10 cycles)	Όριο αρμονικής %	THD_I %
Goertzel				
2nd (modified)	1/10	5.3 (0.52)	1	5
9th (Kim et al. 2011)	Cont.	4 (4.08)	4	6.74
Impedance				
75 Hz (Asiminoaei et al. 2005)	2/10	2.6 (0.47)	1	5.55
2nd (Voglitsis et al. 2011)	1/10	5.3 (0.52)	1	5
CC (Yu et al. 2011)				
±2%	6/12	-	-	<5
±8%	6/12	-	-	<5
CC				
25 Hz (modified)	2/10	2.6 (0.51)	1	4.47
2nd (Voglitsis 2018)	1/10	5.3 (0.52)	1	5

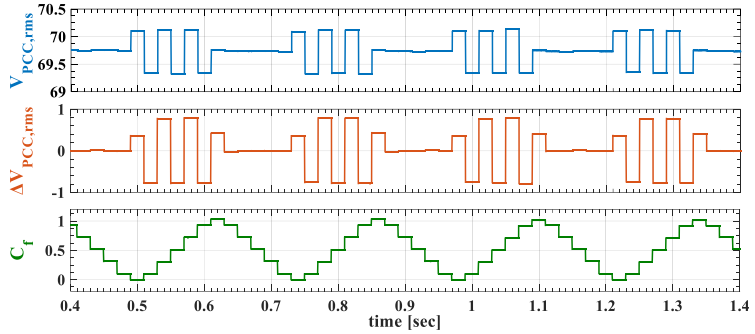
Οι τεχνικές AN υλοποιήθηκαν σύμφωνα με τα χονδρικά διαγράμματα της Ενότητας 2, ενώ μια σύνοψη των μοτίβων έγχυσης που χρησιμοποιούνται παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Τα

πλάτη-ποσοστά της έγχυσης, οι αντίστοιχες μετρούμενες αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος (μαζί με τα αντίστοιχα όριά τους), καθώς και η συνολική αρμονική παραμόρφωση THD_I για κάθε μέθοδο συνοψίζονται επίσης στον Πίνακα 1. Στη συνέχεια, ενδεικτικές πειραματικές κυματομορφές για κάθε μέθοδο παρουσιάζονται και αναλύονται εν συντομία.

3.1 Υλοποίηση των επιλεγμένων μεθόδων

3.1.1 Συσχετιστική (correlation based) μέθοδος ΑΝ

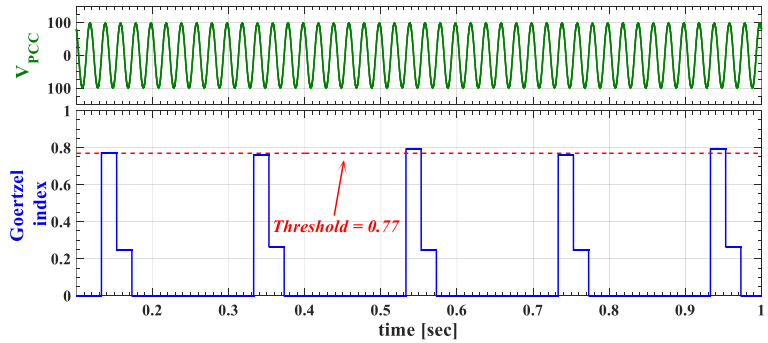
Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται οι πειραματικές κυματομορφές των $V_{PCC,rms}$, $\Delta V_{PCC,rms}$ και C_f. Το όριο γι' αυτή τη μέθοδο τίθεται στο 3.3, επομένως η εσφαλμένη ανίχνευση του φαινομένου της νησιδοποίησης είναι μάλλον περιορισμένη στο συγκεκριμένο ποσοστό διείσδυσης, a = 9.5%.



Σχήμα 6. Βασικοί δείκτες της μεθόδου (Yu et al. 2011): $V_{PCC,rms}$, $\Delta V_{PCC,rms}$, C_f.

3.1.2 Μέθοδος ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Goertzel

Η μέθοδος αυτή προτείνει την έγχυση μιας 9ης τάξης αρμονικής συνιστώσας ρεύματος. Ωστόσο, η εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνικής είναι αρκετά προβληματική, ιδίως για υψηλούς συντελεστές ποιότητας (Q_L) φορτίου. Ως εναλλακτική αυτής της τεχνικής, χρησιμοποιήθηκε μία αρμονική συνιστώσα 2ης τάξης. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7, η εσφαλμένη ανίχνευση του φαινομένου της νησιδοποίησης είναι αναπόφευκτη για το συγκεκριμένο ποσοστό διείσδυσης (a=18.68%).

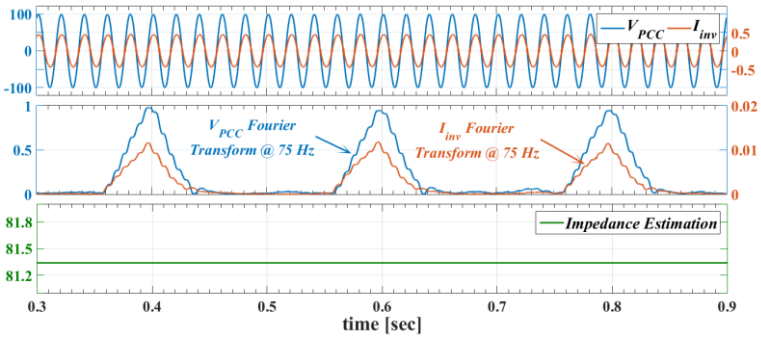


Σχήμα 7. Κυματομορφές της (τροποποιημένης) μεθόδου (Kim et al. 2011) στα 25 Hz: V_{PCC}, index, threshold

3.1.3 Εκτίμηση της εμπέδησης του δικτύου σε συγκεκριμένη συχνότητα

Στο σχήμα 8 παρουσιάζονται πειραματικές κυματομορφές των V_{pcc}, I_{inv},V_{75Hz}, I_{75Hz} και Z_{75Hz}. Σε ποσοστό διείσδυσης a=25,88% η πιθανότητα για εσφαλμένη ανίχνευση νησίδας είναι περιορισμένη, κάτι το οποίο είναι πολλά υποσχόμενο. Παρ'όλα αυτά, κρίθηκε

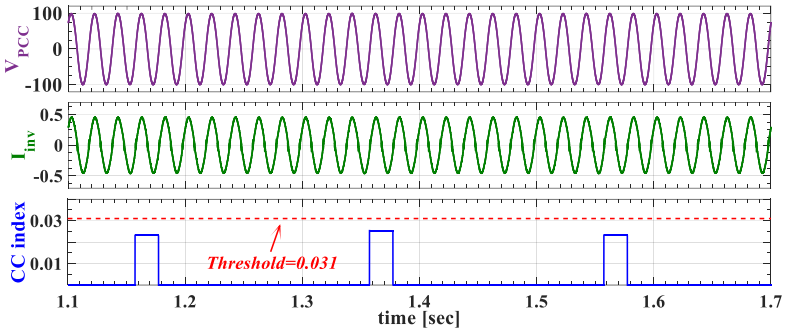
αναγκαία η χρησιμοποίηση μέσης τιμής στο Z_{75Hz} έτσι ώστε να διατηρηθεί η ακρίβεια της μεθόδου, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος υλοποίησης.



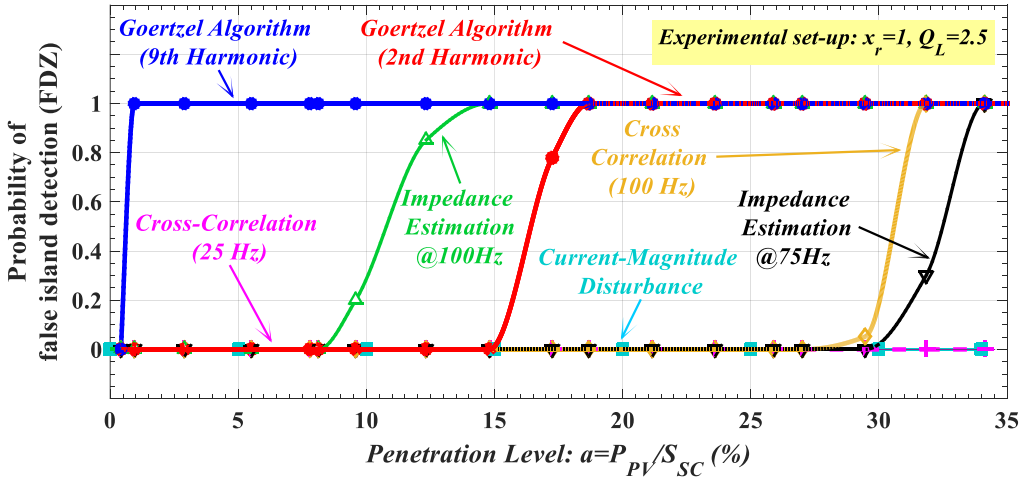
Σχήμα 8. Κυματομορφές της μεθόδου (Asiminoaei et al. 2005): V_{pcc}, I_{inv}, μετρούμενες τιμές V_{75}, I_{75} και εκτιμούμενη εμπέδηση Z_{75}

3.1.4 Μέθοδος cross-correlation (Voglitsis 2018)

Ενδεικτικές κυματομορφές των V_{pcc}, I_{inv} και CC_{index} αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στο σχήμα 9. Το ποσοστό διείσδυσης σε αυτή την δοκιμή είναι α=21.16%. Για το συγκεκριμένο ποσοστό διείσδυσης αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μηδενικό FDZ.



Σχήμα 9. Κυματομορφές της μεθόδου (Voglitsis 2018): V_{pcc}, I_{inv} ,CC_{index}

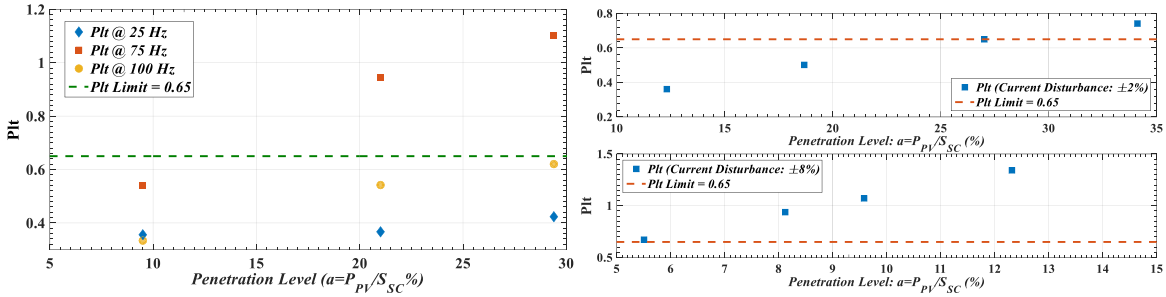


Σχήμα 10. Ζώνη FDZ των υλοποιημένων μεθόδων

3.2 Εκτίμηση των υλοποιημένων μεθόδων

Πολλαπλά πειράματα διεξήχθησαν με σκοπό την εκτίμηση της ζώνης FDZ και της ποιότητας ισχύος των παραπάνω μεθόδων. Αρχικά, η ζώνη FDZ παρουσιάζεται στο σχήμα 10. Επιπρόσθετα, η ποιότητα ισχύος όσον αφορά το THD_i και το Flicker υπολογίστηκαν και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και στο σχήμα 11.

Συμπερασματικά, η πιο ελκυστική λύση όσον αφορά την προστασία αντι-νησιδοποίησης για τους MICs, με γνώμονα τα υψηλά επίπεδα διείσδυσης διεσπαρμένων Φ/Β μονάδων στα δίκτυα Χ.Τ., φαίνεται να είναι η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία (Voglitsis 2018). Αυτή η μέθοδος απαιτεί το λιγότερο υπολογιστικό κόστος και παράλληλα δεν χρειάζεται ανατροφοδότηση του ρεύματος εξόδου. Επιπρόσθετα, έχει μικρή επίδραση στην ποιότητα ισχύος, μηδενική ζώνη NDZ και περιορισμένη ζώνη FDZ.



α) *β)*

Σχήμα 11. Απαιτήσεις Flicker τάσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 61000
(α) μέθοδοι βασισμένοι στη αρμονική έγχυση (β) μέθοδος στο (Yu et al. 2011)

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μελέτη των τεχνικών ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης οι οποίες είναι κατάλληλες για τους αντιστροφείς τύπου MICs. Οι πλέον σύγχρονες μέθοδοι ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης παρουσιάστηκαν και οι περισσότερο ελκυστικές μέθοδοι, συμβατές με τους MICs επιλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν πειραματικά. Η μελέτη ανέδειξε το γεγονός ότι οι μέθοδοι έγχυσης αρμονικών, καθώς και η μέθοδος στο (Yu et al. 2011), αποτελούν τις καταλληλότερες λύσεις για προστασία κατά του φαινομένου της νησιδοποίησης στους MICs. Σε αυτό το πλαίσιο, η εργασία αναδεικνύει ότι οι έμμεσες μέθοδοι (όπως η μέθοδος στην εργασία (Voglitsis 2018)) υπερισχύουν έναντι των υπολοίπων μεθόδων και σχημάτων έγχυσης αρμονικών, καθιστώντας τες ως τις πλέον κατάλληλες για εφαρμογή σε υψηλά ποσοστά διείσδυσης. Τέλος, η παρούσα εργασία υπογραμμίζει την αναγκαιότητα αναθεώρησης των υφιστάμενων κανονισμών, ώστε να ληφθούν υπόψη τα ζητήματα ποιότητας ισχύος που προκύπτουν από την προοπτική υψηλών ποσοστών διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής.

5. Βιβλιογραφία

Ahmad K.N.E.K., Selvaraj J., Rahim N.A.: *"A review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, pp. 756-766, 2013

Asiminoaei L., Teodorescu R., Blaabjerg F., et al.: *"A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection"*, IEEE Trans. Power Electron., 20, (6), pp. 1480-1490, 2005

Bower W., Ropp M.: *"Evaluation of islanding detection methods for utility-interactive inverters in photovoltaic systems"*, SANDIA REPORT, SAND2002-3591, Unlimited Release, November 2002

Chen X., Li Y.: *"An islanding detection method for inverter-based distributed generators based on the reactive power disturbance"*, IEEE Trans. Power Electron., 31, (5), pp. 3559-3574, 2016

Datta A., Saha D., Ray A., et al: *"Evaluation of anti-islanding techniques for renewable energy powered distributed generators using analytic network process"*, IET Renewable Power Generation, 10, (9), pp.1245-1254, 2016

Kim J.-H., Kim J.-G., Ji Y.-H., et al.: *"An islanding detection method for a grid-connected system based on the Goertzel algorithm"*, IEEE Trans. Power Electron., 26, (4), pp. 1049-1055, 2011

Kyritsis A., Papanikolaou N., Tselepis S., et al.: *"Islanding Detection Methods for Distributed PV Systems; Overview and Experimental Study"*, in Karampelas P., Economou L., (Eds.): *"Electricity Distribution. Energy Systems"*, pp. 63-79, (Springer, 2016)

Li Q., Wolfs P.: *"A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations"*, IEEE Trans. Power Electron., 23, (3), pp. 1320-1333, 2008

Mahat P., Chen Z., Bak-Jensen B.: *"Review of islanding detection methods for distributed generation"*, Proc. 3rd Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 2743-2748, 6-9 April 2008, Nanjing, China

Nanakos A.C., Christidis G.C., Tatakis E.C.: *"Weighted efficiency optimization of flyback micro-inverter under improved boundary conduction mode (i-BCM)"*, IEEE Trans. Power Electron., 30, (10), pp. 5548-5564, 2015

Tamyurek B., Kirimer B.: *"An interleaved high-power flyback inverter for photovoltaic applications"*, IEEE Trans. Power Electron., 30, (6), pp. 3228-3241, 2015

Teoh W.Y., Tan C.W.: *"An Overview of Islanding Detection Methods in Photovoltaic Systems"*, 58th International Conference of World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET, pp. 674-682, 26-28 October 2011, Bali, Indonesia

Yang Y., Enjeti P., Blaabjerg F., et al.: *"Wide-scale adoption of photovoltaic energy: grid code modifications are explored in the distribution grid"*, IEEE Ind. Appl. Mag., 21, (5), pp. 21-31, 2015

Voglitsis D.: *"Investigation of control of inverters for the interconnection of dispersed energy sources with the low-voltage grid"*, PhD thesis, Democritus University of Thrace, 2018

Voglitsis D., Papanikolaou N.P., Kyritsis A.: *"Incorporation of harmonic injection in an interleaved flyback inverter for the implementation of an active anti-islanding technique"*, IEEE Trans. Power Electron., 32, (11), pp. 8526-8543, 2017

Yang Y., Blaabjerg F., Wang H., et al.: *"Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters"*, IET Renewable Power Generation, 10, (4), pp. 504-513, 2016

Yu B.-G., Matsui M., Yu G.-J.: *"A correlation-based islanding-detection method using current-magnitude disturbance for PV system"*, IEEE Trans. Ind. Electron., 58, (7), pp. 2935-2943, 2011