



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συμβολή στην ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης εκπομπών αρμονικών από ανεμογεννήτριες

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σωκράτης Θ. Τεντζεράκης

Επιβλέπων:

Σταύρος Α. Παπαθανασίου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συμβολή στην ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης εκπομπών αρμονικών από ανεμογεννήτριες

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σωκράτης Θ. Τεντζεράκης

Συμβουλευτική Επιτροπή: Σταύρος Παπαθανασίου (Επιβλέπων)
Στέφανος Μανιάς
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Ματσόπουλος
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Γ. Σταυρακάκης
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

.....

Σωκράτης Θεοδώρου Τεντζεράκης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Σωκράτης Θεοδώρου Τεντζεράκης, 2013.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή έχει αντικείμενο την ανάλυση των αρμονικών εκπομπών ανεμογεννητριών και επικεντρώνεται σε τρία ειδικότερα θέματα:

- Τη συστηματική μελέτη και ανάλυση των φασματικών χαρακτηριστικών του ρεύματος ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, βασισμένη σε μετρήσεις πεδίου, με εφαρμογή της μεθοδολογίας που προτείνεται από τα ισχύοντα διεθνή πρότυπα (IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7) και ακολουθείται κατά τη διαδικασία πιστοποίησης των εμπορικών μηχανών.
- Τη μελέτη και εφαρμογή προηγμένων μεθόδων ανάλυσης αρμονικών σε μετρήσεις ανεμογεννητριών, με στόχο τη συμπλήρωση της μεθοδολογίας του προτύπου IEC 61000-4-7.
- Τη μελέτη και αξιολόγηση αρμονικών εκπομπών αιολικού πάρκου για την αναγνώριση της συμβολής των επιμέρους πηγών στη διαμόρφωση του συνολικού ρεύματος και την αξιολόγηση των βασικών παραδοχών του προτύπου IEC 61000-3-6.

Αναλυτικότερα, η διατριβή ξεκινά με την επιστάμενη μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών μοντέρνας τεχνολογίας ακολουθώντας τη μεθοδολογία του προτύπου IEC 61400-21. Αξιοποιώντας μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε εμπορικές ανεμογεννήτριες διαφόρων τύπων, μελετάται η επίδραση των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας και υπολογιστικών παραμέτρων στο επίπεδο και τα χαρακτηριστικά των αρμονικών του ρεύματος εξόδου και εξάγονται συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των αρμονικών εκπομπών των ανεμογεννητριών και την ακρίβεια υπολογισμού τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα αυτά, πραγματοποιείται στη συνέχεια διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής προηγμένων μεθόδων αρμονικής ανάλυσης, εναλλακτικών του μετασχηματισμού Fourier, που χρησιμοποιούνται ολοένα και συχνότερα τα τελευταία χρόνια για την ανάλυση αρμονικών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όχι όμως ακόμη στις ανεμογεννήτριες. Διερευνώντας ένα ευρύ φάσμα μεθόδων επιλέγονται οι επικρατέστερες για περαιτέρω μελέτη που είναι ο μετασχηματισμός Wavelets, η μέθοδος Hilbert-Huang και η μέθοδος Prony. Οι μέθοδοι αυτές, αφού επαληθευθούν μέσω δοκιμών σε επιλεγμένα συνθετικά σήματα και αποτελέσματα προσομοίωσης, εφαρμόζονται σε πραγματικά σήματα μετρήσεων ανεμογεννητριών για την τεκμηρίωση, κριτική αξιολόγηση και συμπλήρωση της καθιερωμένης μεθοδολογίας των προτύπων IEC 61000-4-7 και IEC 61400-21 βοηθώντας στη εξαγωγή συμπερασμάτων, όχι μόνο για την αποτελεσματικότητά τους στην ακριβέστερη εκτίμηση των αρμονικών εκπομπών, αλλά και σχετικά με ιδιαίτερα φασματικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που δεν προκύπτουν άμεσα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier.

Τέλος, ως Παράρτημα της διατριβής, η μεθοδολογία μελέτης των αρμονικών μεμονωμένων ανεμογεννητριών επεκτείνεται στην ανάλυση πραγματικών μετρήσεων αιολικών πάρκων, από την οποία προκύπτουν χρήσιμες διαπιστώσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά των αρμονικών εκπομπών των αιολικών εγκαταστάσεων.

Λέξεις κλειδιά

Ανεμογεννήτριες, αιολικά πάρκα, αρμονικές ρεύματος και τάσης, μετρήσεις αρμονικών, πρότυπα IEC, IEC 61400-21, IEC 61000-4-7, μετασχηματισμός Fourier, μετασχηματισμός Wavelets, μέθοδος Hilbert-Huang, μέθοδος Prony, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

ABSTRACT

The state of the art in the calculation of wind turbine (WT) harmonic emissions, according to IEC Standard 61400-21, is based on the requirements of IEC 61000-4-7, which covers harmonic measurement and assessment in all power supply systems. The fundamental approach of IEC 61000-4-7 consists in the application of the Fast Fourier Transform (FFT) with specific assumptions for the window type and duration reflecting a compromise between accuracy and computational burden. To cope with spectral leakage due to imperfect frequency resolution of the FFT and the non-stationarity of the examined signals, the Standard recommends the use of Phase Locked Loop (PLL) devices in the measurement stage and the application of the methodology of “grouping” in the assessment stage.

Although IEC 61000-4-7 is adopted by all measuring institutes involved in PQ certification of commercial WTs, several aspects are still open to further investigation. This Phd Thesis deals with evaluation of the current methodology of the measurement and assessment of WT harmonics according to IEC 61400-21 and IEC 61000-4-7 standards, based on field measurements, and the study and application of alternative harmonic analysis methodologies more suitable for non-stationary signals. As part of the study, harmonic emissions of a wind farm (WF) are also investigated, aiming at the identification of contribution of individual harmonic sources (i.e. WTs) to the formation of the aggregate wind farm current, for the discussion of the basic hypotheses of IEC 61000-3-6.

The thesis begins with the study of the most significant harmonic analysis methods, in terms of WT current and voltage processing. Then, the FFT-based grouping methodology, introduced by the IEC 61000-4-7, is presented and discussed. Based on field measurements, a thorough investigation of WT harmonic emissions is performed, including the effect of the WT operating point and the selection of calculation parameters. The examined WTs represent a variety of configurations regarding the electrical system and important results are drawn concerning the spectral characteristics and the statistical behavior of harmonic currents, applying the IEC 61000-4-7 methodology. Next, the Wavelet Transform, the Hilbert-Huang Transform and Prony methods are applied, first to selected synthetic signals and then to real WT signals, in order to evaluate their suitability and identify particular advantages, drawbacks and limitations in their applicability in the assessment of WT harmonics. Finally, the analysis of real WF measurements is included, from which useful conclusions are drawn about the contribution of single WTs to the total harmonic current emissions of wind installations.

Keywords

Wind turbines, wind farms, current and voltage harmonics, power quality, harmonic measurements, harmonic limits, Fourier Transform, Wavelet Transform, Hilbert-Huang Transform, Prony method, electric power systems.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα της πολυετούς ενασχόλησής μου με το αντικείμενο της ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών, που ξεκίνησε σε προπτυχιακό επίπεδο στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του ΕΜΠ, υπό την καθοδήγηση του κ. Μιχάλη Παπαδόπουλου, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ και συνεχίστηκε σε μεταπτυχιακό επίπεδο στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής, υπό την επίβλεψη του κ. Σταύρου Παπαθανασίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, παράλληλα με την επαγγελματική μου δραστηριότητα στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας.

Αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου πρωτίστως στον κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την καθοριστική συμβολή του στην πρόοδο και περάτωση της παρούσας διατριβής, με τη συνεχή και ουσιαστική επιστημονική καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια, τις καίριες επισημάνσεις και τις πολύτιμες συμβουλές του. Τον ευχαριστώ επίσης για το ανθρώπινο ενδιαφέρον που επέδειξε και τη ηθική συμπαράσταση και ψυχική ενθάρρυνση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Ισότιμοι αρωγοί στην προσπάθειά μου ήταν επίσης οι Καθηγητές ΕΜΠ κ.κ. Στέφανος Μανιάς, Νικόλαος Χατζηαργυρίου και Αντώνιος Κλαδάς, οι οποίοι μου προσέφεραν πολύτιμες γνώσεις, συμβουλές και βοήθεια κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής και τους ευχαριστώ θερμά. Επιθυμώ επίσης να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς το πρόσωπο του Ομότιμου Καθηγητή κ. Μιχάλη Παπαδόπουλου, ο οποίος αποτέλεσε τον κύριο λόγο ενασχόλησής μου με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ευχαριστώ επίσης την Καθηγήτρια ΕΜΠ κα Πόλυ Γιαννοπούλου, τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Διαλυνά και τον Λέκτορα ΕΜΠ κ. Παύλο Γεωργιάκη για την άριστη μεταξύ μας συνεργασία στη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής, στα πλαίσια ερευνητικών έργων ή μεταπτυχιακών εργασιών.

Η ολοκλήρωση της διατριβής οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην υποστήριξη, συμπαράσταση αλλά και την παροχή πολύτιμων υποδείξεων από τον Δρ. Παναγιώτη Χαβιαρόπουλο, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του ΚΑΠΕ, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα. Ευχαριστώ επίσης όλους τους συνεργάτες μου στο ΚΑΠΕ για την άπογη συνεργασία μας εντός και εκτός του πλαισίου της διατριβής και κυρίως τους κ. Φραγκίσκο Μουζάκη, Προϊστάμενο του Τμήματος Αιολικής Ενέργειας του ΚΑΠΕ, Δρ. Κυριάκο Ρώσση και Δρ. Δημήτρη Φουσέκη. Ξεχωριστή μνεία πρέπει να πραγματοποιηθεί για το συνάδελφο κ. Παναγιώτη Παπαδόπουλο, χωρίς την ενεργό συμμετοχή του οποίου στη διεξαγωγή των μετρήσεων δεν θα ήταν εφικτή η πρόοδος της διατριβής. Τέλος, δεν θα πρέπει να παραληφθεί η υποστήριξη του πρώην Προϊστάμενου του Τμήματος Αιολικών του ΚΑΠΕ κ. Παντελή Βιώνη στην εκπόνηση της διατριβής.

Παράλληλα, οφείλω να αναγνωρίσω τη σημαντική συνεισφορά της συναδέλφου Ναταλίας Παρασκευοπούλου, καθώς μέσω της συνεργασίας που είχαμε στα πλαίσια της διπλωματικής της εργασίας, εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα που αξιοποιήθηκαν για την περάτωση της διατριβής. Επίσης ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τον Δρ. Στέφανο Παπαευθυμίου και τον υποψήφιο διδάκτωρα Ιάσονα Ρουτσολιά για τη συνεργασία μας όλο αυτό το διάστημα και προς όλους τους υπόλοιπους υποψήφιους διδάκτορες του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος με τους οποίους συνεργάστηκα. Ας μην παραβλεφθεί και η στενή συνεργασία κατά τα παρελθόντα έτη με τον Δρ. Νικόλαο Μπουλαξή, η οποία συνετέλεσε στη διεύρυνση του επιστημονικού μου ορίζοντα και την πληρέστερη κατανόηση πολλών επιμέρους θεμάτων συναφών με το αντικείμενο της διατριβής.

Τέλος θέλω να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, ο ρόλος της οποίας ήταν πολύ σημαντικός για την επιτυχή περάτωσή της, μέσω της διαρκούς ηθικής και ψυχολογικής στήριξής που μου παρείχε.

Σωκράτης Θ. Τεντζεράκης

Σεπτέμβριος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	1
1.2 ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	2
1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	10
1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	12
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ	17
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2.2 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER ΩΣ ΒΑΣΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	18
2.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ WAVELETS	25
2.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ STOCKWELL (S-TRANSFORM)	31
2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ HILBERT-HUANG	36
2.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	44
2.7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ	53
3.1. ΘΕΣΠΙΣΗ ΟΡΙΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	53
3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΡΗΣΗΣ ΟΡΙΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	56
3.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	58
3.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΤΑ IEC 61400-21 ΚΑΙ IEC 61000-4-7.....	64
3.5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ (GROUPING) ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ	66
3.6. ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ Α/Γ	72
3.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	75
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	75
4.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	75
4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	76
4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΙΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ	85
4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	91
5.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	91
5.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ WAVELETS, HILBERT-HUANG ΚΑΙ PRONY ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ IEC 61000-4-7	94
5.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ WAVELETS, HILBERT-HUANG ΚΑΙ PRONY.....	101
5.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ PRONY, HILBERT-HUANG ΚΑΙ WAVELETS	105
5.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	115
6.1. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	115
6.2. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
6.3. ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ	119

6.4.	ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	119
------	-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ	121
--	------------

A.1	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΘΡΟΙΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ Α/Γ ΚΑΤΑ ΙΕC 61400-21.....	121
A.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ	121
A.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	124
A.4	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ Α/Π ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΣΚΣ	129
A.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	132

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	133
--	------------

B.1	ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	133
B.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	133
B.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΛΟΙΠΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	137

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	141
---------------------------	------------

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ	155
---	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη ανασκόπηση υφιστάμενων τεχνολογιών ανεμογεννητριών

Η μορφή και τα χαρακτηριστικά του αρμονικού φάσματος των ανεμογεννητριών (Α/Γ) συνδέονται άμεσα με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους συστήματος. Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε αρχικά στις Α/Γ, από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, βασιζόταν στη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας με δρομέα τύπου κλωβού και απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, [1]-[4]. Με αυτή τη διαμόρφωση, οι διακυμάνσεις της ισχύος λόγω της στοχαστικότητας του ανέμου μεταφέρονταν σχεδόν απευθείας στο δίκτυο καθώς η ταχύτητα του δρομέα ήταν πρακτικά σταθερή και ίση με τη σύγχρονη (ανάλογη της συχνότητας του δικτύου), με πολύ μικρές αποκλίσεις ανάλογα με την ολίσθηση λειτουργίας. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της τεχνολογίας σταθερών στροφών έχει πρακτικώς σταματήσει, δεδομένων των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με αυτή των μεταβλητών στροφών, κυρίως όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, τις δυνατότητες ελέγχου και την ποιότητα ισχύος.

Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση του μοναδιαίου μεγέθους και κυρίως της συνολικής ισχύος των Α/Γ που συνδέονται στα δίκτυα, η ανάγκη ελέγχου της συχνότητας και της τάσης του δικτύου έγινε πιο επιτακτική, γεγονός που, σε συνδυασμό με την πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας, οδήγησε στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών ισχύος με ταυτόχρονη διεύρυνση των επιλογών για τον τύπο της ηλεκτρικής γεννήτριας (π.χ. [3], [5]-[8]). Η τεχνολογία που εφαρμόζεται σε σημαντικό μερίδιο εμπορικών μοντέλων, περιλαμβάνει τη χρήση σύγχρονων γεννητριών με εξωτερική διέγερση ή με μόνιμους μαγνήτες, [6]. Συγκεκριμένα, οι πολυπολικές σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών με μετατροπέα πλήρους ισχύος τοπολογίας “back to back” εμφανίζονται ως η πλέον υποσχόμενη λύση για τα επόμενα χρόνια, εξαιτίας των μειωμένων απωλειών και του μικρότερου βάρους σε σχέση με τις σύγχρονες γεννήτριες εξωτερικής διέγερσης που ήδη χρησιμοποιούνται με επιτυχία επί σειρά ετών σε εμπορικές μηχανές, [7]. Οι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται κυρίως σε Α/Γ τάξης μεγέθους 3–6 MW, [6]. Παρόλα αυτά, η εξάρτηση των Α/Γ με μόνιμους μαγνήτες από τη διαθέσιμη πρώτη ύλη σπανίων γαιών, των οποίων τα φυσικά αποθέματα είναι γεωγραφικά εντοπισμένα και πεπερασμένα, με άμεση επίπτωση στο κόστος, αυξάνει τον επιχειρηματικό κίνδυνο και ισοσκελίζει ως ένα βαθμό τα οφέλη ως προς την ενεργειακή παραγωγή. Από την άλλη πλευρά, σημαντικό μερίδιο στην αγορά εξακολουθούν να κατέχουν οι Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ), οι οποίες κυριάρχησαν την προηγούμενη δεκαετία λόγω του πλεονεκτήματος χρήσης μετατροπέα μειωμένης ισχύος (~ 30%), αλλά υστερούν σε σύγκριση με τις μηχανές που διαθέτουν μετατροπείς πλήρους ισχύος ως προς τη συνολική ελεγχιμότητα και μεταβατική τους απόκριση, ιδίως σε ακραίες περιπτώσεις σφαλμάτων του δικτύου.

Όσον αφορά την τεχνολογία των μετατροπέων ισχύος, η βασική διαμόρφωση για τις Α/Γ από 1.5 έως 3 MW είναι οι “back-to-back” μετατροπείς πηγής τάσης δύο επιπέδων, ενώ για χαμηλότερες ισχύεις επιλέγονται ανορθωτές διόδων από την πλευρά της γεννήτριας. Στις μεγαλύτερες Α/Γ, η ανάγκη λειτουργίας σε υψηλότερη τάση έχει οδηγήσει στην εισαγωγή μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων. Επιπρόσθετα, πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους των Α/Γ παίζει η επιλογή του τύπου και του τρόπου ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων, με επικρατέστερα τα στοιχεία IGBTs που οδηγούνται με διάφορες παραλλαγές της τεχνικής PWM, [9]-[11]. Η τεχνολογία των IGBTs υπερτερεί μέχρι στιγμής σε αξιοπιστία, διαστάσεις, όριο θερμικής καταπόνησης και ευκολία συντήρησης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες (όπως ενδεικτικά τα IGCTs).

Η σύνδεση στο δίκτυο πραγματοποιείται στο επίπεδο της ΜΤ με χρήση μετασχηματιστή (Μ/Σ) ανύψωσης. Η έρευνα στον τομέα αυτόν στοχεύει στην αντικατάστασή του με Μ/Σ μοναδιαίου λόγου ή ακόμη και στην αποφυγή του, οδηγώντας σε λύσεις υψηλής ισχύος και τάσης, [6]. Όσον αφορά τα φίλτρα, η πιο συνήθης επιλογή για τον περιορισμό των αρμονικών διακοπτικής συχνότητας είναι η χρήση τοπολογιών LCL. Στην περίπτωση χρήσης ανορθωτικής γέφυρας διόδων στην πλευρά της γεννήτριας και για Α/Γ μεγάλων μεγεθών, χρησιμοποιούνται επίσης ειδικά σχεδιασμένα φίλτρα για την απόσβεση συγκεκριμένων αρμονικών (trap filters). Η απόσβεση των συντονισμών που σχετίζονται με τα φίλτρα LCL είναι εξίσου σημαντική. Η χρήση παθητικής απόσβεσης ενδέχεται να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες (και κατ’επέκταση χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση) εξαλείφοντας το

πλεονέκτημα του περιορισμού των αρμονικών PWM. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται λύσεις δυναμικής απόσβεσης μέσω του ελεγκτή της Α/Γ ή σύνθετης παθητικής απόσβεσης, [6].

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι ο περιορισμός της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου πραγματοποιείται πλέον αποκλειστικά με την εφαρμογή συστήματος ρύθμισης της κλίσης των πτερυγίων (pitch control) καθώς ο έλεγχος της ισχύος μέσω της εκμετάλλευσης των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών τους (stall control) έχει πλέον εγκαταλειφθεί από τους κατασκευαστές.

Συνοπτικά, οι επικρατέστεροι τύποι εμπορικών Α/Γ, ως προς τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους μέρους, οι οποίοι θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια, διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

A. Α/Γ μεταβλητών στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ)

Ο τύπος αυτός Α/Γ χαρακτηρίζεται από μετατροπέα μικρότερης ισχύος από την ονομαστική (τυπικά περί το 30% της ονομαστικής), που συνδέεται στον δρομέα δακτυλιοφόρου ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο ενώ ο μετατροπέας ελέγχει τη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα και μέσω αυτής τις στροφές. Σε αναλογία με το κλάσμα ισχύος του μετατροπέα σε σχέση με την ονομαστική της Α/Γ, το εύρος των στροφών λειτουργίας των ΑΓΔΤ βρίσκεται στην περιοχή $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Ο συγκεκριμένος τύπος υπερέρχει ως προς το κόστος σε σχέση με άλλες διαμορφώσεις, αλλά παρουσιάζει τις αδυναμίες που προαναφέρθηκαν.

B. Α/Γ μεταβλητών στροφών με μετατροπέα πλήρους ισχύος

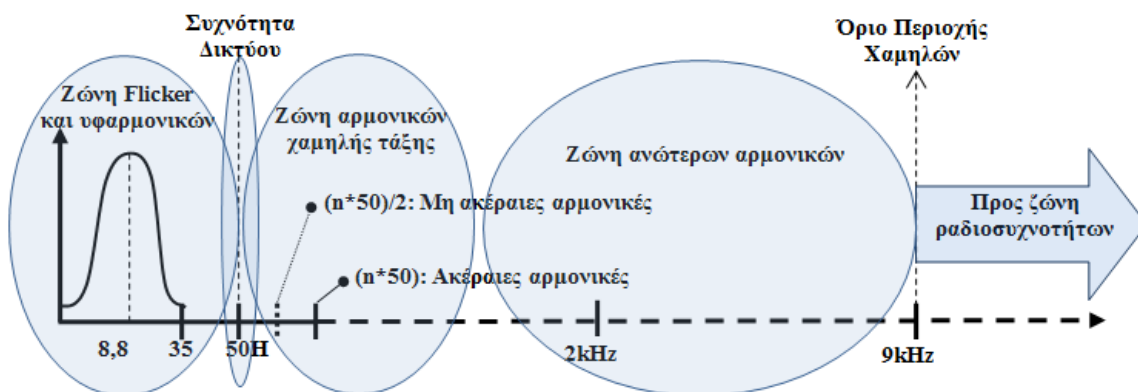
Οι Α/Γ με αυτή τη διαμόρφωση επιτυγχάνουν λειτουργία μεταβλητών στροφών σε ολόκληρο το εύρος ταχυτήτων δρομέα. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη, σύγχρονη εξωτερικής διέγερσης και σύγχρονη με μόνιμους μαγνήτες. Σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται η αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων με τη χρήση πολυπολικών γεννητριών πολύ χαμηλής ταχύτητας.

1.2 Εκπομπή αρμονικών από ανεμογεννήτριες

1.2.1 Διαμόρφωση αρμονικού φάσματος των βασικών τεχνολογιών ανεμογεννητριών

Η χρήση μετατροπέων ισχύος έχει ανάγει τις εκπομπές αρμονικών ως ένα από τα κυρίαρχα θέματα ποιότητας ισχύος για τις μοντέρνες ανεμογεννήτριες. Οι κανονισμοί σύνδεσης αιολικών σταθμών στο δίκτυο προϋποθέτουν πλέον την αξιολόγηση και αποδοχή του πλάτους των παραγόμενων αρμονικών, [12], το οποίο προκύπτει μέσα από συγκεκριμένη διαδικασία μετρήσεων και μεθοδολογία υπολογισμού που προδιαγράφεται σε σειρά προτύπων, [13]-[16].

Το κύριο φασματικό περιεχόμενο των Α/Γ περιλαμβάνει την περιοχή χαμηλών συχνοτήτων έως τα 9 kHz και μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές ζώνες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Φασματικό περιεχόμενο ανεμογεννητριών.

Η πρώτη ζώνη περιλαμβάνει συχνότητες υποπολλαπλάσιες της θεμελιώδους (υφαρμονικές - sub-harmonics) και αφορά κατά βάση διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου της Α/Γ με αεροδυναμική και μηχανική προέλευση (στοχαστική συμπεριφορά ανέμου, wind shear, σκίαση πύργου, ιδιοσυχνότητες μηχανικού συστήματος και πύργου), [4], [17]-[20]. Οι συχνότητες αυτές προκαλούν διακυμάνσεις στην τάση και το ρεύμα εξόδου των Α/Γ, με πιο σημαντική συνέπεια την εμφάνιση flicker, [21]-[22]. Οι επόμενες ζώνες περιλαμβάνουν συχνότητες που είναι πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου (50 Hz) και ονομάζονται αρμονικές. Ειδικότερα, η δεύτερη ζώνη περιλαμβάνει αρμονικές χαμηλής τάξης, τυπικά σε ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας της μορφής $3k-1$, $3k$

και $3k+1$ (k ακέραιος), [4], [23]. Αιτία τους είναι η λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας και η χρήση μετατροπέων ισχύος, περιλαμβανομένων των διατάξεων ομαλής εκκίνησης (soft-starters), μπορεί όμως να προέρχονται και από την υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση του δικτύου στο οποίο συνδέεται η Α/Γ, [3]. Η τρίτη ζώνη αφορά τις λεγόμενες ανώτερες αρμονικές, οι οποίες εμφανίζονται στην περιοχή των kHz (έως 9 kHz) και σχετίζονται με τις συχνότητες μεταγωγής των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων με διαμόρφωση PWM, που χρησιμοποιούν οι Α/Γ μεταβλητών στροφών, [6], [24]-[26]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εκτός από τις ακέραιες αρμονικές (integer harmonics), σημαντική είναι και η παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών (inter-harmonics), σε συχνότητες που είναι μη ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, η εμφάνιση των οποίων οφείλεται στη λειτουργία των μετατροπέων, στην ολίσθηση Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια (όπως οι ΑΓΔΤ), αλλά και στη χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων μη συγχρονισμένων με τη θεμελιώδη συχνότητα του δικτύου, όπως είναι τα συστήματα οδήγησης των κινητήρων προσανατολισμού στον άνεμο και ρύθμισης της γωνίας κλίσης των πτερυγίων (yaw & pitch motors), [23]. Η συχνότητα των 9 kHz αποτελεί το ανώτερο όριο της ζώνης χαμηλών συχνοτήτων, όπως ορίζεται από τα σχετικά πρότυπα, [13], [27]. Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής μετατόπιση των διακοπτικών συχνοτήτων των μετατροπέων προς ανώτερες αρμονικές έχει ως αποτέλεσμα το ενδιαφέρον για το επίπεδο αρμονικών εκπομπών των Α/Γ να επεκτείνεται και πέρα από τα 9 kHz, χωρίς ωστόσο μέχρι στιγμής να υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία και τυποποίηση.

Η μελέτη ποιότητας ισχύος των Α/Γ σταθερών στροφών, οι οποίες κυριαρχούσαν στην αγορά αιολικής ενέργειας μέχρι τις αρχές της περασμένης δεκαετίας, επικεντρώνονταν στην εκτίμηση του flicker και των διακυμάνσεων τάσης και ρεύματος κατά τις μεταβατικές καταστάσεις [18], [28]-[34]. Από την άλλη πλευρά, λόγω της απλής κατασκευής τους και της πολύ περιορισμένης χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος, η εκπομπή αρμονικών δεν απασχολούσε τους διαχειριστές των δικτύων και κατά συνέπεια δεν υπήρχε η ανάγκη μέτρησης και καταγραφής τους, [28]. Η αξιοσημείωτη παρουσία συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους έως 11^{15} τάξης (550 Hz), όπως καταγράφονται για παράδειγμα στην αναφορά [35], αποδίδονταν σε παράγοντες που σχετίζονται με τον τύπο και την κατασκευή της ηλεκτρικής γεννήτριας, τη λειτουργία των διατάξεων ομαλής εκκίνησης και, κυρίως, στην υφιστάμενη παραμόρφωση της τάσης του δικτύου, [17], [18]. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση προηγμένου ηλεκτρονικού εξοπλισμού καθιστά αναγκαίο τον έλεγχο των αρμονικών εκπομπών και σε όσες Α/Γ σταθερών στροφών βρίσκονται ακόμη σε εμπορική παραγωγή, με αποτέλεσμα, η μέτρηση αρμονικών να έχει ενσωματωθεί ως καθολική απαίτηση στην τρέχουσα έκδοση του προτύπου IEC 61400-21, [14], ανεξάρτητα από την τεχνολογία της υπό δοκιμή Α/Γ.

Από την άλλη πλευρά, παρά το γεγονός ότι οι Α/Γ μεταβλητών στροφών θεωρούνται πολύ «φιλικότερες» προς το δίκτυο σε σχέση με τις Α/Γ σταθερών στροφών, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στη διερεύνηση των εκπομπών αρμονικών από αυτές, [36]-[38], δεδομένης της εγκατάστασης Α/Π με μεγάλο αριθμό Α/Γ και των αυστηρότερων απαιτήσεων σύνδεσης στο δίκτυο, [39]. Η όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση τους στο στάδιο της αξιολόγησης της δυνατότητας σύνδεσης αιολικών εγκαταστάσεων είναι κρίσιμη, κατ' αρχήν για την αποφυγή υπερβάσεων των επιτρεπόμενων ορίων παραμόρφωσης σε ορισμένες συχνότητες, ιδίως όταν τα χαρακτηριστικά και οι συνθήκες φόρτισης του δικτύου ευνοούν την εμφάνιση συντονισμών, [16], [37], [40]-[43], αλλά και για την αποφυγή εμφάνισης ακουστικού θορύβου ή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης.

Η θεωρητική εκτίμηση του αρμονικού φάσματος των Α/Γ μεταβλητών στροφών ανάλογα με το τύπο του μετατροπέα που χρησιμοποιείται, απαιτεί τη λεπτομερή γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών και των παραμέτρων ελέγχου, τα οποία ωστόσο δεν είναι γενικά διαθέσιμα από τους κατασκευαστές. Για τον λόγο αυτόν οι αναφορές που εξειδικεύονται στην ανάλυση αρμονικών εκπομπών των εμπορικών Α/Γ είναι περιορισμένες και η αρμονική συμπεριφορά τους εκτιμάται καταρχήν από τη βασική θεωρία των ηλεκτρονικών ισχύος, [44]-[45], και την ευρύτερη βιβλιογραφία για τις αρμονικές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), [46], και των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, [47], [48]. Βασικό ρόλο στη διαμόρφωση του αρμονικού φάσματος παίζει η χρήση μετατροπέων πηγής τάσης με τεχνική PWM, η οποία υιοθετείται από όλους τους κατασκευαστές, καθώς προσφέρει δυνατότητες περιορισμού της αρμονικής παραμόρφωσης [9], [49]-[55]. Αρκετά διαδεδομένη παραλλαγή της PWM είναι ο έλεγχος ρεύματος υστέρησης (κυρίως σε Α/Γ με μετατροπείς πλήρους ισχύος), η οποία έχει ως συνέπεια τη διάχυση του φάσματος σε μεγάλους εύρος συχνοτήτων, [23], καθώς η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή, [23], [56]-[57]. Από την άλλη πλευρά, η επιλογή κλασικών τεχνικών PWM με χρήση φερόντων σημάτων (carrier based PWM)

έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διακριτών αρμονικών περί τη διακοπτική συχνότητα (συνήθως 1-3 kHz) και τα πολλαπλάσιά της, [2], [44]-[45], [58]-[60]. Όσον αφορά τις ΑΓΔΤ, πέρα από την εφαρμοζόμενη τεχνική PWM, το φάσμα διαμορφώνεται τόσο από τις συχνότητες του κυκλώματος του δρομέα, οι οποίες εξαρτώνται από τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα δικτύου, όσο και από τις συχνότητες του ρεύματος στάτη, οι οποίες προέρχονται από τη λειτουργία του μετατροπέα γεννήτριας, μεταβάλλονται όμως με τη διακύμανση της ολίσθησης, [47], [61]. Αξιοσημείωτη είναι σχεδόν πάντα η παρουσία αρμονικών χαμηλής τάξης ($3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$, $7^{\text{η}}$, $11^{\text{η}}$, $13^{\text{η}}$, κλπ.), γεγονός που αποδίδεται στην επίδραση της υφιστάμενης παραμόρφωσης του δικτύου στη λειτουργία των μετατροπέων, καθώς και στις υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις και το βοηθητικό εξοπλισμό των Α/Γ. Η εμφάνιση ενδιάμεσων αρμονικών είναι περισσότερο έντονη στις Α/Γ που εφαρμόζουν έλεγχο ρεύματος υστέρησης και στις ΑΓΔΤ λόγω της επίδρασης της ολίσθησης.

Στην αναφορά [2] γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των αρμονικών που προέρχονται από τυπικές πηγές που χρησιμοποιούνται και εκτός Α/Γ (με έμφαση στους μετατροπέις ισχύος) και των αρμονικών που αποτελούν ιδιαίτερο γνώρισμα των Α/Γ. Ενδεικτικά, ως πηγές ενδιάμεσων αρμονικών αναφέρεται, πέρα από την επίδραση της ολίσθησης στις ΑΓΔΤ, η αλλαγή του αριθμού πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας, ενώ ως πηγές ακέραιων αρμονικών, η ύπαρξη διαφορετικού αριθμού πόλων μεταξύ στάτη και δρομέα και η εμφάνιση συντονισμών ή ασυμμετριών της σύνθετης αντίστασης του δικτύου. Ειδικά για τους μετατροπέις ισχύος, η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής ελέγχου και της βέλτιστης διακοπτικής συχνότητας γίνεται με στόχο τη μετατόπιση του αρμονικού φάσματος προς ανώτερες συχνότητες, με απομάκρυνσή του από τις υφιστάμενες χαμηλής τάξης αρμονικές του δικτύου για τον ευχερέστερο περιορισμό τους με χρήση φίλτρων μικρών διαστάσεων, [5], [62]-[64]. Στην αναφορά [9] συγκρίνονται τρεις διαφορετικές παραλλαγές PWM που εφαρμόζεται σε διακοπτικά στοιχεία IGBTs ενός μετατροπέα ισχύος 100 kVA και πιο συγκεκριμένα οι μέθοδοι: (α) Harmonic Elimination, (β) Έλεγχος ρεύματος υστέρησης και (γ) Space Vector PWM (SVPWM). Διαπιστώνεται ότι το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα SVPWM εμφανίζει τη χαμηλότερη συνολική αρμονική παραμόρφωση, με το μειονέκτημα ότι ο έλεγχος αυτός είναι πιο αργός από τις άλλες δύο μεθόδους. Αντίστοιχη διερεύνηση περιλαμβάνεται και στην αναφορά [1], όπου εξετάζεται εναλλακτική τεχνική PWM που προσφέρει τη δυνατότητα διπλασιασμού της διακοπτικής συχνότητας. Στην αναφορά [7] επισημαίνεται ότι η εφαρμογή μεταβλητής διακοπτικής συχνότητας, μη συγχρονισμένης τόσο μεταξύ των επιμέρους τμημάτων (modules) του μετατροπέα, όσο και μεταξύ των διαφορετικών Α/Γ ενός Α/Π, συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών αρμονικών ρεύματος. Τέλος, στις αναφορές [25] και [65]-[66] διερευνώνται επιμέρους μέθοδοι ελέγχου των μετατροπέων με σκοπό τον περιορισμό της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος εξόδου.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η αύξηση της συχνότητας μεταγωγής των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων οδηγεί αναπόφευκτα και σε αύξηση των διακοπτικών τους απωλειών, ωθώντας τελικά τους κατασκευαστές σε έναν συμβιβασμό για την τελική επιλογή διακοπτικής συχνότητας. Το γεγονός αυτό τονίζεται στην αναφορά [8], όπου πραγματοποιείται εκτενής ανασκόπηση των ηλεκτρικών διαμορφώσεων μεγάλου αριθμού εμπορικών μοντέλων Α/Γ εύρους ισχύος μεταξύ 4 και 10 MW προοριζόμενων για υπεράκτια Α/Π. Στην ίδια αναφορά γίνεται λόγος για τις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στον χώρο των μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων, με τους οποίους επιτυγχάνεται, μεταξύ άλλων, και ο περιορισμός του αρμονικού περιεχομένου της κυματομορφής εξόδου με παράλληλη υποβάθμιση ή εξάλειψη της ανάγκης χρήσης εγκάρσιων επαγωγικών AC φίλτρων, χωρίς ωστόσο να αποφεύγεται η χρήση επαγωγικών φίλτρων σε σειρά. Ανάλογο πλεονέκτημα όσον αφορά τον περιορισμό της αρμονικής παραμόρφωσης επισημαίνεται και στην αναφορά [61], που ασχολείται με τον έλεγχο ΑΓΔΤ μέσω μετατροπέα τύπου matrix.

Το κύριο χαρακτηριστικό όλων των εργασιών που αναφέρθηκαν είναι ότι βασίζονται στη θεωρητική εκτίμηση του αρμονικού φάσματος των κυματομορφών ρεύματος ή τάσης εξόδου των υπό διερεύνηση μετατροπέων. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της έρευνας με στοιχεία από πραγματικές μετρήσεις σε Α/Γ αποτελεί δύσκολο εγχείρημα, κυρίως λόγω της έλλειψης επαρκών στοιχείων από τους κατασκευαστές των Α/Γ σχετικά με τον τύπο και τη μεθοδολογία ελέγχου των μετατροπέων. Η πιο αξιοσημείωτη σχετική προσπάθεια περιλαμβάνεται στις αναφορές [36] και [67], όπου επιχειρείται η σύγκριση μεταξύ μετρήσεων πεδίου στην έξοδο υπεράκτιου Α/Π εγκατεστημένης ισχύος 90 MW, αποτελούμενου από Α/Γ μεταβλητών στροφών με μετατροπέις πλήρους ισχύος, και των αποτελεσμάτων αρμονικής ανάλυσης από τη μοντελοποίηση του Α/Π με τη βοήθεια του λογισμικού

DIgSILENT Power Factory. Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης, ο μετατροπέας ισχύος θεωρήθηκε είτε ως αρμονική πηγή τάσης ή ρεύματος με συγκεκριμένο πλάτος και γωνία για κάθε τάξη αρμονικών. Και οι δύο ωστόσο υποθέσεις έδωσαν αποτελέσματα σημαντικά διαφορετικά από αυτά των μετρήσεων, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στις αναπόφευκτες παραδοχές και την περιορισμένη ακρίβεια του μοντέλου του μετατροπέα, η οποία επηρεάζει τον υπολογισμό της αρμονικής σύνθετης αντίστασης στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ) και κατ' επέκταση τα εκτιμώμενα επίπεδα αρμονικών εκπομπών από το Α/Π.

Συνοψίζοντας, όλες οι Α/Γ σύγχρονης τεχνολογίας αποτελούν πηγές αρμονικών, οι συχνότητες και τα πλάτη των οποίων διαμορφώνονται τόσο από τις κατασκευαστικές παραμέτρους, όσο και από τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των δικτύων στα οποία συνδέονται. Λόγω της μη διαθεσιμότητας επαρκών στοιχείων από τους κατασκευαστές, η εκτίμηση των αρμονικών εκπομπών μέσω αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης αποτελεί εκ των πραγμάτων δύσκολο εγχείρημα, με εξαιρετικά αβέβαιη αποτελεσματικότητα. Συνεπώς, για την ακριβή εκτίμηση και αξιολόγηση του αρμονικού φάσματος σε σχέση με τα υφιστάμενα όρια δεν αρκεί μόνο η θεωρητική προσέγγιση, αλλά απαιτούνται μετρήσεις πεδίου σε λειτουργούσες Α/Γ, οι οποίες καλύπτονται από ιδιαίτερα πρότυπα, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

1.2.2 Διεθνή πρότυπα μετρήσεων και ελέγχου αρμονικών σε ανεμογεννήτριες

Την τελευταία 20ετία έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη πρόοδος στη διαμόρφωση προτύπων για τον καθορισμό των φαινομένων που συνθέτουν την ποιότητα ισχύος στα ΣΗΕ, την καθιέρωση μεθόδων μέτρησης των φαινομένων αυτών και τη θέσπιση ορίων για τη συμβατότητα μεταξύ συστήματος και συνδεδεμένου εξοπλισμού. Η IEC (International Electrotechnical Commission) αποτελεί τον κύριο οργανισμό υπεύθυνο για την ανάπτυξη προτύπων ποιότητας ισχύος στη διεθνή κοινότητα. Τα πρότυπα της IEC συχνά υιοθετούνται και σε εθνικό επίπεδο από πολλές χώρες, με τη μορφή απαιτήσεων. Το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) έχει επίσης αναπτύξει σημαντικό αριθμό προτύπων στο πεδίο της ποιότητας ισχύος και βρίσκεται σε ενεργό συνεργασία με τις ομάδες εργασίας της IEC, [68].

Ειδικότερα για τις αρμονικές εκπομπές, η διατήρηση τους εντός αποδεκτών ορίων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ολοένα αυξανόμενης χρήσης συσκευών με ηλεκτρονικά ισχύος και ευαίσθητου εξοπλισμού. Για τον καθορισμό των ορίων αρμονικών έχει συνταχθεί σειρά προτύπων, ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα του εξοπλισμού και το επίπεδο τάσης στο οποίο συνδέεται. Τα πλέον διαδεδομένα αφορούν στη σειρά 61000 της IEC [69]-[77], ενώ ευρείας αποδοχής είναι και το πρότυπο της IEEE 519, [78]. Τέλος, ιδιαίτεροι κανονισμοί μπορεί να εφαρμόζονται σε επιμέρους χώρες, [46].

Από την άλλη πλευρά, η θέσπιση ορίων αρμονικών εκπομπών του εξοπλισμού προϋποθέτει την ύπαρξη συστηματοποιημένης διαδικασίας εκτίμησης και καταγραφής τους. Η διαδικασία αυτή τεκμηριώνεται με τη βοήθεια κατάλληλων μετρήσεων, οι οποίες συνοδεύουν τον εξοπλισμό που πρόκειται να συνδεθεί σε ένα δίκτυο. Το σύνολο των προτύπων που προδιαγράφουν τη διαδικασία μετρήσεων αρμονικών εντάσσονται σε δύο κατηγορίες:

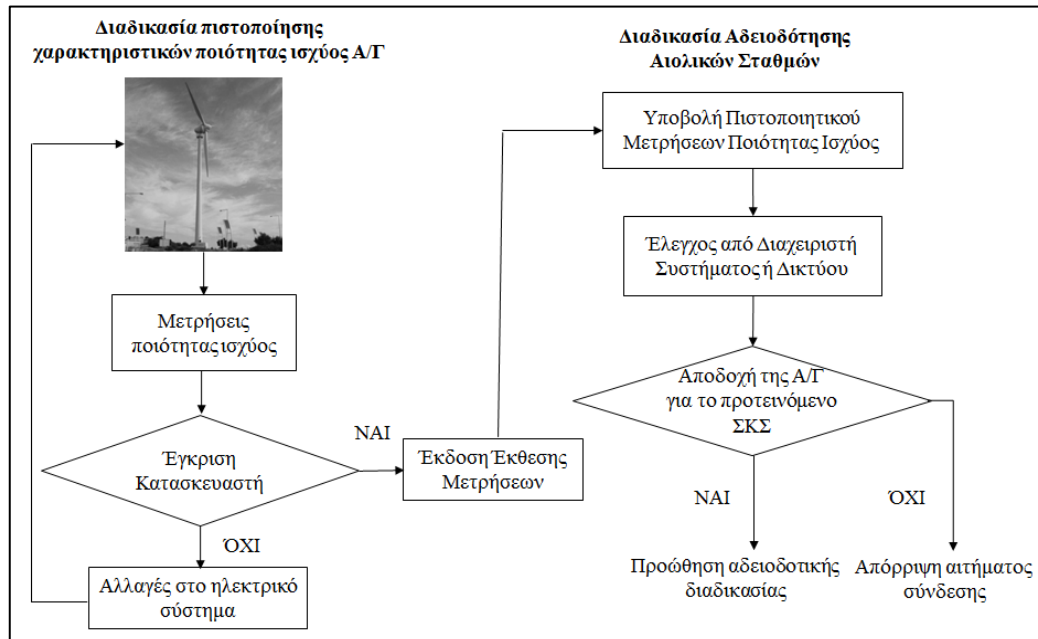
- (α) στα πρότυπα που αναφέρονται γενικά στη μεθοδολογία μέτρησης ποιότητας ισχύος και αρμονικών, [13], [79]-[80], και αφορούν στο σύνολο του εξοπλισμού που συνδέεται στα δίκτυα και
- (β) στα πρότυπα που εξειδικεύονται στη μέτρηση ποιότητας ισχύος σε Α/Γ, [14]-[15], [81].

Από τα πρότυπα αυτά, τα πλέον διαδεδομένα είναι το IEC 61400-21, [14], το οποίο έχει συμπεριληφθεί στη διαδικασία αδειοδότησης των αιολικών πάρκων στον ελληνικό χώρο, και το IEC 61000-4-7, [13], σύμφωνα με το οποίο ζητείται από την ελληνική νομοθεσία να διεξάγονται οι μετρήσεις σε όλες τις ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής που διαθέτουν μετατροπείς ισχύος, [12].

Όσον αφορά τα περιεχόμενα των προτύπων αυτών, το IEC 61000-4-7 θεωρείται ως γενικό πρότυπο αναφοράς για τον καθορισμό των προδιαγραφών του εξοπλισμού μέτρησης και της μεθοδολογίας εκτίμησης αρμονικών από οποιαδήποτε συσκευή ή διάταξη συνδέεται στο ηλεκτρικό σύστημα, ενώ το IEC 61400-21 περιγράφει, μεταξύ των υπόλοιπων παραμέτρων ποιότητας ισχύος μιας Α/Γ, τη λεπτομερή διαδικασία μετρήσεων αρμονικών (συνθήκες μέτρησης, συχνότητα δειγματοληψίας, διάρκεια καταγραφών κ.λπ.), ενσωματώνοντας τις σχετικές απαιτήσεις του IEC 61000-4-7. Η διαδικασία συμπληρώνεται από μία σειρά συναφών προτύπων, διαδεδομένων στον χώρο των

κατασκευαστών Α/Γ και των αρμόδιων φορέων πιστοποίησης, [15], [81]. Ρόλος των προτύπων αυτών είναι, εκτός από τη συστηματοποίηση των μετρήσεων, ο καθορισμός του τρόπου σύνταξης των εκθέσεων και των πιστοποιητικών ποιότητας ισχύος που συνοδεύουν τις εμπορικές ανεμογεννήτριες και ελέγχονται από τους διαχειριστές συστημάτων/δικτύων στα πλαίσια της αδειοδοτικής διαδικασίας, [82].

Η μέτρηση των αρμονικών περιλαμβάνεται στη γενική διαδικασία μετρήσεων και αξιολόγησης ποιότητας ισχύος μιας Α/Γ, η οποία απεικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 1.2. Οι μετρήσεις ανατίθενται από τους κατασκευαστές σε εξειδικευμένα εργαστήρια, διαπιστευμένα κατά ISO/IEC 17025, [83], και πραγματοποιούνται συνήθως σε πρωτότυπα μοντέλα εγκατεστημένα σε πεδία δοκιμών, χωρίς να αποκλείεται ωστόσο η διεξαγωγή μετρήσεων σε Α/Γ που έχουν ήδη εγκατασταθεί σε αιολικά πάρκα.



Σχήμα 1.2. Διαδικασία μέτρησης και αξιολόγησης ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών

Η εκτίμηση των βασικών παραμέτρων ποιότητας ισχύος (flicker, ενεργός και άεργος ισχύς, αρμονικές) πραγματοποιείται με τη μέτρηση ρεύματος και τάσης στην έξοδο της Α/Γ. Το σημείο μέτρησης (πλευρά XT ή MT του Μ/Σ) υποδεικνύεται συνήθως από τον κατασκευαστή και εξαρτάται από τη διάταξη του χώρου στο εσωτερικό της Α/Γ και το είδος του διαθέσιμου εξοπλισμού μέτρησης. Ο εξοπλισμός μέτρησης περιλαμβάνει μετασχηματιστές τάσης και έντασης για τη λήψη των τάσεων και ρευμάτων των τριών φάσεων και μονάδα επεξεργασίας και αποθήκευσης σημάτων συμβατή με τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61000-4-7 και IEC 61000-4-30, [79]. Παράλληλα με τη μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών, είναι απαραίτητη και η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Προαιρετικά, μπορούν να εγκατασταθούν αισθητήρες μέτρησης της συχνότητας του δικτύου, της διεύθυνσης του ανέμου και των στροφών της Α/Γ. Λεπτομέρειες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις ποιότητας ισχύος περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

Ειδικά η διαδικασία μέτρησης αρμονικών σύμφωνα με το IEC 61400-21 περιλαμβάνει την καταγραφή των διακυμάνσεων τάσης και ρεύματος κατά την κανονική λειτουργία της Α/Γ σε όλο το εύρος της ισχύος λειτουργίας της και απαιτεί τη συμπλήρωση επαρκούς αριθμού καταγραφών για κάθε βαθμίδα εύρους 10% της ονομαστικής ισχύος (από 0 έως 100%), με επαρκή δειγματοληψία για τον υπολογισμό ακέραιων αρμονικών και ενδιάμεσων αρμονικών έως 9 kHz. Δεδομένου ότι η Α/Γ αντιμετωπίζεται ως πηγή ρεύματος, [14], από τα ληφθέντα σήματα μόνο τα ρεύματα κάθε φάσης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση αρμονικών, ενώ τα σήματα τάσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος και της υφιστάμενης αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου όταν η Α/Γ βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Όσον αφορά τη μεθοδολογία ανάλυσης των αρμονικών, υιοθετείται η χρήση του μετασχηματισμού Fourier με χρήση τετραγωνικού μη επικαλυπτόμενου παραθύρου μήκους 10 κύκλων (στα δίκτυα 50 Hz), ενώ τα αποτελέσματα εκφράζονται ως μέσες τιμές 10λέπτου.

Η διάρκεια μίας πλήρους μέτρησης ποιότητας ισχύος (flicker, αρμονικές, χειρισμοί A/G) εξαρτάται από τον αριθμό των παραμέτρων που εξετάζονται, τη διαθεσιμότητα της A/G και τις ανεμολογικές συνθήκες και μπορεί να διαρκέσει από 3 έως 18 μήνες, εφόσον περιλαμβάνονται και δοκιμές απόκρισης σε βραχυκύκλωμα (Fault Ride Through Tests), [84]-[85]. Με το πέρας των μετρήσεων συντάσσεται τεχνική έκθεση δοκιμής με τα αποτελέσματα της ανάλυσης και ελέγχεται κατ' αρχήν από τον κατασκευαστή. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι κάποια παράμετρος (flicker, αρμονικές κ.λπ.) αποκλίνει από τις τιμές σχεδιασμού ή από τα επιθυμητά όρια, ο κατασκευαστής προχωρά στις απαραίτητες επεμβάσεις (π.χ. αλλαγές στις ρυθμίσεις του ελέγχου ή τροποποίηση των φίλτρων). Εφόσον οι μετρήσεις εγκριθούν από τον κατασκευαστή εκδίδεται η τελική έκθεση δοκιμής που συνοδεύεται από ειδικό παράρτημα (Power Quality Test Certificate) με τη σύνοψη των παραμέτρων ποιότητας ισχύος της υπό εξέταση A/G.

Τα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος συνοδεύουν το σύνολο των εμπορικών A/G και υποβάλλονται στον αρμόδιο Διαχειριστή του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθούν, [12]. Στο στάδιο της αδειοδότησης, με ευθύνη του Διαχειριστή, πραγματοποιείται λεπτομερής αξιολόγηση των στοιχείων των πιστοποιητικών ποιότητας ισχύος λαμβάνοντας υπόψη και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου. Εάν οι τιμές ορισμένων συντελεστών και δεικτών δεν είναι διαθέσιμες, τότε η εξέταση γίνεται με τη χρήση τυπικών τιμών, έτσι ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα από την ασφαλή πλευρά, [86]. Εάν οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στην πλευρά XT, τότε αυτές ανάγονται στη MT μέσω του λόγου ανύψωσης του M/Σ. Η επιλογή του σημείου μέτρησης της ποιότητας ισχύος πρέπει να αναφέρεται στην έκθεση μετρήσεων, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη διαδικασία αξιολόγησης. Για παράδειγμα, η συνδεσμολογία του M/Σ XT/MT της A/G (συνήθως αστέρα-τριγώνου) διακόπτει το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας με αποτέλεσμα οι μετρήσεις των αρμονικών τάξης $h=3k$ ($3^{\text{η}}$, $9^{\text{η}}$ κ.λπ) στην πλευρά XT να μην αντιστοιχούν στο πραγματικό επίπεδο των αντίστοιχων τάξεων αρμονικών που εγχέονται στο δίκτυο. Εάν τελικά διαπιστωθεί ότι υπάρχει πιθανότητα υπέρβασης κάποιων ορίων, ο Διαχειριστής μπορεί να ζητήσει από τον υποψήφιο επενδυτή (και κατ'επέκταση τον κατασκευαστή) τη λήψη επιπλέον μέτρων, όπως την τοποθέτηση πρόσθετων φίλτρων στην έξοδο των A/G ή του A/Π, ή τη σύνδεση σε ισχυρότερο σημείο του δικτύου.

1.2.3 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας επί των μετρήσεων αρμονικών σε εμπορικές ανεμογεννήτριες

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 1.2.1, η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων που ασχολούνται με το φασματικό περιεχόμενο των A/G αφορά σε αποτελέσματα προσομοιώσεων θεωρητικών ή πειραματικών δοκιμών που μπορεί να ποικίλουν ως προς τον τύπο της ηλεκτρικής γεννήτριας (ασύγχρονη, σύγχρονη, μόνιμων μαγνητών), τον τύπο και τρόπο ελέγχου του μετατροπέα (thyristor, PWM), ενώ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων παίζουν οι επιλογές των τιμών των παραμέτρων των φίλτρων και του M/Σ. Τα στοιχεία που προκύπτουν είναι ενδιαφέροντα στο στάδιο μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής, όμως δεν παρέχουν επαρκή και, κυρίως, αξιόπιστη απάντηση στο ερώτημα που ενδιαφέρει τους διαχειριστές των δικτύων σχετικά με το αν οι αρμονικές μιας A/G που πρόκειται να συνδεθεί βρίσκονται εντός των υφιστάμενων ορίων ή όχι. Από την άλλη πλευρά, παρά το γεγονός ότι σήμερα βρίσκεται σε λειτουργία ένας πολύ μεγάλος αριθμός αιολικών σταθμών παγκοσμίως, η διαθέσιμη βιβλιογραφία που παρέχει πληροφορίες, βασισμένες σε μετρήσεις, για τις αναμενόμενες εκπομπές αρμονικών από πραγματικές A/G και τα χαρακτηριστικά τους είναι σχετικά περιορισμένη, [7], [23], [60], [82], [87]-[90].

Ξεκινώντας από τις A/G σταθερών στροφών, η εξαίρεσή τους από την απαίτηση μέτρησης αρμονικών είχε ως συνέπεια να μην υπάρχουν καταγεγραμμένα στοιχεία μετρήσεων από τις μηχανές πρώτης γενιάς. Οι σχετικές δημοσιεύσεις περιορίζονται στην παρουσίαση των υπόλοιπων παραμέτρων ποιότητας ισχύος, [91]. Στοιχεία εκπομπών αρμονικών από δύο A/G σταθερών στροφών, μία τύπου stall και μία τύπου pitch, παρουσιάζονται στην αναφορά [35], όπου επιχειρείται η σύγκριση μεταξύ τεσσάρων A/G (σταθερών και μεταβλητών στροφών). Διαπιστώνεται η παρουσία αξιοσημείωτων αρμονικών χαμηλής τάξης έως 550 Hz, η οποία φαίνεται ότι αποδίδεται στη λειτουργία του βοηθητικού εξοπλισμού αλλά και στην υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση του δικτύου. Στην αναφορά [92] περιλαμβάνονται στοιχεία μετρήσεων στην έξοδο A/Π που αποτελείται από 30 A/G σταθερών στροφών ονομαστικής ισχύος 600 kW, εφοδιασμένες με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Παρ' ότι η αναφορά επικεντρώνεται στην πιθανοτική ανάλυση των αρμονικών του ρεύματος εξόδου του A/Π, το φάσμα που προκύπτει περιλαμβάνει αρμονικές χαμηλής τάξης αλλά και

αισθητή παρουσία αρμονικών συχνοτήτων πλάτους περίπου 0.1% του ονομαστικού ρεύματος, στην περιοχή μεταξύ 1 και 2 kHz (21^η έως 41^η τάξη), για την προέλευση των οποίων ωστόσο δεν δίνεται κάποια αιτιολόγηση.

Όσον αφορά τις Α/Γ μεταβλητών στροφών, παρά τον ολοένα αυξανόμενο ρυθμό νέων εγκαταστάσεων, η βιβλιογραφία είναι εξίσου περιορισμένη, κυρίως λόγω του ανταγωνισμού μεταξύ των κατασκευαστών, οι οποίοι δεν δείχνουν πρόθυμοι να δημοσιοποιήσουν εμπιστευτικές λεπτομέρειες εμπορικών μηχανών. Από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία ξεχωρίζει η αναφορά [7], στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ποιότητας ισχύος σε Α/Γ ENERCON E82 / 2 MW, σύμφωνα με την τρέχουσα έκδοση του προτύπου IEC 61400-21. Στην αναφορά αυτή αναδεικνύονται οι δυνατότητες της συγκεκριμένης Α/Γ για ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος (λειτουργία σε επαγωγικό ή χωρητικό συντελεστή ισχύος), η άμεση επαναφορά σε περίπτωση ξαφνικής απώλειας δικτύου και οι χαμηλές τιμές εκπομπών flicker. Όσον αφορά τις αρμονικές, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η Α/Γ διαθέτει μετατροπείς εξαναγκασμένης μεταγωγής με IGBTs μεταβλητής διακοπτικής συχνότητας, η οποία στην περίπτωση Α/Π επιλέγεται διαφορετική ανά μηχανή ώστε να περιορίζεται η αρμονική παραμόρφωση του συνολικού ρεύματος εξόδου. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνουν πληροφορίες για το φασματικό περιεχόμενο της Α/Γ και παραθέτουν αντί αυτού το φάσμα μιας Α/Γ ENERCON E53 / 800 kW, όπου κυριαρχούν οι ακέραιες περιττές αρμονικές έως την 41^η τάξη. Η αναφορά [23] αναφέρει αρκετές λεπτομέρειες σχετικά με την Α/Γ ENERCON E40 / 500 kW, αξιοποιώντας διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου. Το συγκεκριμένο μοντέλο Α/Γ αποτελεί μία από τις πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας μεταβλητών στροφών και βρίσκεται σε εμπορική παραγωγή από τα τέλη της δεκαετίας του 1990. Η E40 περιλαμβάνει πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα με στοιχεία IGBTs. Ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα δεν είναι γνωστός, ωστόσο η μεγάλη διασπορά αρμονικών στην περιοχή μεταξύ 1 και 1.5 kHz οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μπορεί να εφαρμόζεται έλεγχος ρεύματος υστέρησης. Αξιοσημείωτη είναι και η παρουσία συχνοτήτων χαμηλής τάξης, οι οποίες αποδίδονται στην υφιστάμενη παραμόρφωση του δικτύου αλλά και στη λειτουργία περιφερειακών/βοηθητικών ηλεκτρονικών διατάξεων (π.χ. τροφοδοτικά, συστήματα κίνησης για τον έλεγχο της γωνίας κλίσης των πτερυγίων κ.ά.). Από τα θέματα που χρήζουν προσοχής στην ίδια αναφορά είναι η διερεύνηση της επίδρασης κάποιων παραμέτρων ανάλυσης, όπως η επιλογή του χρονικού «παραθύρου» για την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier στην ανάλυση αρμονικών (10 ή 16 περίοδοι θεμελιώδους συχνότητας), καθώς και ο σχολιασμός της μεθοδολογίας άθροισης των αρμονικών, όπως προτείνεται από τα πρότυπα IEC 61400-21 και IEC 61000-3-6. Τα θέματα αυτά συμπεριλαμβάνονται στο πεδίο έρευνας της παρούσας εργασίας και θα αναλυθούν εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

Σημαντικές πληροφορίες από μετρήσεις σε πραγματικές ανεμογεννήτριες περιλαμβάνονται στις αναφορές [87] και [88], όπου εξετάζεται η ποιότητα ισχύος διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Ειδικότερα στην αναφορά [87], συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά ποιότητας ισχύος από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος 1.5 MW, εφοδιασμένες με ΑΓΔΤ και σύγχρονη γεννήτρια. Στην αναφορά [67] γίνεται λόγος για μετρήσεις αρμονικών σε ανεμογεννήτριες SIEMENS, μοντέλο SWT107-3.6MW, μεταβλητών στροφών εφοδιασμένες με ασύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος (full-scale). Οι επικρατούσες αρμονικές τόσο στην τάση όσο και το ρεύμα είναι η 5^η και η 7^η, ενώ δεν δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τον τύπο των διακοπτικών στοιχείων και την τεχνική έλεγχου του μετατροπέα. Τέλος, στην αναφορά [93] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων στην έξοδο Α/Π αποτελούμενου από 40 Α/Γ μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος 1.5 MW, εφοδιασμένες με ΑΓΔΤ. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μετρήσεων είναι η χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας που δεν επιτρέπει την καταγραφή αρμονικών άνω των 2 kHz. Και σε αυτές τις μετρήσεις πάντως επικρατέστερες είναι οι αρμονικές χαμηλής τάξης (5^η και 7^η) ενώ η σημαντική παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών αποδίδεται στη λειτουργία των μετατροπέων των Α/Γ.

1.2.4 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας επί των μετρήσεων αρμονικών σε αιολικά πάρκα

Οι αρμονικές εκπομπές των μεμονωμένων Α/Γ που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρονται στην έξοδο των Α/Γ, η οποία συνήθως είναι η πλευρά XT πριν από τον Μ/Σ ανύψωσης ή, πιο σπάνια, η πλευρά MT, αμέσως μετά τον Μ/Σ. Έτσι στις αναφερόμενες τιμές και συχνότητες συνήθως δεν συνεκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του Μ/Σ (εφόσον αναφέρονται στη XT), ούτε και τα

χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου του πάρκου και η συμβολή των υπόλοιπων Α/Γ στη διαμόρφωση του συνολικού ρεύματος εξόδου στο ΣΚΣ. Η διερεύνηση των αρμονικών εκπομπών αιολικών πάρκων (Α/Π) αποτελεί σημαντικό ζήτημα για την αξιολόγηση της συμβατότητας των αρμονικών εκπομπών με τα υφιστάμενα όρια.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με μετρήσεις αρμονικών στην έξοδο Α/Π, διαπιστώνεται ότι τα διαθέσιμα στοιχεία είναι ακόμη πιο περιορισμένα σε σχέση με τις μεμονωμένες Α/Γ. Οι λόγοι είναι κυρίως πρακτικοί αλλά και οικονομικοί καθώς ενώ η μέτρηση της ποιότητας ισχύος είναι διαδικασία επιβεβλημένη για τα πρωτότυπα μοντέλα Α/Γ στο πλαίσιο της διαδικασίας πιστοποίησης και δοκιμών τύπου, στα Α/Π κάθε μέτρηση γίνεται επί τούτου και γενικά δεν επιβάλλεται η πραγματοποίησή της για λόγους αδειοδοτικούς. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει σχετική τυποποίηση, και οι μετρήσεις που πραγματοποιούν οι διαχειριστές δικτύων κατά τη δοκιμαστική λειτουργία των Α/Π γενικά δεν ακολουθούν αυστηρά τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7, συνήθως καλύπτουν το φάσμα συχνοτήτων έως τα 2 kHz, ενώ οι πληροφορίες που συλλέγονται σπάνια είναι δημοσιεύσιμες. Έτσι, η διαθέσιμη βιβλιογραφία βασίζεται σε μετρήσεις κυρίως από ερευνητικούς φορείς, στο πλαίσιο ερευνητικών ή άλλων παρόμοιων έργων, [36], [37], [40], [42], [67], [88], [89], [92]-[99].

Στην αναφορά [95] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων στο ΣΚΣ τεσσάρων Α/Π στη Σουηδία που περιλαμβάνουν Α/Γ νέας τεχνολογίας με μετατροπείς ισχύος (NORDEX N90 / 2.5 MW, VESTAS V90 / 2 MW και ENERCON E40 / 600 kW και E82 / 2 MW). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρουσιάζονται, παρ' ότι περιορίζονται μέχρι τα 2 kHz, περιλαμβάνουν χαρακτηριστικές και μη χαρακτηριστικές αρμονικές. Η μελέτη επισημαίνει το γεγονός ότι τα επίπεδα αρμονικών εκπομπών των Α/Π είναι χαμηλά, ωστόσο αναδεικνύει την ύπαρξη σημαντικών ενδιάμεσων αρμονικών σε όλες τις περιπτώσεις, οι οποίες ανάλογα με την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στο οποίο συνδέονται είναι δυνατό να οδηγήσει σε υπέρβαση των σχετικών ορίων που τίθενται από τα διεθνή πρότυπα (και ιδιαίτερα τα EN50160, [100], και IEC 61000-2-2, [71]). Επίσης, επισημαίνεται ότι το επίπεδο των αρμονικών εκπομπών κυμαίνεται τόσο σε απόλυτη τιμή όσο και σε σχέση με τις άλλες τάξεις, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στη διακύμανση της παραγόμενης ενεργού ισχύος των Α/Γ και σε μεταβολές της αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου.

Στην εργασία [94] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων στην έξοδο αιολικού πάρκου αποτελούμενου από 30 x 600 kW Α/Γ σταθερών στροφών, εφοδιασμένων με ασύγχρονη γεννήτρια με δρομέα τύπου κλωβού. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι περισσότερο η μελέτη της προέλευσης των επιμέρους αρμονικών συνιστωσών (από το Α/Π ή από την υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση του δικτύου), παρά η ανάδειξη των αρμονικών χαρακτηριστικών του πάρκου. Παρ' όλα αυτά, από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται η έντονη παρουσία 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής, καθώς και το γεγονός ότι τα μέτρα των αρμονικών δεν επηρεάζονται σημαντικά από το σημείο λειτουργίας του Α/Π. Η εργασία αυτή συμπληρώνεται με την αναφορά [92], στην οποία πραγματοποιείται περαιτέρω μελέτη των χαρακτηριστικών των αρμονικών του συγκεκριμένου Α/Π. Μετρήσεις στην έξοδο Α/Π αποτελούμενου από 40 Α/Γ μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος 1.5 MW παρουσιάζονται στην αναφορά [93]. Θέματα που τίγονται σε αυτή τη δημοσίευση είναι η επίδραση της μεθόδου ανάλυσης των αρμονικών στα αποτελέσματα, η στατιστική συμπεριφορά των αρμονικών συνιστωσών, καθώς και μελέτη της συμβολής τους στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη αρμονικών στην έξοδο υπεράκτιου Α/Π αποτελούμενου από 25 x 3.6 MW Α/Γ μεταβλητών στροφών (SIEMENS SWT-3.6-107), οι οποίες είναι εξοπλισμένες με μετατροπέα IGBT πλήρους ισχύος, που παρουσιάζεται στην εργασία [36]. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης αρμονικών του ρεύματος εξόδου (μέχρι την 25^η τάξη) και τονίζεται η ύπαρξη αρμονικών χαμηλής τάξης (έως 13^η), οι οποίες χρήζουν περισσότερης προσοχής λόγω του ενδεχομένου εμφάνισης αρμονικού συντονισμού.

Στην αναφορά [37] πραγματοποιείται αρμονική ανάλυση ενός ηλεκτρικού δικτύου στο οποίο συνδέεται Α/Π αποτελούμενο από 20 x 500 kW Α/Γ μεταβλητών στροφών. Με βάση μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην έξοδο μίας από τις Α/Γ (πλευρά ΜΤ του Μ/Σ), αναλύεται η συμβολή των επιμέρους Α/Γ στη διαμόρφωση των συνολικών αρμονικών εκπομπών του Α/Π και εξετάζονται ζητήματα αρμονικού συντονισμού του δικτύου. Αντίστοιχα θέματα τίγονται και στις αναφορές [41]

και [99], ενώ γενικότερα ζητήματα ποιότητας ισχύος σε Α/Π διερευνώνται στις αναφορές [40], [89], [96] και [97].

1.3 Ανασκόπηση μεθόδων ανάλυσης αρμονικών ανεμογεννητριών

Η μελέτη και βελτίωση της ακρίβειας του Fast Fourier Transform (FFT) για την εκτίμηση αρμονικών συνιστωσών σημάτων τάσης και ρεύματος αποτελεί το αντικείμενο πλούσιας βιβλιογραφίας στην περιοχή των ΣΗΕ. Οι εργασίες ωστόσο που ασχολούνται με τη φασματική ανάλυση Α/Γ είναι περιορισμένες. Δεδομένης της στοχαστικότητας της παραγόμενης ισχύος των Α/Γ, είναι προφανές ότι για τη ρεαλιστική εκτίμηση των αρμονικών τους είναι απαραίτητη η χρήση αποδοτικών μεθόδων και εργαλείων που θα είναι κατά το δυνατό λιγότερο ευαίσθητα σε μεταβολές του πλάτους και της συχνότητας με τον χρόνο. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη ότι οι τιμές αρμονικών που υπολογίζονται από την ανάλυση των μετρούμενων σημάτων αποτυπώνονται τελικά στα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος των Α/Γ και λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία αδειοδότησης και σύνδεσης στο δίκτυο, η ακρίβεια και αξιοπιστία του υπολογισμού είναι βασικής σημασίας για τους κατασκευαστές, τους επενδυτές και τους διαχειριστές δικτύων.

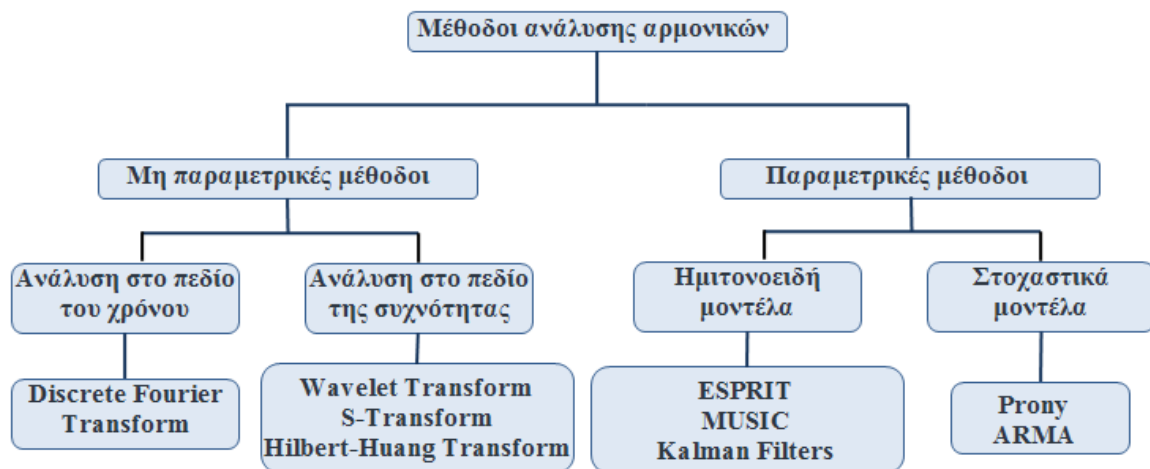
Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) και η ψηφιακή υλοποίηση του μέσω του FFT αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για τη φασματική ανάλυση σημάτων, λόγω της ακρίβειας του σε στάσιμα σήματα, αλλά και του χαμηλού υπολογιστικού φόρτου που απαιτεί. Ωστόσο, η εφαρμογή του σε σήματα που μεταβάλλονται με τον χρόνο ως προς το πλάτος ή και τη συχνότητα, όπως η τάση και το ρεύμα στα ΣΗΕ, παρουσιάζει μία σειρά από εγγενείς αδυναμίες και περιορισμούς. Βασικά μειονεκτήματά του είναι η διαρροή του φάσματος (spectral leakage) σε περιπτώσεις διακυμάνσεων της θεμελιώδους συχνότητας ή ασύγχρονης δειγματοληψίας, το φαινόμενο aliasing όταν η συχνότητα δειγματοληψίας δεν επαρκεί για τον υπολογισμό του συνολικού φασματικού περιεχομένου και η αδυναμία του σε μεταβατικές καταστάσεις. Τα μειονεκτήματα αυτά και η αντιμετώπιση τους αποτελούν αντικείμενο έρευνας σε μία σειρά δημοσιεύσεων που προτείνουν παραλλαγές-βελτιώσεις βασισμένες στον FFT, [101]-[106].

Η κύρια εφαρμογή του FFT για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων είναι ο Short-Time Fourier Transform (STFT), σύμφωνα με τον οποίο, το εξεταζόμενο σήμα σαρώνεται με τη βοήθεια κατάλληλων χρονικών παραθύρων. Η μορφή, το μήκος των παραθύρων και ο τρόπος σάρωσης της κυματομορφής επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και αποτελούν ζήτημα διερεύνησης στη βιβλιογραφία, [101]-[103], [107]-[110]. Ο STFT προτείνεται και από το πρότυπο IEC 61000-4-7, με τη χρήση τετραγωνικού παραθύρου μήκους 10 κύκλων (0.2 s σε σύστημα 50 Hz), χωρίς επικάλυψη. Η επιλογή αυτή οδηγεί σε διακριτότητα συχνότητας ίση με 5 Hz, τιμή που αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ καλύτερης δυνατής ακρίβειας και μικρού υπολογιστικού χρόνου του αλγορίθμου. Στο ίδιο πρότυπο, για την αντιμετώπιση της διαρροής του φάσματος προτείνεται η χρήση εξοπλισμού εφοδιασμένου με διάταξη phase-locked loop (PLL), ώστε να επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός των αρμονικών με τη συχνότητα του δικτύου. Παράλληλα, η σημαντική καινοτομία που έχει εισάγει το IEC 61000-4-7, είναι η ομαδοποίηση (grouping) των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν από τον STFT, σύμφωνα με την οποία οι ενδιάμεσες αρμονικές εκατέρωθεν της κύριας ακέραιης αρμονικής υπερτίθενται σε αυτή, θεωρώντας ότι είναι αποτέλεσμα φασματικής διαρροής. Η μεθοδολογία αυτή έχει υιοθετηθεί από το IEC 61400-21 για τον υπολογισμό των αρμονικών των Α/Γ, εφαρμόζεται από όλα τα διαπιστευμένα εργαστήρια μετρήσεων και θα εξεταστεί λεπτομερώς στην παρούσα εργασία.

Η βελτίωση της ακρίβειας στον υπολογισμό των αρμονικών, που εισάγει το IEC 61000-4-7, τεκμηριώνεται με μία σειρά εφαρμογών σε συνθετικά σήματα, τα οποία παρουσιάζουν διακυμάνσεις ή περιλαμβάνουν ενδιάμεσες αρμονικές, [13]. Παρ' όλα αυτά, η εμπειρία από την ανάλυση πραγματικών σημάτων στα ΣΗΕ και ιδιαίτερα στην περίπτωση των Α/Γ, δείχνει ότι το πραγματικό φασματικό περιεχόμενο μπορεί να έχει μορφή και διακύμανση πολύ διαφορετικές από τα συνθετικά σήματα, [60]. Πολλά ερωτήματα παραμένουν ανοιχτά προς διερεύνηση, όπως η επίπτωση της διακριτότητας της συχνότητας στον εντοπισμό και υπολογισμό ενδιάμεσων αρμονικών, η ακρίβεια υπολογισμού αρμονικών που μεταβάλλονται με το χρόνο ως προς το πλάτος και τη συχνότητα και η ανάλυση αρμονικών σε συστήματα με μεταβαλλόμενη θεμελιώδη συχνότητα. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, διαπιστώνονται πολυάριθμες τεχνικές ή αλγόριθμοι βασισμένοι στον FFT, που επιχειρούν να αυξήσουν την ακρίβεια στον υπολογισμό των αρμονικών, [102], [104]-[106], [111]. Το μειονέκτημα των περισσότερων από αυτές τις μεθόδους είναι η χρήση πρόσθετων ή πιο σύνθετων

τεχνικών επεξεργασίας του εξεταζόμενου σήματος, γεγονός που τελικά οδηγεί σε νέες συνιστώσες αβεβαιότητας και δεν συμβάλλει στην αύξηση της ακρίβειας του FFT, [112]. Επιπρόσθετα, καμία από αυτές τις τεχνικές δεν φαίνεται να τυγχάνει ευρύτερης αποδοχής στην επιστημονική κοινότητα, μέσω νέων δημοσιεύσεων, εφαρμογών και πολύ περισσότερο υιοθέτησης σε πρότυπα.

Από την άλλη πλευρά, την τελευταία 20ετία έχει εμφανιστεί ένα μεγάλο κύμα δημοσιεύσεων που αναφέρονται στην αντικατάσταση του FFT και των παραλλαγών του από εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας σήματος στα ΣΗΕ, [101], [112]-[115]. Συνοπτική εικόνα με τις πιο διαδεδομένες τεχνικές ανάλυσης αρμονικών για ΣΗΕ παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Εκτός από τον μετασχηματισμό Fourier, στις μη παραμετρικές μεθόδους ανήκει μία σειρά μεθόδων που προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης σημάτων τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας, όπως είναι οι μετασχηματισμοί Wavelet, [114]-[118], S-Transform, [119]-[122] και Hilbert-Huang, [123]-[127]. Οι μέθοδοι αυτές συναντώνται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία, λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν σε σχέση με τον μετασχηματισμό Fourier, κυρίως στην ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, αλλά και στον εντοπισμό μεταβατικών διαταραχών. Σημαντική ώθηση στη διάδοση των συγκεκριμένων εργαλείων έδωσε η ενσωμάτωσή τους σε δημοφιλή υπολογιστικά πακέτα όπως το περιβάλλον MATLAB. Στα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού Wavelet (WT) περιλαμβάνεται το γεγονός ότι η ζώνη συχνοτήτων που προκύπτει ενδέχεται να περιλαμβάνει περισσότερες από μία συχνότητες, οι οποίες απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία για να διαχωριστούν, [117], ενώ η εφαρμογή του S-Transform (ST) παρέχει ως αποτέλεσμα και πλασματικές συχνότητες, οι οποίες θα πρέπει να απομακρυνθούν, ενώ παράλληλα δεν είναι σε θέση να διαχωρίσει συχνότητες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη της μίας οκτάβας¹ [124]. Από την άλλη πλευρά ο WT είναι συμβατός με τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης του IEC 61000-4-7 για τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες (> 2 kHz) ενώ ο μετασχηματισμός Hilbert-Huang (HHT) εμφανίζεται ως υποσχόμενη μέθοδος για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων. Οι δύο αυτές μέθοδοι (WT και HHT) θα αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης για την εφαρμογή στον υπολογισμό αρμονικών των Α/Γ στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.3. Κατηγοριοποίηση μεθόδων εκτίμησης αρμονικών, [113].

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία μεθόδων επεξεργασίας σήματος είναι οι λεγόμενες παραμετρικές², οι οποίες τα τελευταία χρόνια προτείνονται ολοένα και συχνότερα στη βιβλιογραφία, καθώς η αύξηση της ταχύτητας στην επεξεργασία δεδομένων δημιούργησε πρόσφορο έδαφος για τη χρήση τους. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενες στη σχετική βιβλιογραφία είναι η MUSIC (Multiple Signal Classification), η ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique) και η Prony, [128]-[131], οι οποίες παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε θέματα διακριτότητας και ακρίβειας. Από τις μεθόδους αυτές, η μέθοδος Prony εμφανίζεται ως πολύ αποδοτική σε θέματα εκτίμησης των

¹ Η μία οκτάβα (octave) είναι μονάδα περιγραφής εύρους ή λόγου συχνοτήτων και εκφράζει τη διαφορά δύο συχνοτήτων f_1 και f_2 όταν $f_2/f_1=2$. Για παράδειγμα, το εύρος συχνότητας από 1 σε 2 Hz είναι μία οκτάβα, ενώ το εύρος συχνότητας από 17.4 σε 34.8 Hz είναι επίσης μία οκτάβα. Επομένως το μέγεθος 1 οκτάβα δεν έχει σταθερή τιμή αλλά εξαρτάται από τη συχνότητα αναφοράς. Ο αριθμός των οκτάβων σε

ένα εύρος συχνοτήτων από f_1 σε f_2 είναι: $\frac{\log(f_2)}{\log 2} = 3.22 \cdot \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$ οκτάβες.

² Η έννοια του όρου «παραμετρικές» εξηγείται στο 2^ο Κεφάλαιο.

ενδιάμεσων αρμονικών και κατάλληλη για εφαρμογή στα σήματα Α/Γ, [132], και θα εξεταστεί λεπτομερώς στην παρούσα εργασία. Τέλος μία σειρά εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης, όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network - ANN), και αναδρομικών τεχνικών όπως τα φίλτρα Kalman, η ADALINE (Adaptive Linear Element) και η EPLL (Extended Phase Locked Loop) γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς για την εκτίμηση αρμονικών συνιστωσών, [113], χωρίς ωστόσο η μέχρι στιγμής διαθέσιμη βιβλιογραφία και εμπειρία να επεκτείνεται στην υλοποίηση τους για την ανάλυση αρμονικών Α/Γ.

1.4 Αντικείμενο της διατριβής

1.4.1 Μελέτη και συγκριτική αξιολόγηση αρμονικών εκπομπών ανεμογεννητριών

Η μελέτη και ανάλυση της ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία ήδη από τη δεκαετία του 1990, [18], [91], [133]-[134]. Κύριο χαρακτηριστικό των σχετικών μελετών ήταν η περιορισμένη διαθεσιμότητα στοιχείων από πραγματικές μετρήσεις πεδίου, με τις αναλύσεις να βασίζονται επί το πλείστον σε αποτελέσματα προσομοιώσεων ή μετρήσεις εργαστηριακών δοκιμών. Θέματα που δεν καλύπτονται επαρκώς αφορούν την επαλήθευση των υπολογιστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται, την επίδραση των πραγματικών περιβαλλοντικών συνθηκών (ταχύτητα ανέμου, τύρβη, τοπογραφία κ.λπ.) και της υφιστάμενης παραμόρφωσης της τάσης των δικτύων. Η σαφής αδυναμία ύπαρξης κοινά αποδεκτών εργαλείων προσομοίωσης, τα οποία θα επαληθεύονται από πραγματικές μετρήσεις, έχει οδηγήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα της αιολικής ενέργειας στην προσπάθεια να διαμορφώσει ένα κοινό πλαίσιο μοντέλων προσομοίωσης Α/Γ και Α/Π. Η προσπάθεια αυτή έχει οδηγήσει ήδη στην έκδοση σχετικής οδηγίας από τη Γερμανική Ομοσπονδία Αιολικής Ενέργειας (FGW, [135]), η οποία αναθεωρείται σε τουλάχιστον ετήσια βάση, ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη και η δημιουργία ιδιαίτερου προτύπου IEC 61400-27-1, [136], για τον καθορισμό μοντέλων προσομοίωσης ανεμογεννητριών, το οποίο αναμένεται να εκδοθεί επίσημα μέσα στο 2014. Στόχος και των δύο εκδόσεων είναι η σύνδεση των θεωρητικών μοντέλων με την υφιστάμενη διαδικασία μέτρησης ποιότητας ισχύος των Α/Γ, όπως καθορίζεται από το πρότυπο IEC 61400-21, Ed.2 [14] και αναμένεται επίσης να επεκταθεί με την έκδοση προτύπων που θα αφορούν σε μετρήσεις ποιότητας ισχύος αιολικών πάρκων και στην ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης αιολικών πάρκων, [137].

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επιχειρεί κατ' αρχήν να συμβάλει στην ανάδειξη των χαρακτηριστικών των αρμονικών εκπομπών των Α/Γ, με τη διεξαγωγή και ανάλυση μετρήσεων σε Α/Γ που βρίσκονται σε λειτουργία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους τύπους μηχανών, κυρίως εμπορικά μοντέλα αλλά και πρωτότυπα, [23], [60]. Οι Α/Γ που επιλέχθηκαν ποικίλουν ως προς την τεχνολογία, το μέγεθος και τη θέση εγκατάστασης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνολογίες μεταβλητών στροφών, όπου εξετάστηκαν Α/Γ με μετατροπέα πλήρους ισχύος και με ΑΓΔΤ. Πιο συγκεκριμένα, οι Α/Γ ήταν εφοδιασμένες με πολυπολικές σύγχρονες γεννήτριες τυλιγμένου πεδίου (wound field) και μετατροπέα AC/DC/AC πλήρους ισχύος στον στάτη, με ΑΓΔΤ και μετατροπείς μειωμένης ισχύος στον δρομέα και με ασύγχρονες γεννήτριες τύπου κλωβού και μετατροπέα πλήρους ισχύος στον στάτη. Στην πλειονότητά τους διέθεταν ενεργό έλεγχο της γωνίας κλίσης των πτερυγίων (pitch control). Όσον αφορά το μέγεθος, οι Α/Γ που μετρήθηκαν καλύπτουν τόσο την κατηγορία μηχανών ονομαστικής ισχύος μικρότερης του MW, όσο και των μεγάλων Α/Γ άνω του 1 MW που κυριαρχούν πλέον στην αγορά. Ακριβή στοιχεία για τον τύπο και το μέγεθος των Α/Γ που εξετάστηκαν δεν παρατίθενται σκόπιμα, ώστε να αποφευχθεί η σύνδεση τους με συγκεκριμένα μοντέλα εμπορικών Α/Γ. Ωστόσο, το δείγμα των μηχανών είναι αντιπροσωπευτικό, καθώς οι Α/Γ κάτω του MW εκπροσωπούν μεν σχετικά παλαιότερες τεχνολογίες, αλλά ακόμη αριθμητικά κυριαρχούν στις εγκαταστάσεις αιολικών σταθμών, ιδίως στη χώρα μας.

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις περιλαμβάνουν καταγραφή της τάσης και του ρεύματος κάθε φάσης, στην πλευρά ΧΤ ή ΜΤ, ενώ η διάρκειά τους κυμαίνεται από λίγες ώρες έως αρκετές εβδομάδες, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της εξεταζόμενης Α/Γ και τις ανεμολογικές συνθήκες. Το δείγμα των μετρήσεων θεωρείται επαρκές για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά των αρμονικών.

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών του φασματικού περιεχομένου του ρεύματος στην έξοδο των Α/Γ είναι βασικής σημασίας για την ανάλυση των επιπτώσεων από τη σύνδεση των Α/Γ στα δίκτυα. Παράλληλα, η στατιστική ανάλυση των αρμονικών εκπομπών μεμονωμένων Α/Γ αποτελεί σημαντική

πρωτογενή πληροφορία για τη διερεύνηση του σημαντικού θέματος της άθροισης των αρμονικών στην έξοδο αιολικών πάρκων, όπως έχει αναπτυχθεί σε σχετικές εργασίες, [37], [138]. Στο επόμενο στάδιο της εργασίας πραγματοποιείται συστηματική ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων (ρεύματος και τάσης), με στόχο, όχι την ποσοτική σύγκριση εμπορικών Α/Γ, αλλά την ανάδειξη και αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των αρμονικών. Δεδομένου ότι οι Α/Γ συμπεριφέρονται ως πηγές ρεύματος, η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στις χρονοσειρές ρεύματος, ενώ οι φασικές τάσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος, την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών και την αξιολόγηση της υφιστάμενης παραμόρφωσης του δικτύου. Ειδικότερα θέματα που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν τη μορφή και το εύρος συχνοτήτων του αρμονικού φάσματος, την εξάρτηση των αρμονικών από την ισχύ λειτουργίας της Α/Γ και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους (διακύμανση μέσης τιμής, διασπορά και πιθανοτικές κατανομές του πλάτους και της φασικής γωνίας). Στη συνέχεια αναδεικνύεται το θέμα της επίδρασης των παραμέτρων ανάλυσης στον υπολογισμό των αρμονικών. Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης των αρμονικών που εισάγεται από το πρότυπο IEC 61000-4-7 και αναλύεται λεπτομερώς στο 3^ο Κεφάλαιο, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της στη διαμόρφωση του εκτιμώμενου πλάτους των αρμονικών, τα οποία αξιοποιούνται και για την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων ανάλυσης αρμονικών. Άλλη παράμετρος που εξετάζεται είναι το διάστημα ολοκλήρωσης (time-averaging) μέσω της σύγκρισης του βασικού διαστήματος των 10 κύκλων (0.2 s) με το διάστημα των 3 s που προτείνεται από το πρότυπο IEC 61000-3-6 και των 10 min που απαιτείται από το IEC 61400-21 και χρησιμοποιείται για τη συμπλήρωση των τιμών αρμονικών στα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος των Α/Γ. Τέλος, ο υπολογισμός των φασικών γωνιών των επιμέρους αρμονικών τάξεων και η ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών δίνει πρόσθετες πληροφορίες για τη φύση των αρμονικών και αποτελεί χρήσιμη παράμετρο κατά την εκτέλεση αρμονικών ροών φορτίου σε δίκτυα. Σημειώνεται ότι η διαδικασία υπολογισμού της φασικής γωνίας μέσω του FFT και των συμμετρικών συνιστωσών, παρ' ότι δεν είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του πλάτους των αρμονικών, αποτελεί πλέον απαίτηση της 2^{ης} έκδοσης του προτύπου IEC 61400-21, για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος των ανεμογεννητριών.

1.4.2 Μελέτη, υλοποίηση και εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας σήματος για την εκτίμηση αρμονικών σε ανεμογεννήτριες

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα προηγούμενα στάδια της εργασίας δίνουν το έναυσμα για την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας των μετρήσεων ρεύματος και τάσης των Α/Γ, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης του πλάτους και της συχνότητας των αρμονικών συνιστωσών τους. Βασικά ζητήματα που δεν απαντώνται πλήρως ή αξιόπιστα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας του IEC 61000-4-7 είναι η ανίχνευση συχνοτήτων διαφορετικών από τις τυπικές ακέραιες τάξης k και τις ενδιάμεσες αρμονικές τάξης $k+0.5$, η αβεβαιότητα στον υπολογισμό του πλάτους των αρμονικών αλλά και η ανάλυση αρμονικών σε ασθενή δίκτυα, όπου η θεμελιώδης συχνότητα παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Οι εναλλακτικές μέθοδοι που επιλέγονται για εφαρμογή στις Α/Γ, ανάμεσα σε μία σειρά μεθόδων που εξετάζονται στο 2^ο Κεφάλαιο, είναι ο μετασχηματισμός Wavelet (WT), η μέθοδος Hilbert-Huang (HHT) και η μέθοδος Prony. Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές συναντώνται αρκετά συχνά στη βιβλιογραφία για την ανάλυση σημάτων στα ΣΗΕ, η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνεται στην εφαρμογή τους σε συνθετικά, σχετικά απλά και εκ προοιμίου γνωστά σήματα, ενώ η επαλήθευσή τους επιχειρείται με την ανάλυση σημάτων που λαμβάνονται από εργαστηριακά δοκίμια τυπικών φορτίων, χωρίς τις ιδιαιτερότητες και την έντονη στοχαστικότητα των Α/Γ, [124], [129]. Παράλληλα, το κύριο χαρακτηριστικό των περισσότερων αναφορών είναι η απουσία συστηματικής συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ των μεθόδων. Η μοναδική αναφορά στην οποία παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για τις HHT και Prony είναι η [131], το αντικείμενο της οποίας ωστόσο είναι η εκτίμηση των ταλαντώσεων μεταξύ διασυνδεδεμένων ΣΗΕ (inter-area oscillations) και άρα περιορίζεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες (< 50 Hz).

Βασικό στόχο και ταυτόχρονα πρωτοτυπία της συγκεκριμένης ενότητας αποτελεί η συμπλήρωση και βελτίωση της υφιστάμενης μεθοδολογίας αρμονικής ανάλυσης Α/Γ με την υλοποίηση και εφαρμογή τριών από τις παραπάνω μεθόδους (WT, HHT και Prony). Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά αναζητήθηκαν μέθοδοι που θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν τον μετασχηματισμό Fourier στην επεξεργασία μη στάσιμων σημάτων. Από το πλήθος των διαθέσιμων μεθόδων τελικά επιλέχθηκαν ως πλέον κατάλληλες για εφαρμογή σε σήματα Α/Γ οι WT, HHT και Prony, για τους λόγους που εξηγούνται στο σχετικό Κεφάλαιο.
- Για την επαλήθευση της αξιοπιστίας της μεθόδου FFTG³, το πρότυπο IEC 61000-4-7 περιλαμβάνει σειρά παραδειγμάτων από συνθετικά σήματα. Τα σήματα αυτά αξιοποιούνται για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των νέων μεθόδων WT, HHT και Prony.
- Στη συνέχεια εξετάζεται η αποδοτικότητα των μεθόδων σε συνθετικά σήματα γνωστών αρμονικών χαρακτηριστικών, που όμως πλησιάζουν περισσότερο πραγματικές κυματομορφές. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB/Simulink ενός τυπικού 6-παλμικού αντιστροφέα με thyristors και ενός αντιστροφέα με IGBTs και έλεγχο SPWM. Οι προκύπτουσες κυματομορφές τάσης αναλύονται με τις μεθόδους WT, HHT και Prony και διερευνάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Μετά την αξιολόγησή τους σε γνωστά σήματα, οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε επιλεγμένο υποσύνολο πραγματικών μετρήσεων Α/Γ και αξιολογούνται μαζί με τις FFT και FFTG. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται επίσης και η συμπεριφορά των μεθόδων σε ασθενή συστήματα, όπου η βασική συχνότητα παρουσιάζει διακυμάνσεις. Οι μετρήσεις ποιότητας ισχύος σε τέτοιου είδους συστήματα έχουν την ιδιαιτερότητα ότι πραγματοποιούνται με ασύγχρονη δειγματοληψία (asynchronous sampling), με άμεσο αντίκτυπο στη φασματική διαρροή που προκύπτει από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier (FFT ή FFTG). Η εφαρμογή των μεθόδων WT, HHT και Prony αναδεικνύει ορισμένα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματά τους έναντι του μετασχηματισμού Fourier αλλά και συμβάλει στον εντοπισμό ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών των Α/Γ.

1.4.3 Μετρήσεις σε αιολικό πάρκο

Στόχος της εργασίας που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες είναι η ανάλυση των αρμονικών σε μεμονωμένες Α/Γ, η οποία αποτελεί τη βάση για την έκδοση των πιστοποιητικών ποιότητας ισχύος των εμπορικών Α/Γ. Από την άλλη πλευρά, κατά την αξιολόγηση των επιπτώσεων στα δίκτυα, αυτό που κυρίως απαιτείται είναι η γνώση των συνολικών αρμονικών των Α/Π και όχι των μεμονωμένων Α/Γ, [16], [138]-[139]. Για τον σκοπό αυτόν, τα πρότυπα IEC 61000-3-6 και IEC 61400-21 προτείνουν συγκεκριμένη μεθοδολογία άθροισης των αρμονικών των επιμέρους Α/Γ ενός Α/Π. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μετρήσεων αρμονικών στην έξοδο Α/Π που αποτελείται από Α/Γ μεταβλητών στροφών. Ακολουθώντας ανάλογη πορεία όπως για τις μεμονωμένες Α/Γ, εξετάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αρμονικών του ρεύματος του Α/Π στο φάσμα συχνοτήτων μέχρι τα 9 kHz. Επίσης, ερευνάται η εξάρτηση του επιπέδου των αρμονικών με το σημείο λειτουργίας του Α/Π, η επίδραση της μεθοδολογίας FFTG του IEC 61000-4-7 και πραγματοποιείται ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών. Τέλος γίνεται μία αναφορά στο σημαντικό θέμα της επίδρασης της υφιστάμενης αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου στο αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος του Α/Π.

1.5 Δομή της διατριβής

Η διατριβή ξεκινά με το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, το οποίο, μετά από μία σύντομη ανασκόπηση των υφιστάμενων τεχνολογιών Α/Γ, επικεντρώνεται στη βιβλιογραφική αναδρομή και επισκόπηση των αρμονικών εκπομπών από Α/Γ. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα υφιστάμενα διεθνή πρότυπα που καθορίζουν τη διαδικασία μετρήσεων και αξιολόγησης των αρμονικών εκπομπών των Α/Γ. Παράλληλα, παρατίθεται και σχολιάζεται το σύνολο της διαθέσιμης βιβλιογραφίας που αναφέρεται σε μετρήσεις σε πραγματικές Α/Γ. Το κεφάλαιο συνεχίζεται με τη συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων για την ανάλυση αρμονικών σε μη στάσιμα σήματα, όπως αυτά του ρεύματος και τάσης των Α/Γ, και ολοκληρώνεται με την αναλυτική περιγραφή του αντικειμένου, της πρωτοτυπίας και συμβολής της διατριβής.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο των πιο σημαντικών μεθόδων επεξεργασίας μη στάσιμων σημάτων, συμπεριλαμβανομένου και του μετασχηματισμού Fourier. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού, εκτός από την παρουσίαση των μεθόδων, είναι και η ανάδειξη των

³ Στο εξής, για λόγους διευκόλυνσης, η κλασική μέθοδος Short Time Fourier Transform θα αναφέρεται με τα αρχικά FFT ενώ η πλήρης μεθοδολογία ομαδοποίησης (Grouping) του IEC 61000-4-7 ως FFTG.

πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της καθεμιάς στην ανάλυση ποιότητας ισχύος στα ΣΗΕ, όπως προκύπτουν από τη διερεύνηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας. Τέλος παρουσιάζονται τα κριτήρια για την εφαρμογή τους στις μετρήσεις Α/Γ, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες αυτών, αλλά και τις απαιτήσεις των κανονισμών για τη σύνδεση στα δίκτυα.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής αναφορά στα υφιστάμενα πρότυπα μετρήσεων και αξιολόγησης των αρμονικών των Α/Γ, με στόχο να καταδειχθεί η σημασία της γνώσης των αρμονικών για την αξιολόγηση της συμβατότητας των αιολικών σταθμών με τα δίκτυα στα οποία πρόκειται να συνδεθούν. Η διάρθρωση του κεφαλαίου καλύπτει τόσο την περιγραφή της σειράς προτύπων IEC 61000, τα οποία καθορίζουν τις διαδικασίες εκτίμησης των ορίων εκπομπών αρμονικών, ανάλογα με τον τύπο του δικτύου, όσο και τις διαδικασίες μέτρησης των αρμονικών και γενικότερα των χαρακτηριστικών ποιότητας ισχύος των Α/Γ. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην παρουσίαση και τεκμηρίωση της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης (grouping) των αρμονικών συνιστωσών, όπως περιλαμβάνεται στο IEC 61000-4-7. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των περιεχομένων και του τρόπου σύνταξης του πιστοποιητικού μετρήσεων ποιότητας ισχύος των εμπορικών Α/Γ.

Το 4^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τη συστηματική ανάλυση των αρμονικών διαφορών τεχνολογιών εμπορικά διαθέσιμων Α/Γ, όπως προέκυψαν από μετρήσεις πεδίου. Στόχοι του κεφαλαίου είναι η αναγνώριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των εκπεμπόμενων αρμονικών σε συσχέτιση με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού συστήματος, η μελέτη της εξάρτησης των αρμονικών εκπομπών από το σημείο λειτουργίας της Α/Γ και η διερεύνηση της επίδρασης διαφορών παραμέτρων (χρόνος ολοκλήρωσης, grouping) στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, στο πλαίσιο της γενικότερης αξιολόγησης της μεθοδολογίας του IEC 61000-4-7. Για τη διατήρηση της συμβατότητας με τα αποτελέσματα που περιλαμβάνονται στις εκθέσεις δοκιμών, η ανάλυση του κεφαλαίου επικεντρώνεται στην εφαρμογή του κλασικού FFT και του FFTG.

Το 5^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας μη στάσιμων σημάτων στις Α/Γ, με στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας και σκοπιμότητας εφαρμογής τους σε σήματα Α/Γ, ως επέκταση του κλασικού FFT. Το κεφάλαιο ξεκινά με την υλοποίηση των μεθόδων WT, HHT και Prony στα συνθετικά σήματα του Annex C του IEC 61000-4-7, τα οποία χρησιμοποιούνται ως υπόδειγμα για την επαλήθευση των δυνατοτήτων των μεθόδων. Στη συνέχεια περιλαμβάνονται αποτελέσματα προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB/Simulink της λειτουργίας ενός τυπικού 6-παλμικού αντιστροφέα με thyristors και ενός αντιστροφέα πηγής τάσης και έλεγχο SPWM. Στα σήματα τάσης ή ρεύματος εφαρμόζονται οι μέθοδοι WT, HHT και Prony και διαπιστώνεται η ακρίβεια τους και οι ενδεχόμενες αποκλίσεις σε σχέση με τα θεωρητικά αναμενόμενα. Τέλος, οι τρεις εναλλακτικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε επιλεγμένα πραγματικά σήματα Α/Γ και παρατίθενται αποτελέσματα και κύρια συμπεράσματα, παράλληλα με μία συγκριτική αξιολόγηση σε αντιπαραβολή με τις FFT και FFTG.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται η ανάλυση των αρμονικών χαρακτηριστικών ενός Α/Π, επεκτείνοντας τη μεθοδολογία του 4^{ου} Κεφαλαίου. Παράλληλα, τίγονται θέματα άθροισης αρμονικών πολλαπλών Α/Γ για τον υπολογισμό του συνολικού αρμονικού ρεύματος Α/Π, καθώς και το ζήτημα της αναγνώρισης της προέλευσης των αρμονικών (από το Α/Π ή από το δίκτυο). Παρά τη σημασία της μελέτης και το ενδιαφέρον των αποτελεσμάτων, η συγκεκριμένη εργασία κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί ως παράρτημα, γιατί είναι απαραίτητο να συμπληρωθεί με στοιχεία από ταυτοχρονισμένες μετρήσεις στην έξοδο του Α/Π και σε μία τουλάχιστον Α/Γ του πάρκου, οι οποίες δεν ήταν διαθέσιμες, ενώ περαιτέρω ανάλυση χρήζει και το θέμα της αναγνώρισης της προέλευσης των αρμονικών και του επιμερισμού ευθύνης σε χρήστη (Α/Π) και Δίκτυο.

Στο Παράρτημα Β σχολιάζονται πρακτικά θέματα μετρήσεων ποιότητας ισχύος σε συνθήκες πεδίου. Περιγράφονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μέτρησης αρμονικών Α/Γ που χρησιμοποιήθηκε, από τους αισθητήρες μέτρησης έως το λογισμικό ανάλυσης. Επίσης γίνεται αναφορά στις υπόλοιπες σημαντικές παραμέτρους ποιότητας ισχύος (εκτός αρμονικών) που περιλαμβάνονται στη διαδικασία μετρήσεων, όπως κυρίως οι εκπομπές flicker και τα μεταβατικά λόγω χειρισμών, ενώ παράλληλα παρατίθεται η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργού και άεργου ισχύος, όπως εισήχθηκε στην τελευταία έκδοση του προτύπου IEC 61400-21, βασισμένη στη χρήση του FFT για την εκτίμηση της θεμελιώδους συνιστώσας των μετρούμενων τιμών τάσης και ρεύματος.

Το κείμενο της διατριβής ολοκληρώνεται με τον πλήρη κατάλογο των αναφορών και με λίστα δημοσιεύσεων του συγγραφέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Ο ακριβής υπολογισμός των αρμονικών εκπομπών Α/Γ με βάση πραγματικές μετρήσεις αποτελεί δύσκολο εγχείρημα καθώς χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος φάσματος με πολλές και άγνωστες εκ των προτέρων αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ως προς τη συχνότητα και το πλάτος και διαφέρουν από μηχανή σε μηχανή ανάλογα με τον έλεγχο των μετατροπέων, τα εφαρμοζόμενα φίλτρα, την υφιστάμενη παραμόρφωση του δικτύου και άλλους παράγοντες. Πρόσθετη πολυπλοκότητα στην επεξεργασία των δεδομένων εισάγει ο θόρυβος που υπερτίθεται στα μετρούμενα σήματα, προερχόμενος από τη λειτουργία των μετρητικών συστημάτων (τοποθέτηση αισθητήρων, σύνδεση γειώσεων, μήκος καλωδίων κ.λπ.) και από τις ηλεκτρονικές διατάξεις, [140], σε συνδυασμό με τις μη ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την διαχείριση αυτών των χαρακτηριστικών, η υφιστάμενη πρακτική για τη διαδικασία μέτρησης και εκτίμησης αρμονικών Α/Γ περιλαμβάνει την υιοθέτηση των απαιτήσεων του προτύπου IEC 61000-4-7, [13], που καλύπτει την μέτρηση και εκτίμηση των αρμονικών τάσεων και ρευμάτων σε όλα στα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Η θεμελιώδης θεώρηση του προτύπου αυτού περιλαμβάνει την εφαρμογή του Fast Fourier Transform (FFT) στις μετρούμενες κυματομορφές ρεύματος και τάσης με κατάλληλη επιλογή του τύπου και του μήκους του χρονικού παραθύρου για την επίτευξη μέγιστης δυνατής ακρίβειας χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση του υπολογιστικού φόρτου. Για την αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής εξαιτίας της ανεπαρκούς διακριτότητας συχνότητας του FFT και τη μη στασιμότητα των εξεταζόμενων σημάτων, το πρότυπο προτείνει τη χρήση διάταξης Phase Locked Loop (PLL) στο στάδιο της διεξαγωγής των μετρήσεων και την εφαρμογή της μεθοδολογίας της «ομαδοποίησης» στο στάδιο του υπολογισμού των αρμονικών συνιστωσών.

Παρόλο που το IEC 61000-4-7 έχει υιοθετηθεί από όλα τα μετρητικά ινστιτούτα που εξειδικεύονται στις μετρήσεις πιστοποίησης ποιότητας ισχύος των εμπορικών Α/Γ, αρκετά θέματα παραμένουν «ανοιχτά» προς περαιτέρω διερεύνηση ακόμη και με την εφαρμογή της «ομαδοποίησης», όπως η ακρίβεια στον εντοπισμό των ενδιάμεσων και ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων καθώς και η διαχείριση σημάτων με σημαντική χρονομεταβλητότητα, αναδεικνύοντας την ανάγκη αναζήτησης πρόσθετων εργαλείων μέτρησης και ανάλυσης. Επικεντρώνοντας στο στάδιο της ανάλυσης των μετρήσεων, η εφαρμογή μεθόδων φασματικής ανάλυσης σημάτων Α/Γ εναλλακτικών του FFT, αποτελεί ιδιαίτερο πεδίο επιστημονικού ενδιαφέροντος. Το ενδεχόμενο αυτό προτείνεται και από το IEC 61000-4-7, χωρίς ωστόσο να έχει εξεταστεί ενδελεχώς στη σχετική βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, παρόλο που είναι αρκετές οι δημοσιεύσεις στην ευρύτερη περιοχή της ανάλυσης αρμονικών στα ΣΗΕ [113], [129]-[130], [141]-[142], οι αναφορές που επικεντρώνονται στην αιολική ενέργεια είναι πολύ περιορισμένες και ασχολούνται με λοιπές εφαρμογές ή θέματα ποιότητας ισχύος των Α/Γ εκτός των αρμονικών [116], [143]-[144], ενώ όσες αναφέρονται στην εκτίμηση αρμονικών, βασίζονται είτε σε αποτελέσματα προσομοίωσης, [145], ή σε μετρήσεις σε εργαστηριακά δοκίμια [146], [147]. Επιπρόσθετα, δεν συναντώνται δημοσιεύσεις που να ακολουθούν τη μεθοδολογία του IEC 61400-21, στοιχείο απαραίτητο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των εναλλακτικών μεθόδων στην εκτίμηση των πραγματικών αρμονικών εκπομπών Α/Γ και Α/Π.

Στα πλαίσια αυτά, το παρόν Κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη και αξιολόγηση των πιο σημαντικών μεθόδων φασματικής ανάλυσης μη στάσιμων σημάτων, όπως παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τους στις Α/Γ. Η μελέτη ξεκινά από το μετασχηματισμό Fourier, ο οποίος αποτελεί το πιο διαδεδομένο εργαλείο επεξεργασίας σημάτων και στη συνέχεια ασχολείται με εναλλακτικές μεθόδους που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στο πεδίο των Α/Γ για την ακριβέστερη εκτίμηση του πλάτους και της συχνότητας των αρμονικών συνιστωσών και κυρίως των μετασχηματισμών Wavelets, S-Transform και των μεθόδων Hilbert-Huang και Prony, ενώ στη διερεύνηση συγκαταλέγονται και πιο σύγχρονες παραμετρικές μέθοδοι αρμονικής ανάλυσης, όπως οι ARMA, MUSIC, ESPRIT, τα φίλτρα KALMAN και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN). Η μελέτη εστιάζει στο βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων, χωρίς να ασχολείται σε αυτό το στάδιο με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των προτύπων IEC 61000-4-7 και 61400-21 για τις Α/Γ. Η μελέτη και αξιολόγηση της μεθοδολογίας της «ομαδοποίησης» του IEC αλλά

και της αποτελεσματικότητας των μεθόδων σε συνθετικά και πραγματικά σήματα, αποτελεί αντικείμενο των επόμενων κεφαλαίων.

2.2 Ο μετασχηματισμός Fourier ως βασικό εργαλείο ανάλυσης

2.2.1 Ορισμός και υλοποίηση μετασχηματισμού Fourier

Εάν $x(t)$ είναι ένα συνεχές περιοδικό σήμα (με περίοδο T) που ικανοποιεί τη συνθήκη Dirichlet, μπορεί να παρασταθεί από μία σειρά Fourier ως εξής, [148]:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X\left(\frac{2\pi n}{T}\right) \cdot e^{in\frac{2\pi}{T}t} \quad (2.1)$$

όπου $2\pi/T$ είναι η θεμελιώδης γωνιακή συχνότητα και $X(2\pi n/T)$ είναι ο συντελεστής Fourier της αρμονικής συνιστώσας n -τάξης, η οποία υπολογίζεται από την αντίστροφη σχέση:

$$X\left(\frac{2\pi n}{T}\right) = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} x(t) \cdot e^{-in\frac{2\pi}{T}t} dt \quad (2.2)$$

Σύμφωνα με τη σχέση 2.1, ένα περιοδικό σήμα μπορεί να διαχωριστεί σε ένα άπειρο άθροισμα από ημιτονοειδείς συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Για την υλοποίηση της ανάλυσης Fourier στον υπολογιστή, το εξεταζόμενο σήμα θεωρείται πεπερασμένο και διακριτό ως προς το χρόνο και τη συχνότητα. Έτσι προκύπτει ο λεγόμενος Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) [149], ο οποίος υλοποιείται ψηφιακά μέσω του αλγορίθμου FFT⁴, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Έστω πεπερασμένο δείγμα N σημείων της χρονοσειράς $x(t)$, το οποίο έχει μετρηθεί με συχνότητα δειγματοληψίας f_s και αποτελεί το λεγόμενο «χρονικό παράθυρο» (time window) [110]. Με την εφαρμογή του FFT στο χρονικό παράθυρο N σημείων, προκύπτει το διάνυσμα \vec{X}_{FFT} , σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση, [148], [150]-[151]:

$$\vec{X}_{FFT} = \sum_{n=1}^N x_n \cdot e^{-i\cdot 2\pi \frac{k}{N}n} \quad (2.3)$$

Το διάνυσμα \vec{X}_{FFT} περιλαμβάνει N στοιχεία, εν γένει μιγαδικά, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία τιμή συχνότητας f_k στο διάστημα $[0, f_s/2]$, ενώ το πλάτος τους διαμορφώνεται ως εξής:

- Το πρώτο στοιχείο, $\vec{X}_{FFT}(1)$ του διανύσματος εξόδου του μετασχηματισμού αντιστοιχεί στη μέση τιμή \bar{X} του σήματος $x(t)$ και είναι πραγματικός αριθμός:

$$\bar{X} = \frac{\vec{X}_{FFT}(1)}{N} \in \mathfrak{R} \quad (2.4)$$

- Το στοιχείο στο μέσο του διανύσματος \vec{X}_{FFT} , αν N είναι περιττός αριθμός, ή το αμέσως επόμενο του, αν N είναι άρτιος, δίνεται από τη σχέση:

$$X_k = \frac{\vec{X}_{FFT}(N_m)}{N}, N_m = \begin{cases} \frac{N}{2}+1 & \text{αν } N \text{ άρτιος} \\ \frac{N+1}{2} & \text{αν } N \text{ περιττός} \end{cases} \quad (2.5)$$

- Τα ενδιάμεσα στοιχεία του διανύσματος \vec{X}_{FFT} περιλαμβάνουν τις υπόλοιπες αρμονικές του εξεταζόμενου σήματος και αντιστοιχούν στις συχνότητες:

$$f_k = k \cdot \Delta f \in \left(0, \frac{f_s}{2}\right), k = \begin{cases} 1, \dots, \frac{N}{2} & \text{αν } N \text{ άρτιος} \\ 1, \dots, \frac{N-1}{2} & \text{αν } N \text{ περιττός} \end{cases} \quad (2.6)$$

όπου Δf είναι η διακριτότητα στο πεδίο συχνότητας ίση με f_s/N .

Τα αντίστοιχα πλάτη των αρμονικών αυτών δίνονται από τις σχέσεις:

⁴ Ο DFT υλοποιείται μέσω μιας οικογένειας αλγορίθμων γνωστών ως Fast Fourier Transform (FFT), οι οποίοι προσφέρουν σημαντική μείωση στο χρόνο και φόρτο υπολογισμών. Πιο συγκεκριμένα, ενώ ο DFT απαιτεί N^2 μιγαδικούς υπολογισμούς, ο FFT απαιτεί από $2 \times N$ έως $\log_2(N) \times N/2$ ανάλογα με τον αλγόριθμο, [149]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος FFT που είναι ενσωματωμένος στο περιβάλλον MATLAB.

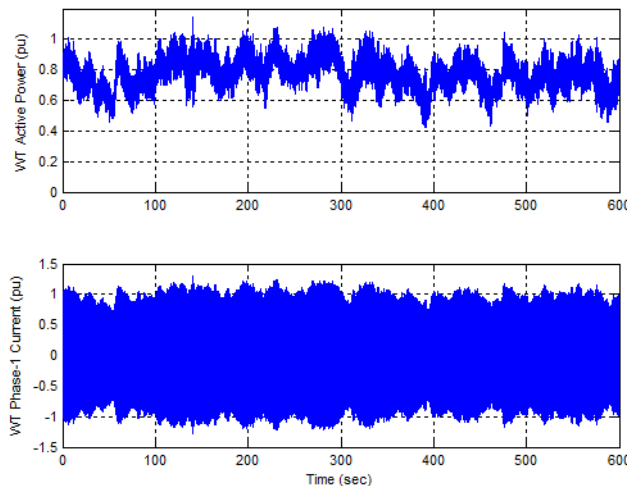
$$X_k = 2 \cdot \frac{\bar{X}_{FFT}(k)}{N} = 2 \cdot \bar{X}_{FFT}(k) \cdot \frac{\Delta f}{f_s} \quad (2.7)$$

όπου ο συντελεστής 2 οφείλεται στη συμμετρία του διανύσματος ως προς το κέντρο του, για την ενδιάμεση περιοχή συχνοτήτων (υπέρθεση των αντίστοιχων τμημάτων)

2.2.2 Εφαρμογή του FFT σε σήματα Α/Γ

Όταν η εξεταζόμενη χρονοσειρά είναι στάσιμο σήμα, η εφαρμογή του FFT είναι αποδοτική και οδηγεί στον υπολογισμό των αρμονικών συνιστωσών με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η εμπειρία όμως από την ανάλυση μετρήσεων ποιότητας ισχύος έχει δείξει ότι ο εντοπισμός και υπολογισμός των αρμονικών συχνοτήτων σε πραγματικά σήματα μπορεί να παρουσιάζει αξιοσημείωτες ιδιαιτερότητες. Ειδικά στις Α/Γ, πρόσθετες αβεβαιότητες εισάγονται λόγω της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος, οι οποίες επιδρούν στις εμφανιζόμενες συχνότητες. Τα θέματα που θίγονται στην παρούσα παράγραφο ισχύουν γενικότερα για τα ΣΗΕ, επικεντρώνονται ωστόσο στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Α/Γ.

Το βασικό χαρακτηριστικό της αιολικής ισχύος και συνεπώς των παραγόμενων ρευμάτων είναι η συνεχής μεταβλητότητα ως προς το χρόνο λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς του ανέμου. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η διακύμανση της ενεργού ισχύος και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος μιας Α/Γ κατά τη διάρκεια δεκάλεπτης καταγραφής. Ο υπολογισμός της ισχύος πραγματοποιήθηκε από τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης των τριών φάσεων, που έχουν ληφθεί με συχνότητα δειγματοληψίας 3200 Hz. Το πλέον ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η διακύμανση της ενεργού ισχύος που εγγέεται στο δίκτυο κινείται σε ένα εύρος έως και 60% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Συνεπώς, η επιτυχής εφαρμογή του FFT για τον υπολογισμό των αρμονικών ρεύματος μιας Α/Γ, προϋποθέτει κατ' αρχήν τον κατάλληλο καθορισμό του αριθμού των δειγμάτων ώστε το τελικό αποτέλεσμα να δίνει όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική πληροφορία για τις διακυμάνσεις τους. Για παράδειγμα, εάν θεωρηθεί ολόκληρο το δείγμα σημείων για τον FFT, τα αποτελέσματα θα δώσουν μια μέση τιμή δεκαλέπτου για κάθε αρμονική συνιστώσα, αγνοώντας τα στιγμιαία μέγιστα που εμφανίζονται μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα και συνεπώς υποεκτιμώντας τις επιπτώσεις στο δίκτυο, όπου πρόκειται να συνδεθεί η Α/Γ. Επιπρόσθετα, η χρήση μεγάλου δείγματος σημείων ($N = 3200 \text{ Hz} \times 600 \text{ s}$) επιβαρύνει δυσανάλογα τους υπολογισμούς.



Σχήμα 2.1. Τυπική διακύμανση ενεργού ισχύος και ρεύματος Α/Γ κατά τη διάρκεια δεκαλέπτου.

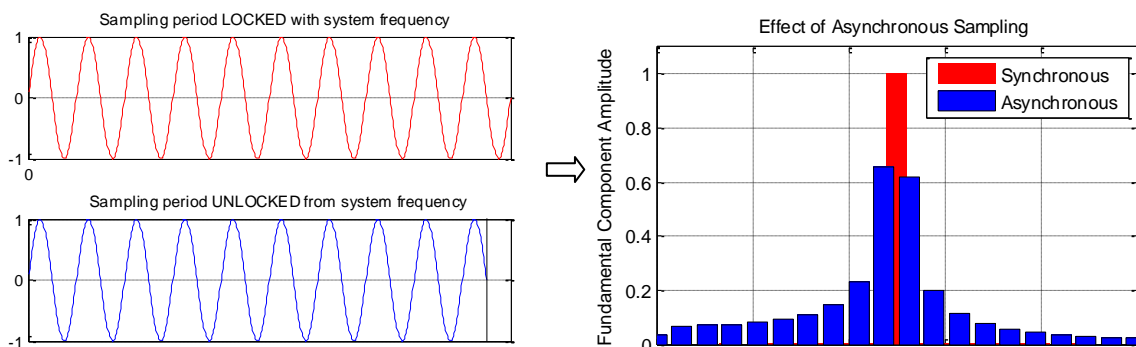
Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού, έχει εισαχθεί στην ανάλυση ποιότητας ισχύος ο μετασχηματισμός Fourier σύντομης διάρκειας, γνωστός ως Short Time Fourier Transform (STFT), [13], [110]. Σύμφωνα με αυτόν, το εξεταζόμενο σήμα χωρίζεται σε τμήματα, που καλούνται χρονικά παράθυρα, το μήκος των οποίων (T_w) αποτελεί βασική παράμετρο και επιλέγεται κατάλληλα με βάση το είδος των διαθέσιμων μετρήσεων και τα αναμενόμενα φασματικά χαρακτηριστικά τους. Μικρό μήκος παραθύρου χρησιμοποιείται για λεπτομερή ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και μεγαλύτερο για μεγαλύτερη διακριτικότητα στη συχνότητα (Δf) αλλά και γρήγορη σάρωση μεγάλου όγκου δεδομένων:

$$\Delta f = \frac{1}{T_w} \quad (2.8)$$

Ο STFT αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο και ιδιαίτερα διαδεδομένο εργαλείο για την ανάλυση πραγματικών μετρήσεων αρμονικών, καθώς διατηρεί το πλεονέκτημα της υπολογιστικής ταχύτητας υλοποίησης του FFT με σχετικά μικρό αριθμό σημείων και ταυτόχρονα επιτρέπει τη σάρωση μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των Α/Γ, όπου απαιτείται η λήψη δεδομένων για όλο το εύρος της παραγόμενης ισχύος. Η βασική παράμετρος της μεθόδου είναι το μήκος T_w του παραθύρου, για την επιλογή του οποίου προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία, όπως η χρήση σταθερού μήκους, [13], η ολίσθηση του παραθύρου [103] και η μεταβολή του μήκους του ανάλογα με τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου σήματος, [102], [110]. Το πλεονέκτημα του μεταβαλλόμενου παραθύρου είναι ότι μπορεί να γίνεται μικρό για να ανιχνεύσει υψίσυχνα φαινόμενα και μεγάλο όταν υπάρχουν αργές διακυμάνσεις χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο, στην πλειοψηφία των σημάτων ποιότητας ισχύος και προφανώς και στα σήματα Α/Γ, το αρμονικό τους περιεχόμενο δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό με συνέπεια να είναι πρακτικά αδύνατο να ευρεθεί η βέλτιστη τιμή για το χρονικό παράθυρο. Η χρήση μεγάλου μήκους παραθύρου δεν είναι αποτελεσματική στην παρακολούθηση της χρονικής μεταβλητότητας των σημάτων, ενώ με παράθυρο μικρού μήκους μειώνεται σημαντικά η δυνατότητα του αλγορίθμου να διαχωρίσει κοντινές συχνότητες και κατ' επέκταση η ακρίβεια του STFT και ταυτόχρονα επιβαρύνεται ανάλογα η υλοποίηση του αλγορίθμου στον υπολογιστή. Ως συμβιβαστική λύση μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού φόρτου, το πρότυπο IEC 61000-4-7 αλλά και το πρότυπο IEEE-519, [78], ορίζουν το μήκος παραθύρου σε 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας 50 Hz (ή 12 κύκλους στα συστήματα 60 Hz), που αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια 0.2 s, [132].

Η επιλογή του συγκεκριμένου μήκους χρονικού παραθύρου παρέχει ικανοποιητική παρακολούθηση των διακυμάνσεων του πλάτους των αρμονικών συνιστωσών αλλά δεν διασφαλίζει την ακρίβεια υπολογισμού των αντίστοιχων συχνοτήτων. Δεδομένου ότι τα 0.2 s αντιστοιχούν σε διακριτότητα συχνότητας ίση με 5 Hz, για την επιτυχή εφαρμογή του STFT θα πρέπει τα εξεταζόμενα σήματα να περιλαμβάνουν αποκλειστικά συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια των 5 Hz, γεγονός που γενικά δεν ισχύει στις Α/Γ και ιδιαίτερα σε αυτές που διαθέτουν ΑΓΔΤ ή μετατροπείς με έλεγχο ρεύματος υστέρησης [23], [47], [56]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, συνέπεια της εφαρμογής του STFT είναι η εμφάνιση φασματικής διαρροής (*spectral leakage*), όπως εξηγείται αναλυτικά παρακάτω.

Ως φασματική διαρροή χαρακτηρίζεται η διάχυση της ενέργειας των αρμονικών συνιστωσών σε γειτονικές συχνότητες, η οποία εμφανίζεται όταν η βασική συχνότητα του δικτύου παρουσιάζει διακυμάνσεις ή όταν οι αρμονικές δεν αντιστοιχούν στη διακριτότητα συχνότητας του STFT, [132], [152]-[154]. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των μετρητικών συστημάτων χρησιμοποιούν σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας, μικρές μεταβολές στη συχνότητα έχουν ως αποτέλεσμα ο αριθμός των δειγμάτων που θεωρητικά αντιστοιχούν σε κάθε περίοδο να μην αντιστοιχεί ακριβώς στην πραγματική περίοδο του σήματος, γεγονός που ονομάζεται ασύγχρονη δειγματοληψία (*asynchronous sampling*). Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 2.2.

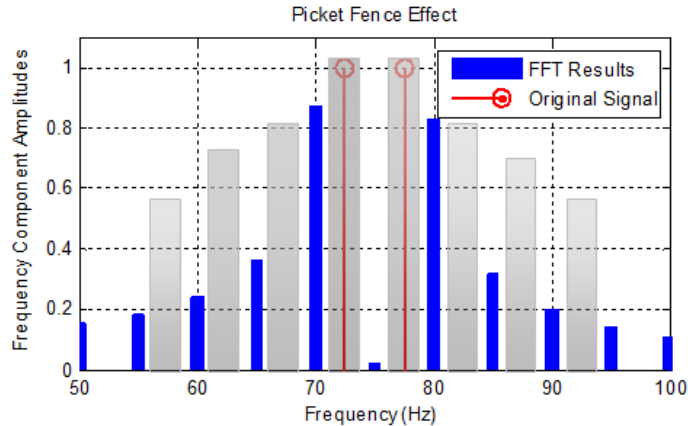


Σχήμα 2.2. Επίπτωση της ασύγχρονης δειγματοληψίας στην ακρίβεια του FFT.

Τα αποτελέσματα του STFT είναι ορθά, μόνο στην περίπτωση που ο αριθμός των δειγμάτων αντιστοιχεί σε ακέραιο αριθμό περιόδων του σήματος (π.χ. 10 κύκλους). Εάν η συχνότητα μεταβληθεί χωρίς να υπάρξει αντίστοιχη προσαρμογή της δειγματοληψίας, ο αριθμός των δειγμάτων δεν

αντιστοιχεί σε ακέραιο αριθμό περιόδων και η εφαρμογή του STFT έχει ως αποτέλεσμα τη διάχυση της ενέργειας της πραγματικής αρμονικής συνιστώσας σε περισσότερες «εικονικές» συχνότητες εκατέρωθεν αυτής, η τιμή και το πλάτος των οποίων εξαρτάται από το μέγεθος του σφάλματος συγχρονισμού.

Στην περίπτωση τώρα που η διακριτότητα συχνότητας κατά την εφαρμογή του STFT δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό των πραγματικών συχνοτήτων, προκύπτουν και πάλι εικονικές αρμονικές, οι οποίες διαφέρουν από τις πραγματικές ως προς τη συχνότητα και το πλάτος. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται στη βιβλιογραφία ως φαινόμενο «φράχτη» (*picket fence*), [101], [105], [107], [110], [111], [113], [132].



Σχήμα 2.3. Επίδραση της διακριτότητας συχνότητας στην εμφάνιση του φαινομένου «*picket fence*».

Στο Σχήμα 2.3 εικονίζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του FFT σε ένα υποθετικό σήμα που περιλαμβάνει δύο μη ακέραιες αρμονικές στα 72.5 Hz και 77.5 Hz. Η επιλογή χρονικού παραθύρου διάρκειας 0.2 s, που αντιστοιχεί σε διακριτότητα συχνότητας 5 Hz, οδηγεί στην εμφάνιση αποτελεσμάτων σε συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια του 5 (70 Hz, 75 Hz, 80 Hz κ.λπ) με άμεση συνέπεια τη διάχυση του ενεργειακού περιεχομένου των πραγματικών αρμονικών σε εικονικές αρμονικές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η επιλεγθείσα διακριτότητα συχνότητας λειτουργεί ως «φράχτης» (γκρι ράβδοι), ο οποίος «κρύβει» τις πραγματικές αρμονικές (κόκκινες γραμμές) και έχει ως συνέπεια τη διάχυση του αρμονικού περιεχομένου σε περισσότερες γειτονικές συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια των 5 Hz.

Στις αδυναμίες του μετασχηματισμού Fourier συγκαταλέγεται και το φαινόμενο *αναδίπλωσης του φάσματος (aliasing)*, όπως αποκαλείται η λανθασμένη ή ανεπαρκής αναπαράσταση του πραγματικού σήματος όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη από το εύρος των συχνοτήτων που περιέχονται σε αυτό. Θεωρητικά, η ανώτερη συχνότητα για την οποία μπορεί να υπολογιστεί το φασματικό περιεχόμενο του σήματος δεν ξεπερνά το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας και ονομάζεται συχνότητα *Nyquist* ή συχνότητα αποκοπής:

$$F_{Nyquist} = \frac{f_s}{2} \quad (2.9)$$

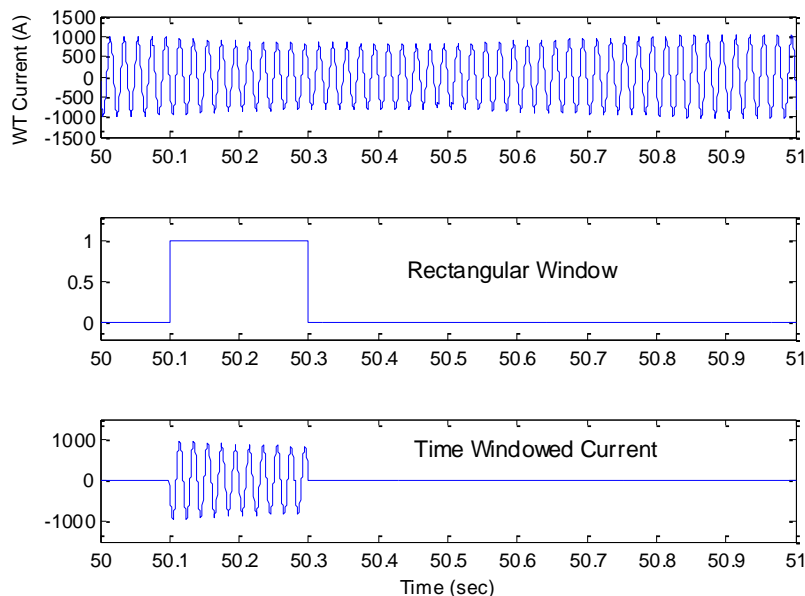
Στη μέτρηση σημάτων ποιότητας ισχύος, το φαινόμενο *aliasing* μπορεί να προληφθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα επιλεγμένο βαθυπερατό φίλτρο (συνήθως *Butterworth*) στην είσοδο του μετρητικού συστήματος, του οποίου η συχνότητα αποκοπής f_c ικανοποιεί το κριτήριο *Nyquist* ($f_c < f_s / 2$). Προφανώς, λόγω του ότι οι συχνότητες των πραγματικών σημάτων δεν είναι γνωστές εκ προοιμίου, η επιλογή της κατάλληλης δειγματοληψίας γίνεται με γνώμονα το επιθυμητό εύρος αρμονικών που επιδιώκεται να υπολογιστεί. Στην πράξη, η επιλεγθείσα δειγματοληψία επιλέγεται τουλάχιστον 4 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος.

Ολοκληρώνοντας την αναφορά στις αδυναμίες του μετασχηματισμού Fourier, αξίζει να αναφερθεί και το φαινόμενο *Gibbs*, [155], το οποίο αποδίδεται στη μη ομοιόμορφη σύγκλιση των σειρών Fourier όταν υπάρχουν τοπικές ασυνέχειες στο εξεταζόμενο σήμα, με συνέπεια την εμφάνιση ταλαντώσεων γύρω από τα σημεία ασυνέχειας που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το φαινόμενο αυτό αφορά στη σύνθεση σημάτων με χρήση σειρών Fourier σε ειδικές περιπτώσεις ασυνεχειών (όπως για παράδειγμα ο τετραγωνικός παλμός) και δεν έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τη βιβλιογραφία που σχετίζεται με την ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος.

2.2.3 Η χρήση χρονικών παραθύρων

Σημαντικό μέρος της προηγούμενης παραγράφου αφιερώθηκε στην επιλογή του κατάλληλου μήκους του χρονικού παραθύρου ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή ανάλυση του εξεταζόμενου σήματος ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Στην προσέγγιση αυτή υπονοείται απλουστευτικά ότι το αποτέλεσμα του FFT⁵ παραμένει αναλλοίωτο, ανεξάρτητα από τον αριθμό των σημείων που θεωρούνται για την εφαρμογή του. Αποδεικνύεται ωστόσο, ότι η ανάλυση ενός σήματος εντός πεπερασμένου χρονικού παραθύρου εισάγει σημαντικούς περιορισμούς, οι οποίοι είναι δυνατό να επηρεάσουν την ακρίβεια του FFT. Από την άλλη πλευρά, με την επιλογή κατάλληλου τύπου παραθύρου μπορεί να περιοριστεί η φασματική διαρροή που οφείλεται σε ασύγχρονη δειγματοληψία. Η διαδικασία εφαρμογής κατάλληλου τύπου παραθύρου έχει καθιερωθεί με τον όρο «*windowing*» και έχει αποτελέσει ευρύ πεδίο διερεύνησης στη σχετική βιβλιογραφία, [107], [108], [110], [149], [152], [153], [156]-[163]. Δεδομένου ότι ο τύπος του παραθύρου σχετίζεται άμεσα με την εμφάνιση ή όχι φασματική διαρροής, αποτελεί σημαντική παράμετρο υλοποίησης του FFT και κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί και στα πλαίσια της εφαρμογής του στις Α/Γ.

Ουσιαστικά, η κλασική διαδικασία εφαρμογής χρονικού παραθύρου ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό στο πεδίο του χρόνου του εξεταζόμενου σήματος $x(t)$ με ένα τετραγωνικό παλμό $w(t)$ μοναδιαίου πλάτους και διάρκειας ίσης με το μήκος του παραθύρου (T_w), που ονομάζεται τετραγωνικό παράθυρο (RW⁶). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής RW σε κυματομορφή του ρεύματος μίας φάσης που μετράται στους ακροδέκτες μιας Α/Γ. Θεωρώντας μήκος χρονικού παραθύρου ίσο προς 0.2 s (σε συμφωνία με την απαίτηση του προτύπου IEC 61000-4-7), το εξεταζόμενο σήμα διαχωρίζεται σε διαδοχικά τμήματα μήκους 0.2 s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Επίδραση της εφαρμογής τετραγωνικού παραθύρου σε μετρημένο σήμα Α/Γ.

Μαθηματικά, ο μοναδιαίος τετραγωνικός παλμός πλάτους T_w και κέντρου t_0 ορίζεται από τη σχέση:

$$w(t - t_0) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \left| \frac{t - t_0}{T_w} \right| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{αν } t \notin [0, T_w] \end{cases} \quad (2.10)$$

Το σήμα που προκύπτει μετά την εφαρμογή του χρονικού παραθύρου ισούται με:

$$g(n) = x(n) \cdot w(n), \quad n=0, 1, \dots, L-1 \quad (2.11)$$

όπου L εκφράζει τον αριθμό των σημείων (δειγμάτων) του χρονικού παραθύρου και προφανώς εξαρτάται από το μήκος του T_w και τη συχνότητα δειγματοληψίας f_s :

⁵ Στη συνέχεια της διατριβής χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο όρος FFT, υπονοώντας προφανώς την εφαρμογή του STFT.

⁶ Στο εξής, αντί του όρου «τετραγωνικό παράθυρο» θα χρησιμοποιείται η συντομογραφία RW (Rectangular Window).

$$L = T_w \cdot f_s \quad (2.12)$$

Ο πολλαπλασιασμός των δύο σημάτων στο πεδίο του χρόνου αντιστοιχεί στη συνέλιξη τους στο πεδίο της συχνότητας:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega - \lambda) \cdot W(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (2.13)$$

όπου G είναι ο μετασχηματισμός Fourier εντός του παραθύρου του $x(t)$ και X και W είναι οι μετασχηματισμοί του αρχικού σήματος $x(t)$ και του τετραγωνικού παλμού $w(t)$ αντίστοιχα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγωνικού παραθύρου W , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \int_t^{t+T_w} e^{-j\omega t} dt = T_w \cdot \text{sinc}\left(\frac{\omega \cdot T_w}{2}\right) \cdot e^{-j\omega t_0} \quad (2.14)$$

όπου t_0 είναι το κέντρο του τετραγωνικού παλμού ενώ η συνάρτηση *sinc* ορίζεται ως εξής:

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (2.15)$$

Από την 2.14 προκύπτει το μέτρο του $W(\omega)$, το οποίο απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2.5 (α):

$$|W(\omega)| = T_w \cdot \text{sinc}\left(\frac{\omega \cdot T_w}{2 \cdot \pi}\right) \quad (2.16)$$

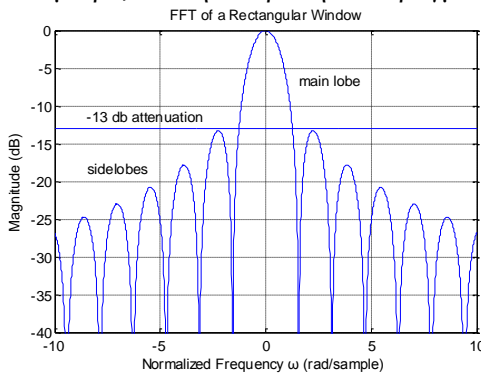
Αν το σήμα $x(t)$ περιλαμβάνει περιοδικές συνιστώσες συχνότητας $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, το πραγματικό φάσμα $X(\omega_1), X(\omega_2), \dots, X(\omega_n)$ θα εμφανίζεται με τις στρεβλωμένες συνιστώσες $G_1(\omega), G_2(\omega), \dots, G_n(\omega)$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$G_i(\omega) = T_w \cdot F(\omega_i) \cdot \text{sinc}\left(\frac{(\omega - \omega_i) \cdot T_w}{2 \cdot \pi}\right) \quad (2.17)$$

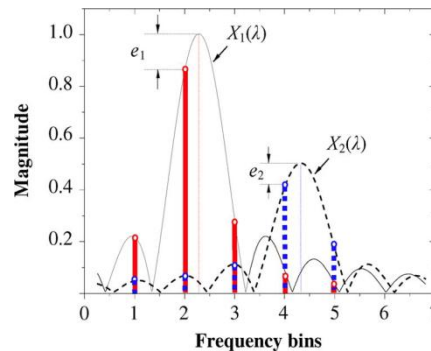
Η εξίσωση 2.17 αποτελεί υποπερίπτωση της λεγόμενης «*sifting property*» των κρουστικών συναρτήσεων (εξ. 2.14 της αναφοράς [106]), δηλαδή της ιδιότητας που έχουν να «στρεβλώνουν» τις αρμονικές συνιστώσες της κύριας συνάρτησης σύμφωνα με την παρακάτω γενική εξίσωση:

$$\int f(y) \cdot \delta(x - y) \cdot dy = f(x) \quad (2.18)$$

Στην περίπτωση τετραγωνικού παλμού, η στρέβλωση οφείλεται στην επίδραση της συνάρτησης *sinc*. Εάν το χρονικό παράθυρο είναι μεγάλο, η συνάρτηση *sinc* γίνεται μονάδα σε όλο το εύρος των αρμονικών ενδιαφέροντος και δεν έχει καμία επίδραση στους συντελεστές Fourier. Αντίθετα, εάν το παράθυρο είναι μικρό, τότε η επίδραση στο πραγματικό φάσμα είναι σημαντική, [110].



(α) Μέτρο συντελεστών Fourier



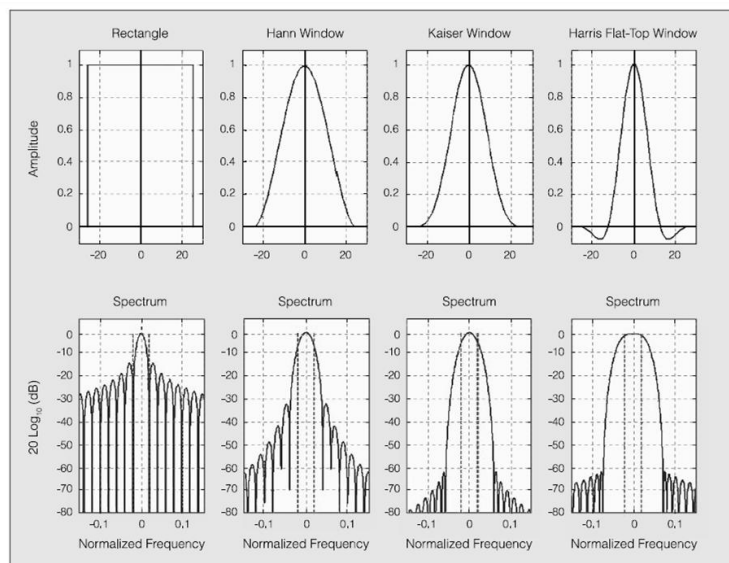
(β) Επίδραση στον υπολογισμό των αρμονικών

Σχήμα 2.5. Φασματικά χαρακτηριστικά τετραγωνικού παραθύρου και επίπτωση της χρήσης του στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων του FFT. Το σχήμα (β) έχει ληφθεί από την αναφορά [106].

Στο σχήμα 2.5 συνοψίζονται οι ιδιότητες και η επίδραση του RW στην ακρίβεια του FFT. Η επίδραση του χρονικού παραθύρου ισοδυναμεί πρακτικά με την εφαρμογή φίλτρου με τα χαρακτηριστικά απόκρισης του σχήματος 2.5 (α). Ο FFT του RW χαρακτηρίζεται από έναν κύριο λοβό (*main-lobe*) με μέγιστο πλάτος ίσο με το πλάτος του RW και μία σειρά πλευρικών λοβών (*sidelobes*), με αργό ρυθμό απόσβεσης. Στο Σχήμα 2.5 (β) απεικονίζεται ένα παράδειγμα επίπτωσης του RW στο αποτέλεσμα του FFT ενός σήματος που αποτελείται από δύο συνιστώσες: $x(n) = x_1(n) + x_2(n)$, [106], [153]. Οι φασματικές γραμμές εξαρτώνται από το μήκος του παραθύρου που επιλέχθηκε

και δεν συμπίπτουν με τις πραγματικές αρμονικές συνιστώσες, αλλά αποκλίνουν από τα πραγματικά πλάτη κατά e_1 και e_2 αντίστοιχα. Αντί αυτού, κάθε αρμονική εμφανίζει πολλαπλές φασματικές γραμμές, τα πλάτη των οποίων διαμορφώνονται από το φάσμα του RW. Το σφάλμα είναι μηδενικό (μηδενική απόσβεση) μόνο όταν οι αρμονικές συνιστώσες Fourier ταυτίζονται με την επιλεγθείσα διακριτότητα συχνότητας του FFT.

Το RW αποτελεί την απλούστερη μορφή παραθύρου και, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, το φάσμα του χαρακτηρίζεται από στενό κύριο λοβό συγκριτικά με άλλους τύπους παραθύρων, ιδιότητα που παρέχει την καλύτερη διακριτότητα μεταξύ πολύ κοντινών αρμονικών, αλλά και από μεγαλύτερους και πιο αργά αποσβενύμενους πλευρικούς λοβούς, με συνέπεια την εμφάνιση παρεμβολών από συχνότητες μεγάλου πλάτους σε πιο αδύναμες γειτονικές συχνότητες. Γενικά, τα παράθυρα με μικρό πλάτος πλευρικών λοβών και μεγάλο ρυθμό απόσβεσης του κύριου λοβού, θεωρούνται αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής και της ανάμειξης των αρμονικών συχνοτήτων, [106], [153]. Εκτός από το RW, πολλές αναφορές προτείνουν τη χρήση παραθύρου *Hanning*, [107], [159]-[160], ενώ σημαντικός αριθμός εργασιών ασχολείται με παραλλαγές ημιτονοειδών παραθύρων (*cosine windows*), [106], [153], [156]-[158]. Η φασματική απόκριση διαφόρων τύπων παραθύρων εικονίζεται ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Φασματική απόκριση βασικών τύπων παραθυρικών συναρτήσεων, [149].

Προφανώς και στα σήματα Α/Γ, σε συνθήκες ασύγχρονης δειγματοληψίας ή όταν υπάρχουν ενδιάμεσες αρμονικές, οι προκύπτουσες φασματικές γραμμές δεν ταυτίζονται γενικά με το κέντρο του κύριου λοβού με αποτέλεσμα να εμφανίζονται εξασθενημένες, με την ενέργεια τους να διαχέεται στις γειτονικές συχνότητες, [153], και συνεπώς να εμφανίζεται φασματική διαρροή. Επιχειρώντας ένα συμβιβασμό μεταξύ της επιθυμητής ακρίβειας και της αύξησης της πολυπλοκότητας στην ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, το πρότυπο IEC 61000-4-7 υιοθετεί τη χρήση τετραγωνικού παραθύρου για την ανάλυση αρμονικών Α/Γ με την προϋπόθεση της χρήσης κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού που θα διασφαλίζει σύγχρονη δειγματοληψία. Εναλλακτικά, και μόνο σε συνθήκες απώλειας συγχρονισμού με το δίκτυο, επιτρέπεται η χρήση παραθύρου *Hanning*, με τον όρο ότι τα σχετικά δεδομένα θα σημαίνονται κατάλληλα, [13].

2.2.4 Συμπεράσματα και προοπτικές εφαρμογής του FFT στην ανάλυση αρμονικών ανεμογεννητριών

Ο Πίνακας 2.1 περιλαμβάνει τα κύρια χαρακτηριστικά του αλγορίθμου FFT και της υλοποίησης του σε μη στάσιμα σήματα μέσω του STFT, όπως αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Ειδικότερα όσον αφορά τις Α/Γ, διαπιστώνεται ότι ενώ ο FFT αποτελεί ένα πολύ γρήγορο και εύρηστο εργαλείο ανάλυσης, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των σημάτων είναι ενδεχόμενο να εισάγει σφάλματα στην εκτίμηση των αρμονικών συνιστωσών τους. Η αναζήτηση τεχνικών ή εναλλακτικών μεθόδων για τον περιορισμό των σφαλμάτων αυτών και την αύξηση της αξιοπιστίας στην φασματική ανάλυση Α/Γ αναδεικνύεται σε ζήτημα μείζονος σημασίας, για την αξιολόγηση της

συμβατότητας με τα υφιστάμενα όρια αρμονικών εκπομπών. Επικεντρώνοντας κατ' αρχήν στην αύξηση της ακρίβειας του FFT σε μη στάσιμα σήματα, στη βιβλιογραφία συναντώνται πολυπληθείς εργασίες που ασχολούνται με την ανάπτυξη παραλλαγών ή επεκτάσεων του αλγορίθμου, [101], [104]-[106], [109], [111], [157], [164]. Οι αναφορές αυτές πέρα από τη μελέτη της επίδρασης των χρονικών παραθύρων για τον περιορισμό της φασματικής διαρροής, επιχειρούν να συμπληρώσουν τον κλασικό αλγόριθμο με ποικίλες τεχνικές, είτε στο στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων (π.χ. διασφάλιση σύγχρονης δειγματοληψίας με χρήση κατάλληλου hardware ή software) ή στο στάδιο υλοποίησης του FFT με την εφαρμογή προσαρμοσμένων φίλτρων και ρουτινών παρεμβολής και διόρθωσης σφάλματος. Ωστόσο, όλες οι παραλλαγές του FFT που περιλαμβάνονται στις παραπάνω αναφορές, απαιτούν πρόσθετους υπολογισμούς οι οποίοι, πέρα από την αναμφισβήτητη επιβάρυνση της μεθόδου σε χρόνο και υπολογιστική μνήμη, εισάγουν και πρόσθετες συνιστώσες αβεβαιότητας. Για τους λόγους αυτούς δεν έχουν τύχει ευρύτερης αποδοχής από την επιστημονική κοινότητα και κρίνεται ότι θα είχαν αμφίβολη αποτελεσματικότητα κατά την εφαρμογή τους στις Α/Γ.

Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η μεθοδολογία που έχει εισαχθεί την τελευταία δεκαετία από το πρότυπο IEC 61000-4-7 και αφορά τη συγκέντρωση του ενεργειακού περιεχομένου πολλών γειτονικών αρμονικών που προκύπτουν από τον κλασικό FFT σε μία κεντρική αρμονική (*grouping*), η οποία θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το πραγματικό φασματικό περιεχόμενο του εξεταζόμενου σήματος. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί αδιαμφισβήτητη την πλέον δημοφιλή προσέγγιση μέχρι στιγμής για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του FFT και έχει επικρατήσει και στο χώρο των Α/Γ, καθώς έχει ενσωματωθεί ως απαίτηση στη διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού των αρμονικών εκπομπών τους. Η λεπτομερής περιγραφή, μελέτη και εφαρμογή της μεθόδου στα σήματα Α/Γ αποτελεί ένα από τα κύρια αντικείμενα της παρούσας διατριβής και περιλαμβάνεται στα επόμενα Κεφάλαια.

Πίνακας 2.1. Σύνοψη χαρακτηριστικών Fast Fourier Transform

<i>Πλεονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Ευρέως διαδεδομένη και τεκμηριωμένη μέθοδος στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος με πλήρη γνώση και κατανόηση των απαιτήσεων και των περιορισμών της • Συμβατή με τα βασικά πρότυπα μετρήσεων ποιότητας ισχύος • Μικρός υπολογιστικός χρόνος
<i>Μειονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Αδυναμία παρακολούθησης χρονικά μεταβαλλόμενων αρμονικών συνιστωσών (είτε σε πλάτος ή σε συχνότητα) • Εξάρτηση αποτελέσματος από την προεπιλεγμένη διακριτότητα συχνότητας • Αδυναμία ορθού υπολογισμού συχνοτήτων μη συγχρονισμένων με τη θεμελιώδη συχνότητα του δικτύου
<i>Εφαρμογές στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Ευρεία εφαρμογή σε όλα τα πεδία έρευνας, μετρήσεων και ανάλυσης
<i>Ανεμογεννήτριες</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Εφαρμόζεται ήδη για τον υπολογισμό των αρμονικών των Α/Γ ως 9 kHz με χρήση τετραγωνικού παραθύρου σταθερού μήκους ίσου με 0.2 s, μη επικαλυπτόμενου και με χρήση της μεθοδολογίας ομαδοποίησης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-7 • Στα πλαίσια της τελευταίας έκδοσης του προτύπου IEC 61400-21, εισήχθηκε και για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος των Α/Γ, μέσω του υπολογισμού της θεμελιώδους συνιστώσας θετικής ακολουθίας τάσης και ρεύματος

2.3 Μετασχηματισμός Wavelets

Ο μετασχηματισμός Wavelets (WT) είναι ένα προηγμένο μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων, το οποίο χρησιμοποιεί ταλαντευόμενες κυματομορφές μικρής διάρκειας με μηδενική μέση τιμή και ταχεία απόσβεση στα δύο άκρα αντί για στάσιμες ημιτονοειδείς κυματομορφές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση Fourier. Έτσι, σε αντίθεση με τον FFT, ο οποίος

δίνει μία συνολική αναπαράσταση του σήματος, ο WT προσφέρει τοπική αναπαράσταση του εξεταζόμενου σήματος, ταυτόχρονα στα πεδία χρόνου και συχνότητας, συγκρίνοντας το με μία συνάρτηση αναφοράς, η οποία ονομάζεται «μητρική συνάρτηση Wavelet» (*mother wavelet*). Για τη μελέτη του θεωρητικού υπόβαθρου του WT υπάρχει μεγάλη ποικιλία αποκλειστικών συγγραμμάτων, [165]-[169]. Η εφαρμογή του WT στη μελέτη της ποιότητας ισχύος ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990, [169]-[175], με το κύριο ενδιαφέρον να εντοπίζεται στην ανίχνευση μεταβατικών διαταραχών (π.χ. στιγμιαίες βυθίσεις, ασυνέχειες, ρεύματα εκκίνησης κ.λπ.). Τα τελευταία χρόνια, μία σειρά δημοσιεύσεων επικεντρώνει την έρευνα στην ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης του πλάτους των αρμονικών συνιστωσών, [117], [141], [176]-[178]. Στόχος της παρούσας παραγράφου είναι η συνοπτική παρουσίαση του WT, με γνώμονα την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του σε σχέση με τον FFT και τη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής του στις Α/Γ.

Έστω $x(t)$ ένα πεπερασμένο σήμα ενέργειας, το οποίο ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \cdot dt < \infty \quad (2.19)$$

Το σήμα εισόδου $x(t)$ συγκρίνεται με μία συνάρτηση $\psi(t)$, η οποία λειτουργεί ως ζωνοπερατό φίλτρο, [170], και προκύπτει μία ομάδα συντελεστών που αντιπροσωπεύουν το βαθμό «ομοιότητας» μεταξύ των δύο σημάτων και ονομάζονται συντελεστές wavelet (*wavelet coefficients*). Οι συντελεστές wavelet του $x(t)$ εύρους a (*scale*) στη χρονική θέση b (*position*) ορίζονται ως:

$$C_{a,b} = \int_R x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.20)$$

όπου $\psi(t)$ είναι η μητρική συνάρτηση wavelet και ο αστερίσκος δηλώνει συζυγή μιγαδικό. Οι συνθήκες που πρέπει να πληροί η μητρική συνάρτηση είναι οι ακόλουθες:

- να είναι ταλαντευόμενη
- να αποσβένει ταχέως στο μηδέν (μπορεί να είναι μη μηδενική για σύντομη διάρκεια)
- να έχει μηδενική *dc* συνιστώσα (μηδενική μέση τιμή)

Οι τιμές των συντελεστών wavelet $C(a,b)$ αντιπροσωπεύουν την προβολή του σήματος $x(t)$ κατά μήκος της $\psi[(t-b)/a]$. Θεωρώντας ότι το κέντρο της συνάρτησης $\psi(t)$ είναι στο μηδέν και το πλάτος της είναι Δt στο πεδίο του χρόνου και $\Delta \omega$ στο πεδίο της συχνότητας, τότε η συνάρτηση $\psi[(t-b)/a]$ έχει κέντρο τη χρονική στιγμή b και πλάτος $a \cdot \Delta t$ στο πεδίο του χρόνου και $(1/a) \cdot \Delta \omega$ στο πεδίο της συχνότητας.

Η αντιστοιχία της κλίμακας (*scale*) της μητρικής συνάρτησης wavelets και της συχνότητας του εξεταζόμενου σήματος δεν προκύπτει άμεσα από τον WT και αυτό αποτελεί βασικό μειονέκτημά του σε σχέση με τον FFT. Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι μικρή τιμή της κλίμακας, που ισοδυναμεί με συμπίεση του wavelet, παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης ταχέως μεταβαλλόμενων τμημάτων του εξεταζόμενου σήματος και επομένως συνεισφέρει στην εκτίμηση των υψίσυχνων συνιστωσών. Αντίθετα, μεγάλη κλίμακα αντιστοιχεί σε διαστολή του wavelet, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο την παρακολούθηση αργών μεταβολών, δηλαδή χαμηλόσυχνων χαρακτηριστικών. Και στις δύο περιπτώσεις, δεν προκύπτει μονοσήμαντη σχέση μεταξύ κλίμακας και συχνότητας σήματος. Στην αναφορά [179] γίνεται λόγος για «ψευδοσυχνότητες», οι οποίες προκύπτουν με τον υπολογισμό της κεντρικής συχνότητας F_c της μητρικής συνάρτησης wavelet και συνδέονται με την κλίμακα a και την περίοδο δειγματοληψίας T σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot T} \quad (2.21)$$

όπου a είναι η κλίμακα του wavelet που χρησιμοποιήθηκε, T είναι η περίοδος δειγματοληψίας και F_a η «ψευδοσυχνότητα» (σε Hz) που αντιστοιχεί στην κλίμακα a . Η κεντρική συχνότητα F_c προκύπτει από την εφαρμογή του FFT στη συνάρτηση wavelet και τον υπολογισμό της συχνότητας με το μέγιστο πλάτος. Προφανώς, όταν η συνάρτηση wavelet διαστέλλεται ή συστέλλεται με τον παράγοντα a , η κεντρική συχνότητα F_c μεταβάλλεται ανάλογα.

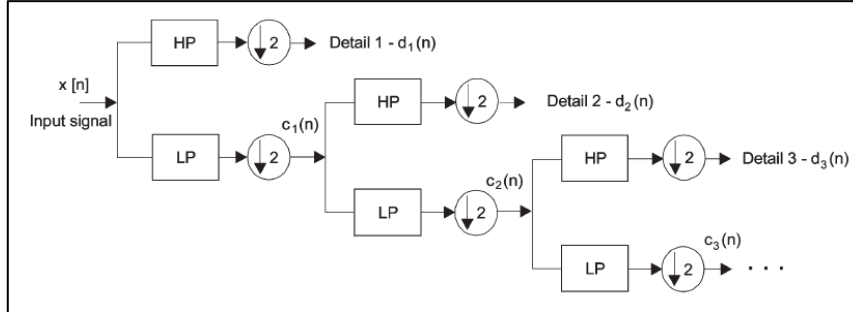
Η υλοποίηση του WT στον υπολογιστή πραγματοποιείται μέσω του διακριτού μετασχηματισμού wavelets (DWT), ο οποίος ορίζεται ως:

$$DWT(m,k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \sum_n x(n) \cdot g^* \left(\frac{k-b}{a} \right) \quad (2.22)$$

όπου k αντιστοιχεί σε ένα δείγμα του εξεταζόμενου σήματος, ενώ οι παράμετροι κλίμακας και μετατόπισης a και b είναι συναρτήσεις των ακέραιων παραμέτρων m και n , [141]:

$$a = a_0^m \quad \text{και} \quad b = n \cdot b_0 \cdot a_0^m \quad (2.23)$$

Πρακτικά, ο DWT υλοποιείται με τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης wavelet σε διαδοχικά στάδια (σαν φίλτρο πολλαπλών επιπέδων), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Εφαρμογή διακριτού μετασχηματισμού wavelets (DWT) τριών επιπέδων στο σήμα $x(n)$, [117].

Ένα σήμα $x(n)$ μπορεί να αναλυθεί πλήρως σε m επίπεδα, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον αριθμό N των σημείων του εξεταζόμενου σήματος σύμφωνα με τη σχέση, [180]:

$$N = 2^m \quad (2.24)$$

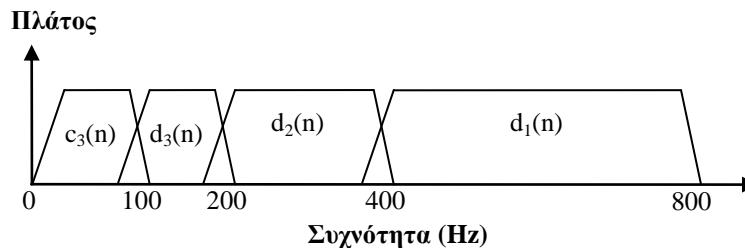
Στο πρώτο στάδιο, η εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένης συνάρτησης wavelet στο εξεταζόμενο σήμα $x(n)$ λειτουργεί, με την κατάλληλη κλίμακα, ως υπερπυκνωμένο φίλτρο απομονώνοντας με λεπτομέρεια την πρώτη υψηλής συχνοτήτων συνιστώσα $d_1(n)$. Η πληροφορία της χαμηλής συχνοτήτων συνιστώσας $c_1(n)$ παραμένει χονδροειδής με αποτέλεσμα να απαιτείται νέα εφαρμογή του DWT για την εξαγωγή της λεπτομερούς συνιστώσας $d_2(n)$ και της αντίστοιχης συνιστώσας χαμηλών συχνοτήτων αλλά μεγάλου εύρους $c_2(n)$. Η διαδικασία σταδιακής ανάλυσης του αρχικού σήματος σε συνιστώσες περιλαμβάνει και το διαδοχικό υποβιβασμό της δειγματοληψίας του σήματος (*downsampling*), με τη βοήθεια του οποίου επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός της κλίμακας της συνάρτησης wavelet. Συνεχίζοντας με ανάλογο τρόπο, το σήμα μπορεί να αναλυθεί σε m ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες για το κάθε επίπεδο ανάλυσης δίνονται από τη σχέση, [180]:

$$f = 2^i \cdot \left(\frac{f_s}{N} \right) \quad (2.25)$$

όπου f είναι το ανώτατο όριο συχνότητας για το επίπεδο i , f_s η συχνότητα δειγματοληψίας και N ο αριθμός των σημείων του εξεταζόμενου σήματος. Σε αντιστοιχία με τον FFT, η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να μετρηθεί με τον WT είναι η συχνότητα *Nyquist*:

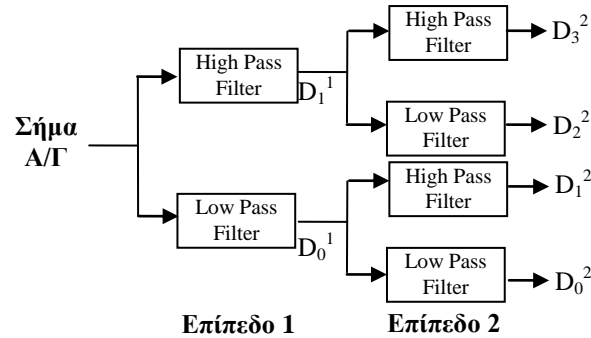
$$f_{\max} = \frac{f_s}{2} \quad (2.26)$$

Οι συνιστώσες που προκύπτουν από την εφαρμογή του DWT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της RMS τιμής της εξεταζόμενης κυματομορφής καθώς και των ζωνών συχνοτήτων. Δεν μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της RMS τιμής των επιμέρους αρμονικών συνιστωσών του σήματος λόγω του ότι οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων είναι ανομοιόμορφες και δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές συχνότητες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, όπου παρουσιάζονται τα στάδια ανάλυσης DWT για συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 1.6 kHz, οι ζώνες υψηλών συχνοτήτων καλύπτουν περισσότερες αρμονικές συνιστώσες σε σχέση με τις ζώνες χαμηλών συχνοτήτων.



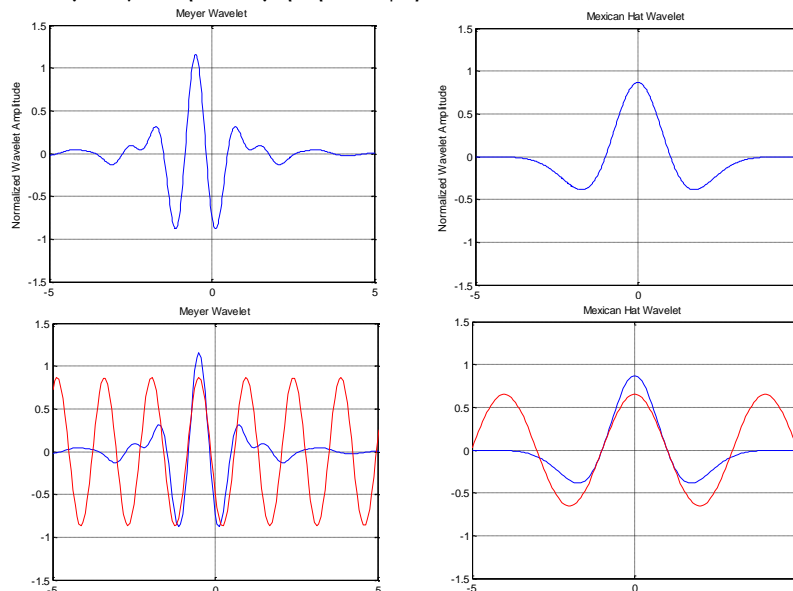
Σχήμα 2.8. Προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων από την εφαρμογή DWT τριών επιπέδων σε σήμα με συχνότητα δειγματοληψίας 1.6 kHz, [117].

Η αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών επιτυγχάνεται με τη χρήση του λεγόμενου Wavelet Packet Transform (WPT), με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να προκύψει ομοιόμορφη ανάλυση συχνότητας, όπως συμβαίνει με την ανάλυση Fourier [117], [141], [176], [181]-[182]. Με τη χρήση του WPT και οι δύο ομάδες συνιστωσών ($d_i(n)$ και $c_i(n)$) του Σχήματος 2.7, αναλύονται εκ νέου για τον υπολογισμό νέων συντελεστών, επιτρέποντας έτσι την ομοιόμορφη ανάλυση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας (Σχήμα 2.9). Με κατάλληλη προσαρμογή της συχνότητας δειγματοληψίας και του δέντρου ανάλυσης wavelets, οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων μπορούν να αντιστοιχηθούν με τις ζώνες συχνοτήτων των πραγματικών αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 2.9. Σχηματικό διάγραμμα του Wavelet Packet Transform για δέντρο 2 επιπέδων.

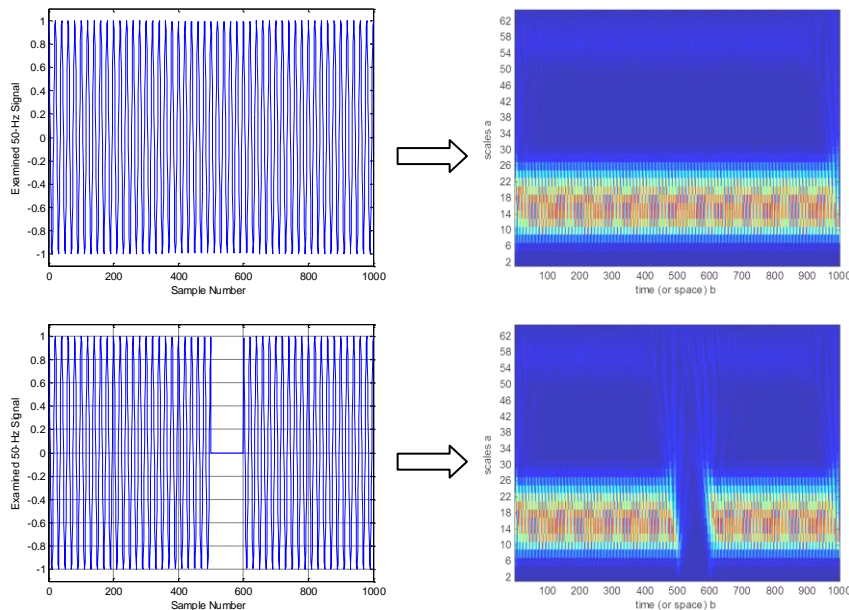
Η μητρική συνάρτηση wavelet αποτελεί παράγοντα κλειδί για την επιτυχή εφαρμογή του WT στην ανάλυση αρμονικών ή οποιασδήποτε διαταραχής της ποιότητας ισχύος, χωρίς ωστόσο να υπάρχει κάποια κοινά αποδεκτή πρακτική για την επιλογή της πιο κατάλληλης. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία διαπιστώνεται μεγάλη ποικιλία προτεινόμενων συναρτήσεων wavelets ανάλογα με την εφαρμογή. Ως γενικός κανόνας, συναρτήσεις με μεγάλο αριθμό συντελεστών παρουσιάζουν χαμηλότερη φασματική διαρροή και είναι πιο αποτελεσματικές στην ανάλυση αρμονικών, [141], [180]. Στην αναφορά [141] πραγματοποιείται μία συνολική διερεύνηση των μητρικών συναρτήσεων που προτείνονται στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος. Οικογένειες συναρτήσεων όπως οι Daubechies με μεγάλο αριθμό συντελεστών και η Meyer, χρησιμοποιούνται συχνότερα (Σχήμα 2.10). Αξιοσημείωτη είναι και η συνάρτηση Mexican Hat, η οποία έχει τύχει εφαρμογής στο πεδίο της ανίχνευσης ριπών ανέμου για την εκτίμηση των φορτίων των Α/Γ, [183].



Σχήμα 2.10. Μορφή μητρικών συναρτήσεων Meyer και Mexican wavelets και εφαρμογή τους στην ανάλυση απλών περιοδικών σημάτων.

Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του WT θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά ένα απλό ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 50 Hz, το οποίο εμφανίζει ασυνέχεια για 0.1 s, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11, της επόμενης σελίδας. Τα δεξιά σχήματα παρουσιάζουν τους συντελεστές Wavelets, όπως υπολογίστηκαν μέσω του WT με τη χρήση μητρικής συνάρτησης Daubechies 7 συντελεστών. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί σε κλίμακες της συνάρτησης

wavelet στις οποίες δεν υπάρχει καμία συσχέτιση με το εξεταζόμενο σήμα, ενώ με κόκκινο χρωματίζονται οι συντελεστές με τη μεγαλύτερη τιμή. Όπως είναι αναμενόμενο, ο WT του τυπικού ημιτονοειδούς σήματος δίνει μία ομοιόμορφη κατανομή των συντελεστών κατά μήκος της περιόδου καταγραφής. Αντίθετα, στην περίπτωση ασυνέχειας, ο WT εντοπίζει εύκολα το χρονικό διάστημα κατά το οποίο συμβαίνει η διαταραχή.



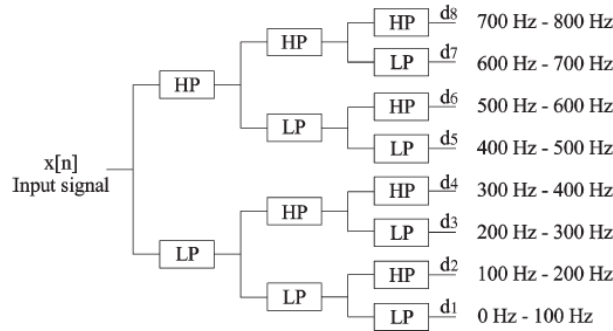
Σχήμα 2.11. Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος συχνότητας 50 Hz με χρήση μετασχηματισμού Wavelets σε τυπικό ημιτονοειδές σήμα και σε ημιτονοειδές σήμα με ασυνέχεια διάρκειας ίσης με 10% της συνολικής περιόδου της καταγραφής.

Το παράδειγμα αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα του WT στον εντοπισμό μεταβατικών διαταραχών στα σήματα ποιότητας ισχύος. Ωστόσο, η αντιστοίχιση των τιμών των συντελεστών wavelets με τις πραγματικές αρμονικές συνιστώσες του σήματος (τιμές συχνοτήτων και ενεργειακό περιεχόμενο αυτών) δεν είναι προφανής. Μία προσεγγιστική εκτίμηση της συχνότητας του εξεταζόμενου απλού σήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της εξίσωσης 2.21, επιλέγοντας την τιμή της κλίμακας a που δίνει τους υψηλότερους συντελεστές wavelets (με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 2.11).

Και πάλι όμως παραμένουν αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με την ακρίβεια στον υπολογισμό των συχνοτήτων σε πραγματικά σήματα με σύνθετο φασματικό περιεχόμενο καθώς και με το ζήτημα της ακριβούς εκτίμησης του πλάτους των αρμονικών συνιστωσών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα το χώρο των Α/Γ. Το γεγονός αυτό διαπιστώνεται και από την αναδρομή στη διαθέσιμη βιβλιογραφία των τελευταίων δύο δεκαετιών, όπου η πλειοψηφία σχεδόν των δημοσιεύσεων ασχολείται με την εφαρμογή του WT αποκλειστικά για την ανίχνευση διαταραχών στα ΣΗΕ, [170]-[174], [180]-[182], [184]-[195]. Παρόλα αυτά, λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την ακριβή εκτίμηση των αρμονικών κατά τα τελευταία χρόνια, έχουν αρχίσει να δημοσιεύονται εργασίες που επικεντρώνονται στη διερεύνηση των παραπάνω ερωτημάτων, [117], [141], [176]-[178], [196]-[199].

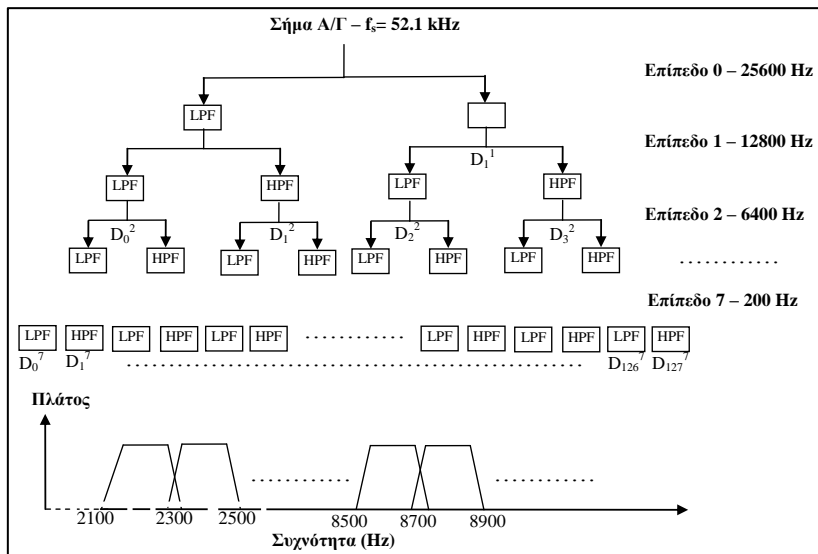
Στην αναφορά [117] προτείνεται αλγόριθμος βασισμένος στον WPT για τον υπολογισμό των αρμονικών. Επιλέγοντας συχνότητα δειγματοληψίας 1.6 kHz και χρησιμοποιώντας δέντρο τριών επιπέδων, το εύρος συχνοτήτων χωρίζεται σε οκτώ ομοιόμορφες ζώνες των 100 Hz, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Με αυτό τον τρόπο, οι περιττές αρμονικές βρίσκονται στο κέντρο κάθε ζώνης ώστε να αποφεύγονται τα άκρα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη φασματική διαρροή. Το χρονικό παράθυρο δεδομένων που χρησιμοποιείται είναι ίσο με 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας (0.2 s), σε εναρμόνιση με το πρότυπο IEC 61000-4-7. Με τη χρήση του δέντρου WPT είναι δυνατή η διερεύνηση της θεμελιώδους συνιστώσας και των περιττών αρμονικών από την 3^η έως τη 15^η τάξη (από τους συντελεστές κάθε επιπέδου από 1 έως 8). Η RMS τιμή κάθε αρμονικής συνιστώσας θεωρείται ακριβώς ίση με την RMS των συντελεστών wavelet κάθε επιπέδου. Οι συναρτήσεις wavelets που εξετάζονται είναι η Vaidyanathan 24 συντελεστών και οι Daubechies 20 συντελεστών. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι με κατάλληλη επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας, του αριθμού των

δειγμάτων και των επιπέδων του δέντρου WPT, είναι εφικτός ο υπολογισμός της θεμελιώδους συνιστώσας αλλά και των κύριων αρμονικών ενός σήματος, με ικανοποιητική ακρίβεια. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου εύρους των ζωνών συχνότητας, όταν το σήμα περιλαμβάνει πολλές κοντινές αρμονικές δεν είναι εφικτός ο ακριβής υπολογισμός τους.



Σχήμα 2.12. Ανάλυση σήματος με συχνότητα δειγματοληψίας 1600 Hz σε οκτώ ζώνες συχνοτήτων εύρους 100 Hz η καθεμιά, με χρήση Wavelet Packet Transform, [117].

Η παραπάνω αδυναμία σχολιάζεται στην αναφορά [199], όπου εναλλακτικά προτείνεται η χρήση του WT για την προ-επεξεργασία του σήματος και την ανάλυση του σε χαμηλόσυχνες και υψίσυχνες συνιστώσες και στη συνέχεια η εφαρμογή του FFT για την εκτίμηση των χαμηλών συχνοτήτων. Ο αλγόριθμος υπολογίζει μεν πολύ καλή ακρίβεια τις αρμονικές συνιστώσες έως την 11^η τάξη αλλά στις υψίσυχνες συνιστώσες εντοπίζει μόνο μεταβατικές διαταραχές του φάσματος. Το ερώτημα του υπολογισμού των ενδιάμεσων και των κοντινών αρμονικών δεν απαντάται, ενώ προφανές μειονέκτημα αποτελεί η αύξηση της πολυπλοκότητας και του τυπικού σφάλματος του αλγορίθμου, η οποία είναι δυσανάλογη του οφέλους από τη βελτίωση της ακρίβειας. Στην αναφορά [176] εφαρμόζεται ο WPT κατάλληλα προσαρμοσμένος για την εκτίμηση αμφοτέρων των περιπτώσεων και άρτιων αρμονικών με ικανοποιητική ακρίβεια. Παρόλα αυτά η μέθοδος βασίζεται σε συνθετικά σήματα που περιλαμβάνουν αποκλειστικά ακέραιες αρμονικές έως 15^η τάξης. Αξιοσημείωτη είναι η προσέγγιση της αναφοράς [200] για τον υπολογισμό ανώτερων αρμονικών έως 9 kHz με την εφαρμογή υβριδικής μεθόδου με χρήση wavelets και FFT για την ενσωμάτωση της σε αναλυτές ποιότητας ισχύος. Η μέθοδος περιλαμβάνει την απομόνωση της θεμελιώδους συνιστώσας του σήματος με χρήση ζωνοπερατού φίλτρου και τη μετέπειτα ανάλυση αρμονικών με δέντρο WPT οκτώ επιπέδων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μέθοδος είναι συμβατή με το πρότυπο IEC 61000-4-7 και παρέχει πολύ καλή ακρίβεια στο υπολογισμό των ανώτερων αρμονικών χωρίς να υστερεί σε υπολογιστικό χρόνο. Στην αντίθετη κατεύθυνση κινείται η αναφορά [198], όπου ο DWT εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της θεμελιώδους συχνότητας του συστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια αλλά με αρκετή επιβάρυνση σε χρόνο υπολογισμών.



Σχήμα 2.13. Ανάλυση σήματος με συχνότητα δειγματοληψίας 51.2 kHz σε 128 ζώνες συχνοτήτων εύρους 200 Hz η καθεμιά, με χρήση Wavelet Packet Transform, [117].

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση του μετασχηματισμού Wavelets, το πλέον αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του είναι ότι, με χρήση του WPT, οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων είναι συμβατές με τις αντίστοιχες ζώνες που ορίζονται στο IEC 61000-4-7 για τις ανώτερες αρμονικές 2 έως 9 kHz (βαθμίδες εύρους 200 Hz). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.13 αναπτύσσεται ο WPT προσαρμοσμένος στη συχνότητα δειγματοληψίας τυπικού σήματος ρεύματος Α/Γ για τον υπολογισμό των αρμονικών ($f_s = 51.2$ kHz). Επιλέγοντας δέντρο ανάλυσης 7 επιπέδων, οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων έχουν ομοιόμορφο εύρος 200 Hz.

Συνοψίζοντας, τα κυριότερα χαρακτηριστικά του μετασχηματισμού Wavelets παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Ειδικά όσον αφορά τη δυνατότητα εφαρμογής του στα σήματα Α/Γ, το ερώτημα που τίθεται και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης είναι το κατά πόσο ο WT μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια το πλάτος της κάθε αρμονικής συνιστώσας, ώστε να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση αρμονικών Α/Γ. Το ερώτημα αυτό απαντάται στο 5^ο Κεφάλαιο.

Πίνακας 2.2. Σύνοψη χαρακτηριστικών μετασχηματισμού Wavelets

<i>Πλεονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα ανάλυσης ταυτόχρονα στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. • Μεγάλη ευελιξία στον εντοπισμό μεταβατικών διαταραχών.
<i>Μειονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Δεν υπολογίζονται απευθείας μεμονωμένες αρμονικές αλλά ζώνες συχνοτήτων με περισσότερες αρμονικές συνιστώσες. • Η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια εξαρτώνται από την επιλογή της μητρικής συνάρτησης wavelet. • Οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων εμφανίζουν φασματική διαρροή στα άκρα. • Η ακριβής εκτίμηση των αρμονικών συνιστωσών απαιτεί πρόσθετα εργαλεία μετέπειτα επεξεργασίας των δεδομένων.
<i>Εφαρμογές στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Αυτόματη ανίχνευση μεταβατικών διαταραχών ρεύματος ή τάσης κάθε φύσεως. • Αναγνώριση ρευμάτων βραχυκύκλωσης και διαχωρισμός τους από ρεύματα εκκίνησης κινητήρων ή μετασχηματιστών για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων προστασίας. • Απομάκρυνση θορύβου από μετρούμενα σήματα.
<i>Δυνατότητα εφαρμογής στις ανεμογεννήτριες</i>
<p>Δεν προσφέρεται για τον ακριβή υπολογισμό αρμονικών σε σήματα τα οποία περιλαμβάνουν, εκτός των τυπικών αρμονικών περιττής τάξης, και πρόσθετες γειτονικές συχνοότητες (side-bands) μη ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, όπως συμβαίνει με τις Α/Γ. Παρόλα αυτά, με την ψηφιακή υλοποίηση του μέσω του Wavelet Packet Transform, είναι σε θέση να υπολογίσει με ακρίβεια τη διακύμανση του πλάτους της θεμελιώδους και των κύριων ακέραιων αρμονικών συνιστωσών χαμηλής τάξης, ενώ παράλληλα οι προκύπτουσες ζώνες συχνοτήτων είναι συμβατές με τις αντίστοιχες ζώνες που ορίζονται στο IEC 61000-4-7 για τις ανώτερες αρμονικές 2 έως 9 kHz (βαθμίδες εύρους 200 Hz). Επίσης φαίνεται ότι ο WT μπορεί να αποτελέσει εργαλείο ανάλυσης αρμονικών και πέρα από τα 9 kHz, όπου αναμένεται να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον των προτύπων ποιότητας ισχύος Α/Γ τα επόμενα χρόνια. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής του WT σε πραγματικά σήματα Α/Γ.</p>

2.4 Μετασχηματισμός Stockwell (S-Transform)

Ο μετασχηματισμός Stockwell, γνωστός ως S-Transform (ST), εισήχθη για πρώτη φορά το 1996 από τον Stockwell, [119], και έγινε αρκετά δημοφιλής στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος [120]-[122], [201]-[212], λόγω ορισμένων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με τον FFT και τον WT. Πρακτικά αποτελεί υποκατηγορία του WT με χρήση παραθύρου Gauss ως «μητρική συνάρτηση», με το πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού ταυτόχρονα του πλάτους και της συχνότητας των αρμονικών συνιστωσών του σήματος.

Θεωρώντας ένα χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα $x(t)$, ο μετασχηματισμός Fourier υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} \cdot dt \quad (2.27)$$

Πολλαπλασιάζοντας το σήμα $x(t)$ με μία παραθυρική συνάρτηση $w(t)$, το φάσμα του σήματος που προκύπτει δίνεται από τη σχέση:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot w(t) \cdot e^{-j2\pi f t} \cdot dt \quad (2.28)$$

Ο ST εξάγεται από τη σχέση 2.28, ορίζοντας κατάλληλα κανονικοποιημένη παραθυρική συνάρτηση Gauss ως εξής:

$$w(t) = \left(\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-t^2}{2 \cdot \sigma^2} \right)} \quad (2.29)$$

όπου
$$\sigma(f) = \frac{a}{|f|} \quad (2.30)$$

Η επιλογή της παραμέτρου a καθορίζει τη διακριτότητα συχνότητας του μετασχηματισμού. Σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη διακριτότητα συχνότητας, επιλέγεται μεγάλη τιμή του a , [186]. Πιο συγκεκριμένα εάν $a > 1$ τότε αυξάνεται η διακριτότητα στη συχνότητα, ενώ εάν $a < 1$ βελτιώνεται η χρονική ανάλυση, [213]. Αντικαθιστώντας τις 2.29 και 2.30 στην 2.28 και επιτρέποντας το παράθυρο Gauss να μετατοπίζεται στο χρόνο (*translation* τ) και να μεταβάλλει το πλάτος του (*dilation* σ), προκύπτει τελικά ο ST του σήματος $x(t)$:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot w(\tau - t, f) \cdot e^{-j2\pi f t} \cdot dt \quad (2.31)$$

Δεδομένου ότι η μήτρα $S(\tau, f)$ περιλαμβάνει μιγαδικά στοιχεία, μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$S(\tau, f) = A(\tau, f) \cdot e^{j\phi(\tau, f)} \quad (2.32)$$

όπου $A(\tau, f)$ είναι το πλάτος του S -φάσματος και $\phi(\tau, f)$ είναι η αντίστοιχη φάση.

Η μονοδιάστατη συνάρτηση της συχνότητας f_i ως παράμετρος του χρόνου τ καλείται «noise» και γράφεται ως:

$$S(\tau, f_i) = A(\tau, f_i) \cdot e^{j\phi(\tau, f_i)} \quad (2.33)$$

Από την εξίσωση 2.33 υπολογίζεται και η φάση του εξεταζόμενου σήματος από την οποία, σύμφωνα με τον Stockwell, [119], μπορεί να εκτιμηθεί η στιγμιαία διακύμανση της συχνότητας $F_{i,inst}$, ως επέκταση της στιγμιαίας συχνότητας σε ευρυζωνικά σήματα, [154]:

$$F_{i,inst}(\tau, f_i) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot \tau + \phi(\tau, f_i)\} \quad (2.34)$$

Αντίστροφος S -Transform

Από τη στιγμή που ο ST είναι μία τοπική αναπαράσταση του φάσματος, το φάσμα Fourier προκύπτει από τη μέση τιμή του συνόλου των τοπικών φασμάτων:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) \cdot d\tau \quad (2.35)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) \cdot d\tau \right\} \cdot e^{j2\pi f t} \cdot df \quad (2.36)$$

Διακριτός S -Transform

Η ψηφιακή υλοποίηση του ST πραγματοποιείται μέσω της διακριτής μορφής του. Το εξεταζόμενο σήμα $x(t)$ εκφράζεται σε διακριτή μορφή ως $x(kT_w)$, όπου $k = 0, 1, \dots, N-1$ τα ληφθέντα σημεία και T_w είναι η περίοδος δειγματοληψίας. Ο DFT του διακριτού σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$X \left[\frac{n}{NT_w} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} x(kT_w) \cdot e^{\frac{-j2\pi \cdot k \cdot n}{N}} \quad (2.37)$$

όπου $n=0, 1, \dots, N-1$.

Ο ST του διακριτού σήματος θα είναι:

$$S \left[l \cdot T, \frac{n}{NT} \right] = \sum_{m=0}^{N-1} X \left[\frac{m+n}{NT} \right] \cdot G(m, n) \cdot e^{\frac{j2\pi \cdot m \cdot l}{N}} \quad (2.38)$$

και

$$G(m, n) = e^{-2\pi^2 \cdot m^2 / n^2}, n \neq 0, \text{ όπου } l, m = 0, 1, \dots, N-1 \text{ και } n=1, 2, \dots, N-1 \quad (2.39)$$

Για $n = 0$ προκύπτει:

$$S[l \cdot T, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left[\frac{m}{NT}\right] \quad (2.40)$$

όπου $S[l \cdot T, 0]$ είναι σταθερά που εκφράζει τη μέση τιμή της χρονοσειράς στη μηδενική συχνότητα («noise»), εξασφαλίζοντας ότι η μέση τιμή του πλάτους του S-φάσματος ταυτίζεται με το φάσμα Fourier.

Το μέτρο και η φάση της μήτρας του ST, στη διακριτή τους μορφή, δίνονται από τις εξισώσεις 2.41 και 2.42:

$$\left| S\left[l \cdot T, \frac{n}{NT}\right] \right| = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left[\frac{m}{NT}\right] \quad (2.41)$$

και

$$\tan^{-1} \left\{ \frac{\operatorname{Im}\left(S\left[l \cdot T, \frac{n}{NT}\right]\right)}{\operatorname{Re}\left(S\left[l \cdot T, \frac{n}{NT}\right]\right)} \right\} \quad (2.42)$$

Το αποτέλεσμα του ST είναι μία μήτρα με μιγαδικά στοιχεία, όπου οι γραμμές αντιστοιχούν στις συχνότητες και οι στήλες στις τιμές της χρονικής μετατόπισης τ . Συνεπώς κάθε στήλη αναπαριστά το «τοπικό φάσμα» για το συγκεκριμένο σημείο στο χρόνο.

Σημειώνεται τέλος ότι, για την αποφυγή φαινομένου *aliasing*, η συχνότητα δειγματοληψίας θα πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με τη σχέση, [119]:

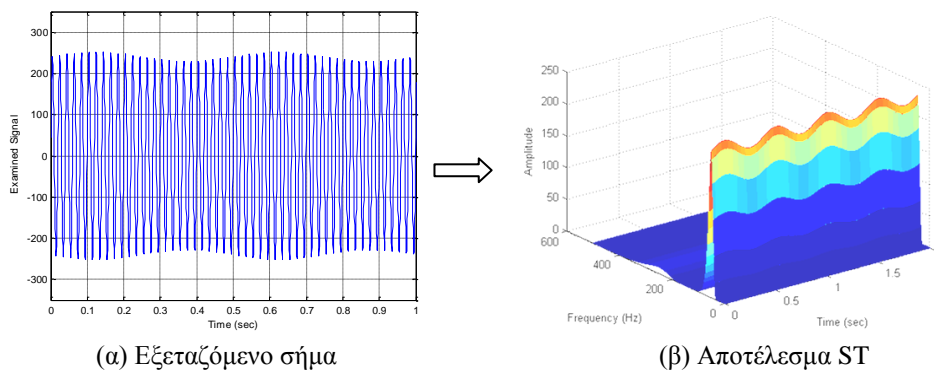
$$f_s \geq \frac{2 \cdot \pi}{\pi + 1} \cdot f_N \quad (2.43)$$

όπου f_N η συχνότητα *Nyquist* του μετασχηματισμού Fourier.

Στο Σχήμα 2.14 αναδεικνύεται η βασική ιδιότητα του ST να υπολογίζει τη χρονική μεταβολή μίας συγκεκριμένης συχνότητας. Η κυματομορφή που έχει επιλεγεί παρουσιάζει σημαντική διακύμανση flicker της τάξης του 5% του πλάτους της θεμελιώδους και συχνότητας 2 Hz, ενώ περιλαμβάνει και ακέραια αρμονική συνιστώσα 5^{ης} τάξης (250 Hz) το πλάτος της οποίας είναι περίπου 5% της θεμελιώδους:

$$x(t) = \overbrace{230 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)}^{\text{Θεμελιώδης συνιστώσα}} + \overbrace{\{230 \cdot 5\% \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)\}}^{\Delta U / U = 5\%} + \overbrace{230 \cdot 5\% \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t)}^{5\text{η αρμονική}} \quad (2.44)$$

Η χρήση του ST⁷ παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού και των δύο αρμονικών συνιστωσών του εξεταζόμενου σήματος (στα 50 Hz και 250 Hz) με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ ταυτόχρονα παρέχει πληροφορία για τη διακύμανση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας στο πεδίο του χρόνου, κάτι που δεν μπορεί να υπολογιστεί απευθείας με τον FFT.



Σχήμα 2.14. Ημιτονοειδής κυματομορφή θεμελιώδους συχνότητας 50 Hz που εμφανίζει ημιτονοειδή διακύμανση πλάτους $\Delta U/U = 5\%$ και συχνότητας $f = 2$ Hz. Στην κυματομορφή έχει υπερτεθεί και 5^η αρμονική (250 Hz) ίση με 5% της θεμελιώδους.

Στο Σχήμα 2.14 (β) απεικονίζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του ST με τη μορφή τρισδιάστατου πλέγματος για να αποτυπώσει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία: «Συχνότητα ως προς

⁷ Χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος S-Transform, όπως υλοποιείται από τον ίδιο τον Stockwell σε γλώσσα MATLAB, [119].

χρόνο», «Πλάτος ως προς χρόνο» και «Πλάτος ως προς συχνότητα». Για κάθε συνδυασμό σχεδιάζεται το αντίστοιχο περίγραμμα, αφού υπολογιστεί μαθηματικά ως εξής, [208]:

$$MFC(j) = \max_i (|S_{i,j}|) \quad (2.45)$$

$$MTC(i) = \max_j (|S_{i,j}|) \quad (2.46)$$

$$FTC(i) = f(|S_{i,j}|) \quad (2.47)$$

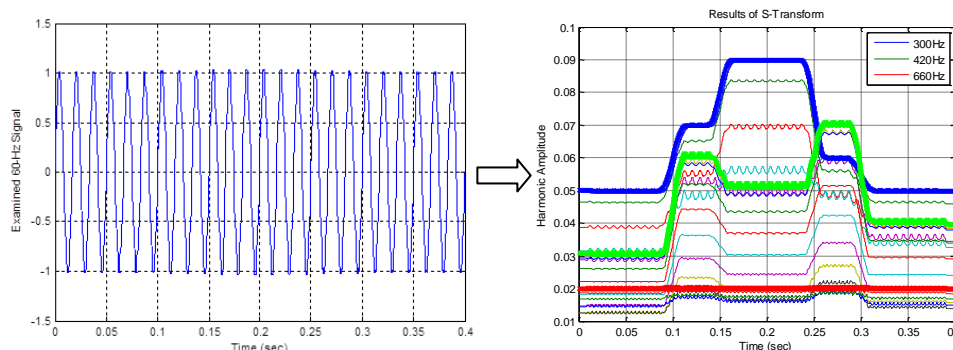
όπου MFC είναι τα αρχικά *Magnitude-Frequency Contours* και MTC: *Magnitude-Time Contours* όπως ορίζονται στην αναφορά [208]. Αντίστοιχα ο όρος FTC σημαίνει *Frequency-Time Contours* και αντιστοιχεί στο περίγραμμα ισομεγεθών συχνοτήτων ως προς το χρόνο, [214]. Η διακριτότητα της συχνότητας αποτελεί παράμετρο του ST και καθορίζεται από το χρήστη, επιλέγοντας κατάλληλη τιμή για το πλάτος σ του παραθύρου Gauss, όπως ορίζεται στην εξίσωση 2.30. Ουσιαστικά (σε αναλογία με τον FFT) προκύπτει ως συνάρτηση της παραμέτρου σ , της συχνότητας δειγματοληψίας και του μήκους της καταγραφής:

$$f_i = f(f_s, \sigma, k \cdot T_w) \quad (2.48)$$

Η ευελιξία του ST στον εντοπισμό και την παρακολούθηση της μεταβολής του πλάτους πολλαπλών αρμονικών αναδεικνύεται με την ανάλυση του σήματος που εικονίζεται στο Σχήμα 2.15 (α), το οποίο αποτελείται από τη βασική θεμελιώδη συνιστώσα συχνότητας 60 Hz και τρεις αρμονικές συνιστώσες 5^{ης}, 7^{ης} και 11^{ης} τάξης (300 Hz, 420 Hz και 660 Hz αντίστοιχα σε σύστημα 60 Hz), οι οποίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3. Διακύμανσης μέτρου 5 ^{ης} , 7 ^{ης} και 11 ^{ης} αρμονικής (σε α.μ.) σήματος με μοναδιαία θεμελιώδη συνιστώσα 60 Hz			
Time (s)	Μέτρο αρμονικής 300Hz	Μέτρο αρμονικής 420Hz	Μέτρο αρμονικής 660Hz
0.0 – 0.1	0.05	0.03	0.02
0.10005-0.15	0.07	0.06	
0.15005-0.25	0.09	0.05	
0.25005-0.3	0.06	0.07	
0.30005-0.4	0.05	0.04	

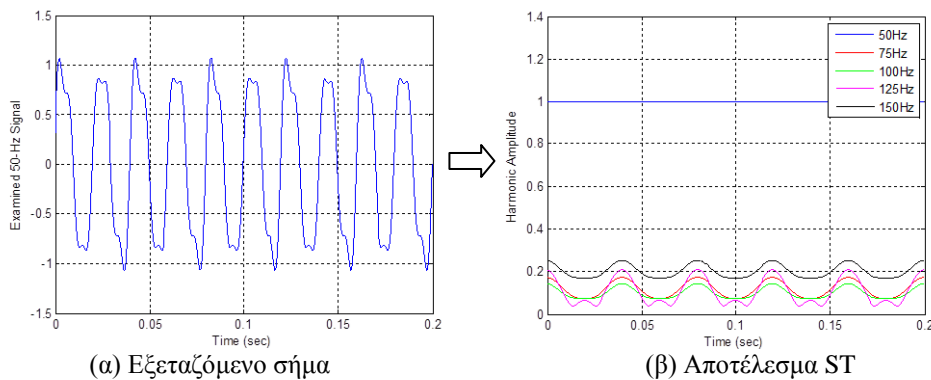
Το παράδειγμα περιλαμβάνεται στην αναφορά [108] και αναπαράχθηκε σκόπιμα για την αναγνώριση και σχολιασμό των ιδιοτήτων του ST, όπως αντιμετωπίζονται από τους συγγραφείς της. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του ST παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15 (β) και οδηγεί σε ορισμένες σημαντικές παρατηρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρά το γεγονός ότι ο ST ανιχνεύει με ικανοποιητική ακρίβεια τις διακυμάνσεις του πλάτους των πραγματικών αρμονικών, παρέχει μεγάλο αριθμό ψευδών συχνοτήτων που αντιστοιχούν σε κάθε βαθμίδα συχνότητας που προκύπτει από την επιλεχθείσα διακριτότητα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ($\Delta f = 20$ Hz). Ο διαχωρισμός των πραγματικών από τις ψευδείς συνιστώσες μπορεί να αποτελεί εύκολο πρόβλημα στην περίπτωση απλών συνθετικών σημάτων, όμως σε πραγματικά σήματα ποιότητας ισχύος καθιστά ιδιαίτερα αμφίβολη την αξιόπιστη εκτίμηση του αρμονικού περιεχομένου. Η δεύτερη παρατήρηση σχετίζεται με τις εμφανιζόμενες ταλαντώσεις γύρω από τη μέση τιμή, οι οποίες απαιτούν τη χρήση κατάλληλου φίλτρου για την εξάλειψή τους. Οι ταλαντώσεις αυτές εικονίζονται μόνο στις ψευδείς συνιστώσες του Σχήματος 2.15, γιατί στις πραγματικές έχει εφαρμοστεί φίλτρο κινούμενου μέσου όρου (*moving average*) συχνότητας 120 Hz.



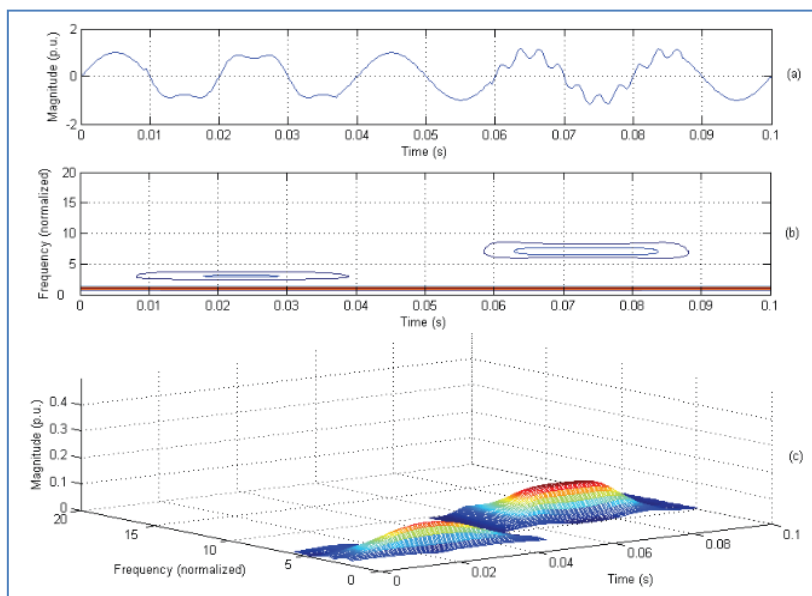
Σχήμα 2.15. Εφαρμογή του ST στο σήμα του Πίνακα 2.3.

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του ST στην ανάλυση διαφόρων τύπων σημάτων, θεωρούμε το σήμα του Σχήματος 2.16 (α), το οποίο εκτός από τη θεμελιώδη συνιστώσα των 50 Hz και τις ακέραιες αρμονικές 2^{ης} και 3^{ης} τάξης, περιλαμβάνει και ενδιάμεσες αρμονικές, γεγονός σύνηθες σε πραγματικά σήματα Α/Γ, χωρίς ωστόσο να θεωρηθεί χρονομεταβλητότητα. Η εφαρμογή του ST (Σχήμα 2.16 (β)) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σφάλμα στην εκτίμηση του πλάτους των αρμονικών αυξάνεται σημαντικά, όσο πιο κοντινές είναι οι συχνότητες που περιλαμβάνει το εξεταζόμενο σήμα. Μάλιστα, από το Σχήμα 2.16 (β) είναι σαφές ότι ενώ το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας εκτιμάται σωστά από τον ST, ο υπολογισμός του πλάτους των υπόλοιπων γειτονικών συχνοτήτων (75, 100, 125 και 150 Hz) παραπέμπει σε ψευδείς ταλαντώσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα κατά την ανάλυση πραγματικών σημάτων με άγνωστο φασματικό περιεχόμενο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση το πλάτος των εμφανιζόμενων ψευδών συχνοτήτων είναι αμελητέο.

$$y = 1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 0.05 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 75 \cdot t) + 0.1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot t) + 0.07 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 125 \cdot t) + 0.2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t)$$



Σχήμα 2.16. Εφαρμογή ST σε ημιτονοειδή κυματομορφή θεμελιώδους συχνότητας 50 Hz που περιλαμβάνει ακέραιες αρμονικές 2^{ης} και 3^{ης} τάξης και μη ακέραιες αρμονικές στα 75 Hz και στα 125 Hz.



Σχήμα 2.17. Εφαρμογή ST σε σήμα 50 Hz με 3^η και 7^η αρμονική συνιστώσα και παρουσίαση των περιγραμμάτων ισομεγεθών συχνοτήτων (Frequency-Time Contours) και τρισδιάστατου πλέγματος του πλάτους κάθε συχνότητας ως προς το χρόνο, [214].

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα τρία προηγούμενα παραδείγματα είναι ότι ο ST μπορεί να ανιχνεύσει ικανοποιητικά τις συχνότητες και το πλάτος μη στάσιμων σημάτων εφόσον έχει επιλεγεί κατάλληλη διακριτότητα συχνότητας (ώστε οι προκύπτουσες βαθμίδες συχνοτήτων να ταυτίζονται με τις πραγματικές συχνότητες) και έχουν χρησιμοποιηθεί κατάλληλα εργαλεία επεξεργασίας για τον εκ των προτέρων εντοπισμό των αναμενόμενων συχνοτήτων του σήματος (ενδεχομένως εφαρμογή του FFT). Το τελευταίο οδηγεί αναπόφευκτα και στην αύξηση του υπολογιστικού φόρτου σε σχέση με τον FFT. Επιπρόσθετα, δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει επιτυχώς

το πλάτος συχνοτήτων κοντινών μεταξύ τους (απόσταση μικρότερη της μίας οκτάβας) και επομένως δεν είναι κατάλληλος για όλους τους τύπους σημάτων. Παρόλα αυτά, η τοπική πληροφορία που παρέχει ο ST για το αρμονικό πλάτος σε κάθε χρονικό βήμα και κάθε βαθμίδα συχνότητας, παρέχει τη δυνατότητα εύκολου εντοπισμού όλων των τυπικών μεταβατικών διαταραχών που συμβαίνουν σε ένα ηλεκτρικό σύστημα⁸ και για το λόγο αυτό, το σύνολο σχεδόν της σχετικής βιβλιογραφίας ασχολείται την εφαρμογή του ST στο πεδίο της αναγνώρισης στιγμιαίων σφαλμάτων, [120]-[122], [205]-[215]. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης σήματος 50 Hz σε καταγραφή διάρκειας 0.1 s, το οποίο κατά τα πρώτα 50 ms περιλαμβάνει 3^η αρμονική συνιστώσα, ενώ στα υπόλοιπα 7^η αρμονική.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του S-Transform για την εφαρμογή σε σήματα ποιότητα ισχύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4. Σύνοψη χαρακτηριστικών S-Transform
<i>Πλεονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα ανίχνευσης διακύμανσης πλάτους αρμονικών • Δυνατότητα αυτόματου εντοπισμού μεταβατικών διαταραχών
<i>Μειονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Εμφάνιση ψευδών συχνοτήτων στη μήτρα αποτελεσμάτων • Εμφάνιση σημαντικών ταλαντώσεων του πλάτους γύρω από τη μέση τιμή • Αδυναμία διαχωρισμού κοντινών συχνοτήτων
<i>Εφαρμογές</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Αυτόματη ανίχνευση μεταβατικών διαταραχών σε σήματα ποιότητας ισχύος • Αναγνώριση ρεύματος σφάλματος μετασχηματιστή • Εκτίμηση flicker τάσης
<i>Ανεμογεννήτριες</i>
<p>Δεν ενδείκνυται για εφαρμογή στον υπολογισμό αρμονικών Α/Γ λόγω του σφάλματος στον υπολογισμό του πλάτους πολύ κοντινών αρμονικών αλλά και της αναγκαίας χρήσης επικουρικών εργαλείων για την εκ των προτέρων εκτίμηση του αρμονικού φάσματος, η οποία εισάγει πρόσθετο υπολογιστικό χρόνο για τη διαχείριση του, ούτως ή άλλως, μεγάλου όγκου δεδομένων μετρήσεων κατά τη μέτρηση αρμονικών Α/Γ. Υπό προϋποθέσεις, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση του flicker Α/Γ.</p>

2.5 Μέθοδος Hilbert-Huang

Η μέθοδος Hilbert–Huang (HHT) αποτελεί μία εναλλακτική προσέγγιση στη φασματική ανάλυση μεταβαλλόμενων σημάτων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα στιγμιαίας παρακολούθησης (tracking) της συχνότητας και του πλάτους, με την ίδια ακρίβεια ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Πρόκειται για μία τεχνική που ξεκίνησε από τον τομέα της γεωφυσικής και έτυχε ευρείας και επιτυχημένης εφαρμογής και σε τομείς όπως η βιοϊατρική και η επεξεργασία εικόνας, [142]. Τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι εφαρμογές της στο ευρύτερο πεδίο των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, σε τομείς όπως η ανάλυση δονήσεων, [185], [216], η διάγνωση βλαβών σε ηλεκτρικές μηχανές, [217], οι μελέτες υποσύγχρονου συντονισμού και ταλαντώσεων μεταξύ γειτονικών διασυνδεδεμένων ΣΗΕ (inter-area oscillations), [127], [131], αλλά και η ποιότητα ισχύος [124], [126], [218]-[220]. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης σήματος έχουν φέρει τη μέθοδο HHT στο προσκήνιο ακόμη και για τις Α/Γ, όπου η μέχρι στιγμής εφαρμογή της εντοπίζεται στο πεδίο της παρακολούθησης της λειτουργίας τους για τη διάγνωση σφαλμάτων (condition monitoring), [143]-[144].

Η HHT περιλαμβάνει δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ανάλυση του σήματος σε συνιστώσες μοναδικής συχνότητας εφαρμόζοντας τη μέθοδο *Empirical Mode Decomposition* (EMD). Σε κάθε συνιστώσα που προκύπτει, υπολογίζεται η διακύμανση του πλάτους της με το χρόνο, υλοποιώντας τον πολύ γνωστό μετασχηματισμό Hilbert (HT). Και ενώ ο HT αποτελεί γνωστό μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία σήματος και στις επικοινωνίες, η

⁸ Πλήρης κατηγοριοποίηση των μεταβατικών διαταραχών σε ένα ηλεκτρικό σύστημα παρέχεται από το πρότυπο IEEE 1159 [166].

μέθοδος EMD εισήχθη για πρώτη φορά από τον Norden Huang το 1998, [123], και αποτελεί μία καινοτόμο τεχνική, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

2.5.1 Empirical Mode Decomposition

Ο ακρογωνιαίος λίθος της HHT είναι η τεχνική EMD, η οποία διαχωρίζει ένα σήμα σε μία σειρά από συνιστώσες με διαμόρφωση πλάτους και συχνότητας, [123]. Η βασική αρχή της EMD είναι η έννοια της στιγμιαίας συχνότητας, που ορίζεται ως η παράγωγος της φάσης ενός σήματος. Εξ'ορισμού, όταν το σήμα αποτελείται από μία συχνότητα τότε έχει μία μοναδική, πλήρως ορισμένη και θετική στιγμιαία συχνότητα, που περιγράφεται από την παράγωγο της φασικής του γωνίας. Αντίθετα, σε ένα παραμορφωμένο σήμα που περιέχει ταυτόχρονα πολλαπλούς τρόπους ταλάντωσης, η στιγμιαία συχνότητα δεν έχει φυσικό νόημα. Για το λόγο αυτό, το εν λόγω σήμα πρέπει να αναλυθεί σε συνιστώσες μοναδικής συχνότητας, πριν την εφαρμογή του μετασχηματισμού Hilbert για τον υπολογισμό της συχνότητας. Ο ρόλος της EMD είναι η αναγνώριση των τρόπων ταλάντωσης που υπάρχουν σε χρονικές κλίμακες που καθορίζονται από το διάστημα μεταξύ διαδοχικών τοπικών ακρότατων. Τα τοπικά ακρότατα είναι όλα τα σημεία στα οποία η παράγωγος του σήματος είναι μηδενική και η δεύτερη παράγωγος μη μηδενική. Ο όρος «τοπικά» χρησιμοποιείται για να τα διαχωρίσει από το ολικό ακρότατο. Για παράδειγμα, μέσα σε ένα παράθυρο παρατήρησης μπορεί να υπάρχουν αρκετά τοπικά ακρότατα αλλά μόνο ένα ολικό μέγιστο και ελάχιστο. Μόλις εντοπιστούν τα τοπικά ακρότατα και καθοριστούν οι χρονικές κλίμακες, εξάγονται διαδοχικά από το σήμα οι λεγόμενες Intrinsic Mode Functions (IMFs), οι οποίες είναι συναρτήσεις με μηδενική μέση τιμή. Αναλυτικά, τα βήματα που περιλαμβάνει η μέθοδος EMD είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1. Εύρεση των τοπικών μέγιστων και ελάχιστων του παραμορφωμένου σήματος $s(t)$

Βήμα 2. Εφαρμογή παρεμβολής με συναρτήσεις splines μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων αντίστοιχα για την εύρεση των δύο συνιστωσών της περιβάλλουσας $e_M(t)$ και $e_m(t)$.

Βήμα 3. Υπολογισμός της μέσης τιμής της περιβάλλουσας:

$$m(t) = \frac{e_M(t) + e_m(t)}{2} \quad (2.49)$$

Βήμα 4. Εξαγωγή του σήματος: $c_1(t) = s(t) - m(t)$

Βήμα 5. Η συνάρτηση $c_1(t)$ θεωρείται IMF αν ο αριθμός των τοπικών ακρότατων αυτής είναι ίσος ή διαφέρει κατά ένα από τον αριθμό περασμάτων από το μηδέν (*zero crossings*) ΚΑΙ η μέση τιμή της προσεγγίζει το μηδέν. Εάν η $c_1(t)$ δεν είναι IMF, τότε επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 4 στην $c_1(t)$ αντί της $s(t)$, μέχρι η νέα $c_1(t)$ που θα προκύψει να ικανοποιεί τις παραπάνω συνθήκες.

Βήμα 6. Υπολογισμός του υπολοίπου: $r_1(t) = s(t) - c_1(t)$

Βήμα 7. Εάν το υπόλοιπο $r_1(t)$ είναι μεγαλύτερο από μία τιμή κατώφλι ή την ανοχή του σφάλματος, τότε επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 στην $r_1(t)$ μέχρι να εξαχθεί η νέα IMF και το νέο υπόλοιπο.

Στο Σχήμα 2.18 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της EMD με τα διαδοχικά βήματα υλοποίησης του αλγορίθμου στον υπολογιστή. Σημειώνεται ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλο κριτήριο ολοκλήρωσης των επαναλήψεων στο Βήμα 5 (κατώφλι e_m στο Σχήμα 2.18), ώστε να αποφευχθεί η υπερανάλυση της $c_1(t)$ με συνέπεια την απώλεια της βασικής πληροφορίας του σήματος, [221]. Η πρώτη IMF που υπολογίζεται περιλαμβάνει τη συνιστώσα υψηλότερης συχνότητας που περιέχει το εξεταζόμενο σήμα ενώ οι επόμενες περιέχουν συνιστώσες προοδευτικά χαμηλότερης συχνότητας. Εφόσον τελικά με τον παραπάνω επαναληπτικό τρόπο εξαχθούν n ορθογώνιες IMF, το αρχικό σήμα μπορεί να ανασυγκροτηθεί σύμφωνα με τη σχέση:

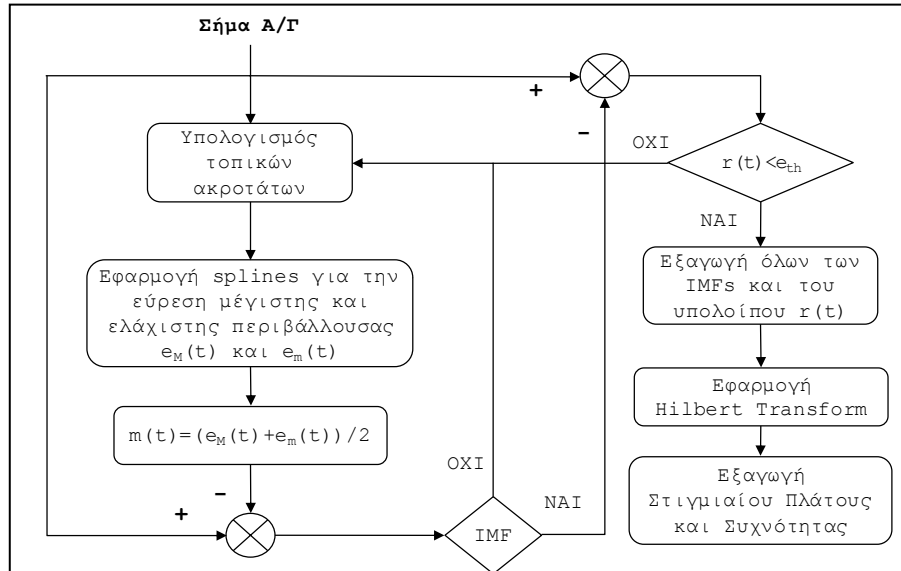
$$s(t) = \sum_n c_i(t) + r(t) \quad (2.50)$$

Το τελικό υπόλοιπο δεν εκφράζει κάποια συγκεκριμένη συχνότητα αλλά αντιστοιχεί σε ενδεχόμενα γενικά και μη-ημιτονοειδή μοτίβα που ακολουθεί το εξεταζόμενο σήμα.

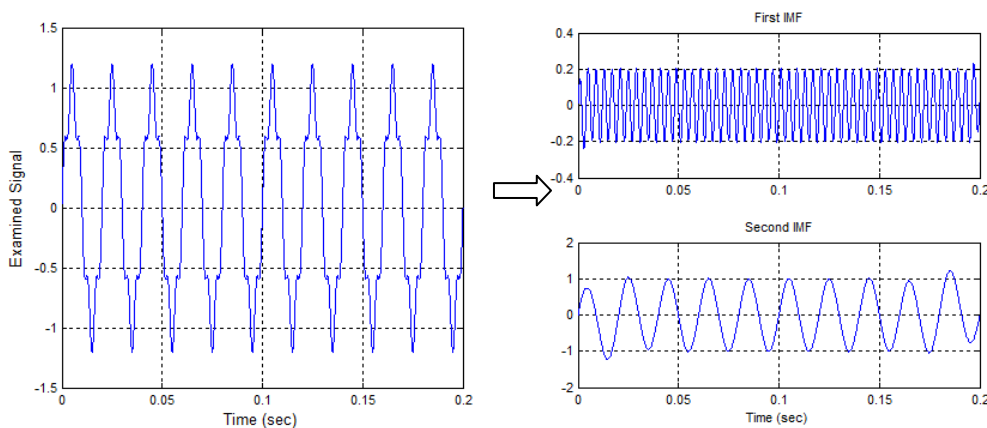
Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υλοποίησης της μεθόδου στο υποθετικό σήμα:

$$s(t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 0.2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t) \quad (2.51)$$

Από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτουν οι βασικές IMF καθεμιά από τις οποίες περιγράφει μονοσήμαντα τις συχνότητες που περιλαμβάνει το αρχικό σήμα. Το συγκεκριμένο απλό παράδειγμα δείχνει ότι η μέθοδος EMD είναι σε θέση να δώσει περισσότερη πληροφορία για τις συνιστώσες των εξεταζόμενων σημάτων σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους, όπως οι μετασχηματισμοί Fourier ή Wavelets. Αξιοσημείωτες είναι οι ταλαντώσεις που παρουσιάζουν οι IMF στην αρχή και το τέλος του χρονικού παραθύρου, οι οποίες θα εξηγηθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 2.18. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου EMD.



Σχήμα 2.19. Υλοποίηση της EMD σε συνθετικό σήμα.

2.5.2 Μετασχηματισμός Hilbert

Το επόμενο στάδιο εφαρμογής της HHT είναι η χρήση του μετασχηματισμού Hilbert (HT) για τη φασματική ανάλυση των επιμέρους IMF που έχουν προκύψει από τον αλγόριθμο EMD. Σε αντίθεση με το μετασχηματισμό Fourier, ο HT δεν είναι μετασχηματισμός μεταξύ των πεδίων χρόνου και συχνότητας. Πρακτικά αντιστοιχίζει το συμπληρωματικό μιγαδικό μέρος ενός σήματος στο δεδομένο πραγματικό μέρος και αντίστροφα, μετατοπίζοντας κάθε συνιστώσα του σήματος κατά ένα τέταρτο της περιόδου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να υπολογιστεί το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία συχνότητα ενός σήματος, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Ο HT ενός πραγματικού σήματος $s(t)$ δίνεται από τη σχέση, [127]:

$$s_H(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.52)$$

όπου P είναι η πρωτεύουσα τιμή Cauchy (Cauchy Principal Value) του ολοκληρώματος.

Από την εξίσωση 2.52 διαπιστώνεται ότι ο HT ορίζεται ως η συνέλιξη του σήματος $s(t)$ με το λόγο $1/t$ και επομένως παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού των τοπικών χαρακτηριστικών του $s(t)$.

Συνδυάζοντας $s(t)$ και $s_H(t)$ δημιουργείται το αναλυτικό σήμα $z(t)$:

$$z(t) = s(t) + j \cdot s_H(t) \quad (2.53)$$

Η εξίσωση 2.53 μπορεί να γραφεί σε εκθετική μορφή ως:

$$s(t) = A(t) \cdot e^{j \cdot \phi(t)} \quad (2.54)$$

όπου

$$A(t) = \sqrt{s(t)^2 + s_H(t)^2} \quad (2.55)$$

$$\phi(t) = \arctan \frac{s_H(t)}{s(t)} \quad (2.56)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $A(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος του σήματος και εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια του $s(t)$ μεταβάλλεται με το χρόνο και $\phi(t)$ είναι η στιγμιαία φάση του $s(t)$.

Η παράγωγος της 2.55 ως προς το χρόνο γράφεται:

$$s'(t) = A(t) \cdot e^{j \cdot \phi(t)} \cdot (j \cdot \omega(t)) + e^{j \cdot \phi(t)} \cdot A'(t) \quad (2.57)$$

όπου $\omega(t)$ είναι η στιγμιαία γωνιακή συχνότητα, η οποία ορίζεται ως η χρονική παράγωγος της στιγμιαίας γωνίας:

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \arctan \frac{s_H(t)}{s(t)} \quad (2.58)$$

Τελικά η στιγμιαία συχνότητα υπολογίζεται από τη στιγμιαία γωνιακή συχνότητα:

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} \quad (2.59)$$

και από τις σχέσεις 2.56 και 2.59 μπορεί να προκύψει απευθείας από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left(\frac{z'(t)}{z(t)} \right) = \frac{s(t)s_H'(t) - s_H(t)s'(t)}{2\pi(s^2(t) + s_H^2(t))} \quad (2.60)$$

Το πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο του μετασχηματισμού Hilbert παρουσιάζεται στην αναφορά [216].

Ο ΗΤ είναι ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο για τον υπολογισμό της στιγμιαίας διακύμανσης πλάτους και συχνότητας σημάτων που περιλαμβάνουν μία συνιστώσα (monocomponent). Ωστόσο, σε όλες τις εφαρμογές ποιότητας ισχύος τα εξεταζόμενα σήματα περιέχουν περισσότερες από μία στιγμιαίες συχνότητες και ο ΗΤ δεν είναι σε θέση να υπολογίσει το πραγματικό φασματικό περιεχόμενο τους. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει πρώτα το εξεταζόμενο σήμα να αναλυθεί σε περισσότερες συνιστώσες μοναδικής συχνότητας. Η συνδυασμένη χρήση EMD και ΗΤ, που συνιστά τη μέθοδο Hilbert-Huang, αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ανάλυσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε μη γραμμικά και μη στάσιμα σήματα με τους περιορισμούς που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.5.3 Εφαρμογή της μεθόδου Hilbert-Huang σε σήματα ποιότητας ισχύος

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου HHT στην ανάλυση μη στάσιμων σημάτων έχει οδηγήσει μεγάλη μερίδα ερευνητών στη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής της στην ποιότητας ισχύος στα ΣΗΕ. Τα συμπεράσματα ωστόσο είναι μάλλον αντιφατικά και χρήζουν ιδιαίτερου σχολιασμού. Οι σχετικές μελέτες δείχνουν ότι συχνά η «κλασική⁹» μέθοδος HHT υπολείπεται σε ακρίβεια όταν εφαρμόζεται σε σήματα ποιότητας ισχύος λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών τους, σε σχέση με άλλους τύπους σημάτων. Τα κύρια μειονεκτήματα της είναι η αδυναμία διαχωρισμού συχνοτήτων με απόσταση μικρότερη της οκτάβας ή με μεγάλες διαφορές στα πλάτη τους, [219], [222], [223]. Αναζητώντας τις αιτίες των αδυναμιών αυτών, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στη μελέτη της EMD, δεδομένου ότι η απόκριση του μετασχηματισμού Hilbert είναι γνωστή και προβλέψιμη με την προϋπόθεση ότι το αναλυόμενο σήμα περιλαμβάνει μία μοναδική συνιστώσα συχνότητας, [216], [224], [225].

Κύριο χαρακτηριστικό της EMD είναι ότι αποτελεί μία εμπειρική μέθοδο και δεν υπάρχει μέχρι στιγμής πλήρης θεωρητική τεκμηρίωση, παρά το γεγονός ότι υπήρξαν πολλές σχετικές προσπάθειες, ειδικά για την επεξήγηση των IMFs. Έχει αποδειχθεί ωστόσο ότι η EMD συμπεριφέρεται σαν ένα ψηφιακό φίλτρο που είναι σε θέση να αναλύει ένα σήμα λευκού θορύβου σε IMFs, των οποίων το

⁹ Χαρακτηρίζεται ως «κλασική» η μέθοδος Hilbert-Huang που έχει ήδη περιγραφεί για να διαχωριστεί από τις παραλλαγές που εφαρμόζονται για την αύξηση της ακρίβειας της μεθόδου και θα περιγραφούν στη συνέχεια

φάσμα έχει εύρος μίας οκτάβας, [226]. Σε αντίθεση με το μετασχηματισμό Wavelets όπου το προκύπτον φάσμα εξαρτάται και από την επιλογή της μητρικής συνάρτησης, κατά την εφαρμογή της EMD σε ένα πραγματικό σήμα, το εύρος συχνοτήτων κάθε IMF εξαρτάται αποκλειστικά από το φάσμα του σήματος. Έτσι, όταν δύο συχνότητες απέχουν μεταξύ τους λιγότερο της μίας οκτάβας, τότε θα περιλαμβάνονται πάντα στην ίδια IMF, ανεξάρτητα από την επιλεγθείσα δειγματοληψία και τον αριθμό των IMF που εξάγονται (*mode mixing*). Επιπρόσθετα, η EMD εμφανίζει και αβεβαιότητες αριθμητικού τύπου, οι οποίες εξαρτώνται από τον αλγόριθμο υλοποίησης, [221].

Τα βασικά μειονεκτήματα της EMD που διαπιστώνονται κατά την υλοποίηση της σε διάφορους τύπους σημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα, [125], [227]:

- Αδυναμία διαχωρισμού συχνοτήτων που απέχουν απόσταση μικρότερη της μίας οκτάβας. Το ποσοστό του σφάλματος δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται τόσο από την ακριβή απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων, όσο και από το λόγο των πλατών τους. Πλήρεις μελέτες της συμπεριφοράς της EMD ανάλογα με το φασματικό περιεχόμενο του εξεταζόμενου σήματος περιλαμβάνονται στις αναφορές [219], [222] και [223].
- Οι προκύπτουσες IMFs δεν είναι όλες πραγματικές αλλά μπορεί εμφανιστούν και ψευδείς εξαιτίας σφαλμάτων στην προσέγγιση της περιβάλλουσας του σήματος ή στην άστοχη επιλογή κριτηρίου τερματισμού του αλγορίθμου υπολογισμού των IMFs. Αυτό έχει ως συνέπεια την υπερανάλυση του σήματος και την εξαγωγή περισσοτέρων IMF από τον αριθμό των πραγματικών συχνοτήτων του σήματος, χωρίς να έχουν κάποιο φυσικό νόημα.
- Λόγω της αδυναμίας της ρουτίνας *splines* να αποφασίσει σωστά τα σημεία παρεμβολής στα άκρα του σήματος, παρατηρείται ταλάντωση της περιβάλλουσας στα δύο άκρα της χρονοσειράς, η οποία διαδίδεται κατά μήκος του σήματος κατά τον υπολογισμό των IMFs και έχει ως συνέπεια τη στρέβλωση του αποτελέσματος.

Δεδομένου ότι οι παραπάνω αδυναμίες υποβαθμίζουν την αξιοπιστία της μεθόδου στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος, αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης για μεγάλη μερίδα της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι βελτιώσεις που προτείνονται μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: (α) σε αυτές που αφορούν στις αριθμητικές αδυναμίες της EMD και (β) σε αυτές που πραγματεύονται το πρόβλημα της ανάμειξης συχνοτήτων.

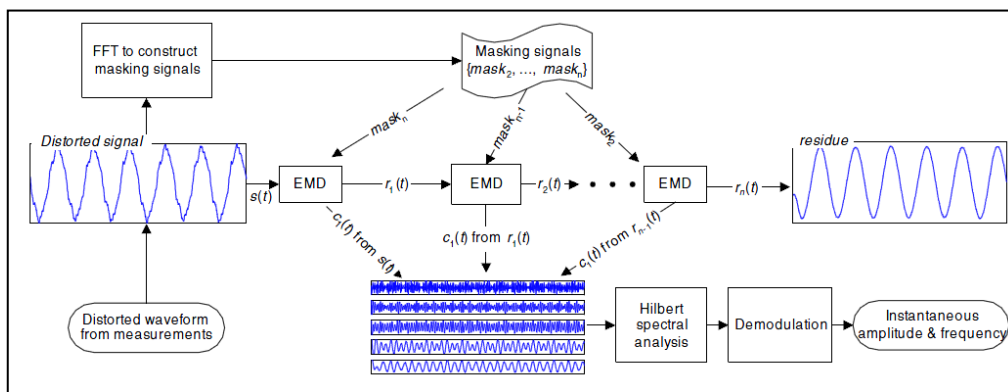
Ξεκινώντας από την πρώτη κατηγορία, στην αναφορά [126] προτείνεται η αντικατάσταση της ρουτίνας *splines* κατά την προσέγγιση της περιβάλλουσας του εξεταζόμενου σήματος με ρουτίνα ημιτονοειδούς παρεμβολής (*sinusoidal interpolation*), με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας στον υπολογισμό των IMF. Η εφαρμογή της εναλλακτικής τεχνικής φαίνεται να επιτυγχάνει καλύτερο αποτέλεσμα αντιμετωπίζοντας τις ασυνέχειες στα άκρα (*end-effect*) που αποτελεί αδυναμία της ρουτίνας *splines*. Αντίστοιχες προσπάθειες συναντώνται στις αναφορές [228] και [229]. Στην αναφορά [125] προτείνεται αλγόριθμος με βελτιώσεις σε όλα τα στάδια της EMD (εντοπισμός ακρότατων, ρουτίνα παρεμβολής, κριτήριο ολοκλήρωσης, απόρριψη μη αποδεκτών IMF), θεωρώντας ως βάση τον αλγόριθμο της αναφοράς [221]. Για την επιλογή κατάλληλου αλγορίθμου EMD στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δοκιμάστηκαν οι αλγόριθμοι των αναφορών [125] και [221] για τους οποίους υπήρχε διαθέσιμο υλικό *open-source* στο διαδίκτυο¹⁰ ενώ υλοποιήθηκε και ο αλγόριθμος της αναφοράς [126], χωρίς τελικά να διαπιστωθούν αξιοσημείωτες διαφορές καθώς το βασικό πρόβλημα της ανάμειξης συχνοτήτων αντιμετωπίστηκε μερικώς αλλά δεν επιλύθηκε πλήρως.

Προφανώς για τον επιτυχή διαχωρισμό κοντινών συχνοτήτων με τον ΗΗΤ δεν αρκούν μόνο αριθμητικές βελτιώσεις στη μέθοδο EMD, αλλά χρειάζονται και πρόσθετα εργαλεία επεξεργασίας, με τα οποία ασχολείται μία δεύτερη κατηγορία εργασιών. Από τις πολυάριθμες τεχνικές που προτείνονται στις αναφορές [230]-[236] καμία δεν τυγχάνει ευρύτερης αναγνώρισης. Αξιοσημείωτη είναι η αναφορά [220], όπου προτείνεται η χρήση των τριών πρώτων IMF, θεωρώντας ότι περιέχουν τις πιο σημαντικές συχνότητες του σήματος. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτή απευθύνεται περισσότερο στην ανάλυση μεταβατικών διαταραχών παρά στην αναλυτική εκτίμηση των αρμονικών ενός σήματος. Την πιο ουσιαστική συμβολή στην αποτελεσματική υλοποίηση της μεθόδου σε σήματα ποιότητας ισχύος προσφέρει η εισαγωγή της έννοιας του *masking signal*, [237]. Επιδιώκοντας την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανάμειξης συχνοτήτων, στο εξεταζόμενο σήμα υπερτίθεται ένα

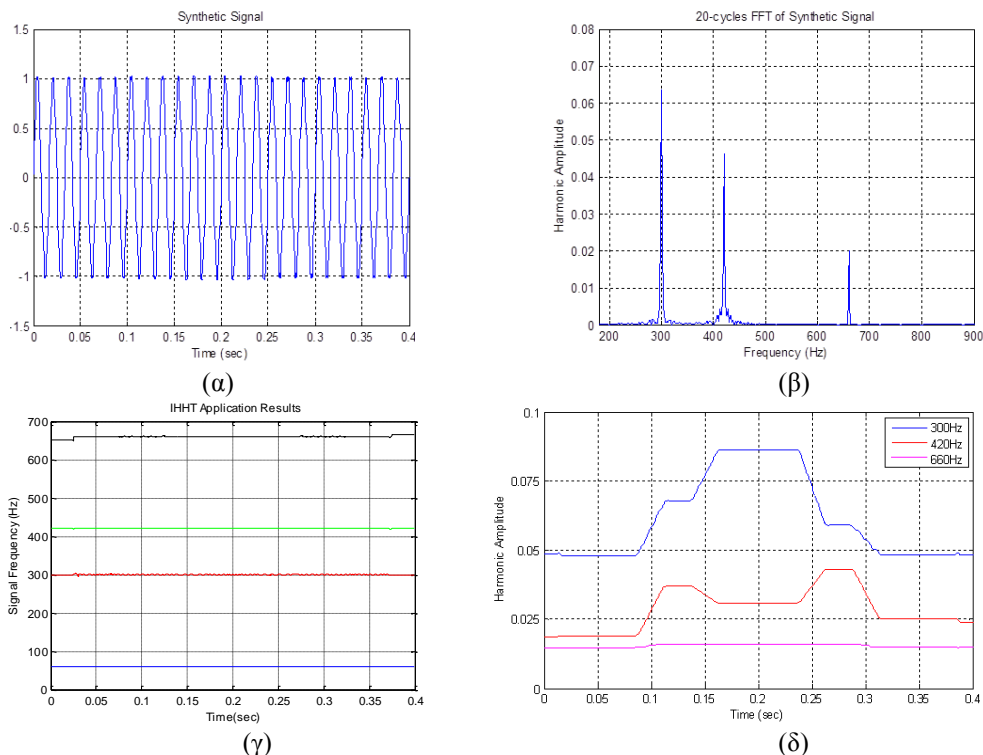
¹⁰ Διαθέσιμο on-line στη διεύθυνση <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html>

τεχνητό σήμα με συχνότητα μεγαλύτερη από τη μέγιστη πραγματική συχνότητα, έτσι ώστε το άθροισμα των δύο συχνοτήτων να απέχει περισσότερο της μίας οκτάβας από την αμέσως μικρότερη πραγματική συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η πρώτη IMF θα περιλαμβάνει μόνο τη μέγιστη πραγματική συχνότητα του σήματος, μαζί βέβαια με την τεχνητή συχνότητα, η οποία διαχωρίζεται στη συνέχεια με κατάλληλη μέθοδο επεξεργασίας.

Στο Σχήμα 2.20 εικονίζεται το συνολικό διάγραμμα ροής βελτιωμένου αλγορίθμου εφαρμογής της ΗΗΤ που ορίζεται στην [124] ως Improved Hilbert-Huang Transform (IHHT), ενώ αναλυτικά τα διαδοχικά στάδια περιγράφονται στον Πίνακα 2.5. Η αποδοτικότητα της ΙΗΗΤ επαληθεύεται με τη βοήθεια του συνθετικού σήματος του Πίνακα 2.3, το οποίο έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 2.4 με χρήση του S-Transform. Το σήμα προσομοιάζει μία τυπική κατάσταση στα ηλεκτρικά συστήματα με παρουσία 5^{ης}, 7^{ης} και 11^{ης} αρμονικής, οι οποίες παρουσιάζουν και χρονική μεταβολή. Ο λόγος που έχει θεωρηθεί σήμα με θεμελιώδη συχνότητα 60 Hz είναι γιατί χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της μεθόδου που προτείνεται στην αναφορά [124]. Τα αποτελέσματα της ΙΗΗΤ εικονίζονται σε μορφή γραφημάτων στο Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.20. Σχηματικό διάγραμμα ροής αλγορίθμου ΙΗΗΤ, [124].



Σχήμα 2.21. Αποτελέσματα εφαρμογής βελτιωμένης μεθόδου Hilbert-Huang (IHHT) στο συνθετικό σήμα του Πίνακα 2.3, που περιλαμβάνει σταθερή βασική συχνότητα 60 Hz και χρονικά μεταβαλλόμενες 5^η, 7^η και 11^η αρμονική. (α): Εξεταζόμενο συνθετικό σήμα, (β) Εξαγωγή ισοδύναμων στάσιμων συνιστωσών συχνότητας με χρήση του FFT, (γ) Υπολογιζόμενες συχνότητες και (δ) Υπολογιζόμενα πλάτη. Στα σχήματα (β) και (δ) σκοπίμως δεν απεικονίζονται η συχνότητα και το πλάτος της θεμελιώδους αντίστοιχα, για λόγους λεπτομέρειας παρουσίασης.

Πίνακας 2.5. Αλγόριθμος **IHTT** εφαρμογής της βελτιωμένης μεθόδου *Hilbert-Huang*, [124]

Βήμα 1: Εφαρμογή του FFT για την προκαταρκτική εκτίμηση των στάσιμων συνιστωσών f_1, f_2, \dots, f_n του σήματος, όπου $f_1 < f_2 < \dots < f_n$. Οι συχνότητες αυτές ενδέχεται να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

Βήμα 2: Σύνθεση των *masking signals*, $mask_2, mask_3, \dots, mask_n$, όπου $mask_k(t) = M_k \times \sin(2\pi(f_k + f_{k-1})t)$. Η τιμή του πλάτους M_k επιλέγεται εμπειρικά. Προτείνεται ωστόσο, ως αποδοτική, η τιμή $5.5 \times$ (Πλάτος της συνιστώσας f_k που προκύπτει από τον FFT spectrum).

Βήμα 3: Σύνθεση δύο τεχνητών σημάτων $s(t) + mask_n$ και $s(t) - mask_n$. Εφαρμογή της EMD και στα δύο σήματα για την εξαγωγή μόνο των πρώτων IMFs, IMF_+ και IMF_- . Υπολογισμός του σήματος $c_1(t) = (IMF_+ + IMF_-)/2$.

Βήμα 4: Εξαγωγή του υπολοίπου $r_1(t) = s(t) - c_1(t)$

Βήμα 5: Επανάληψη βημάτων 3-4 επαναληπτικά, χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα *masking signals* και αντικαθιστώντας το αρχικό σήμα $s(t)$ με το υπόλοιπο που προκύπτει κάθε φορά, μέχρι να εξαχθούν $n-1$ IMFs που περιέχουν τις συχνότητες f_2, f_3, \dots, f_n . Το τελικό υπόλοιπο $r_n(t)$ περιέχει την εναπομείνασα συνιστώσα f_1 .

Βήμα 6: Εφαρμογή του μετασχηματισμού Hilbert σε καθεμιά από τις εξαχθείσες IMF. Δεδομένου ότι κάθε IMF έχει προκύψει από τη χρήση του αντίστοιχου *masking signal*, περιλαμβάνει δύο συχνότητες με συνέπεια το αποτέλεσμα να παρουσιάζει διαμόρφωση πλάτους και συχνότητας. Ο διαχωρισμός τους επιτυγχάνεται μέσω της παρακάτω μεθοδολογίας.

Κάθε $IMF_k(t)$ και ο μετασχηματισμός Hilbert αυτής $IMFH_k(t)$ συνθέτουν το ακόλουθο αναλυτικό σήμα:

$$IMF_{A_k}(t) = IMF_k(t) + jIMFH_k(t) = A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t} = A(t) e^{j\varphi(t)} \quad (2.61)$$

όπου $A(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος και $\varphi(t)$ η στιγμιαία φάση. Από τη σχέση 2.61 το στιγμιαίο πλάτος θα είναι:

$$A(t) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]} \quad (2.62)$$

Όμως σε ένα σήμα με διαμόρφωση πλάτους θα ισχύει:

$$\min(A(t)) = |A_1 - A_2| \text{ και } \max(A(t)) = A_1 + A_2 \quad (2.63)$$

Εφαρμόζοντας αλγόριθμο παρεμβολής *cubic splines* ανάμεσα στα τοπικά ακρότατα υπολογίζονται οι περιβάλλουσες των μεγίστων G_{max} και των ελαχίστων G_{min} , από τις οποίες εκτιμώνται τα πλάτη A_1 και A_2 , σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$A_1 = \frac{(G_{max} + G_{min})}{2} \text{ και } A_2 = \frac{(G_{max} - G_{min})}{2} \quad (2.64)$$

Ομοίως για τον υπολογισμό των συχνοτήτων, από τη σχέση 2.61 προκύπτει:

$$\omega(t) = \text{Im} \left\{ \frac{IMF_{A_k}(t)}{IMF_{A_k}(t)} \right\} = \text{Im} \left\{ \frac{A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t}}{A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t}} \right\} \quad (2.65)$$

Στην ειδική περίπτωση διαμόρφωσης των δύο συχνοτήτων η στιγμιαία συχνότητα θα δίνεται από τη σχέση:

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{A_1(t)A_2(t)\cos[(\omega_1 - \omega_2)t] + A_2^2(t)}{A_1^2(t) + A_2^2(t) + 2A_1(t)A_2(t)\cos[(\omega_1 - \omega_2)t]} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \quad (2.66)$$

Εάν το τοπικό μέγιστο συμβαίνει τη χρονική στιγμή t_M , όταν $\cos[(\omega_1 - \omega_2)t] = 1$, η στιγμιαία συχνότητα θα είναι:

$$\omega(t_M) = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{1 + \frac{A_1}{A_2}} \quad (2.67)$$

Κατά τρόπο ανάλογο το τοπικό μέγιστο συμβαίνει όταν $\cos[(\omega_1 - \omega_2)t] = -1$, οπότε:

$$\omega(t_M) = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{1 - \frac{A_1}{A_2}} \quad (2.68)$$

Τελικά οι στιγμιαίες συχνότητες των IMF θα υπολογίζονται από την επίλυση των εξισώσεων 2.67 και 2.68, ενώ τα αντίστοιχα πλάτη από την εξίσωση 2.64.

Όπως επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 2.21, η μέθοδος IHTT λειτουργεί αποδοτικά κατά την ανάλυση σημάτων των οποίων το πλάτος της συχνότητας μεταβάλλεται με το χρόνο, σε περιπτώσεις που η κλασική HHT είναι αναποτελεσματική. Για περαιτέρω επαλήθευση, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής διερεύνηση της συμπεριφοράς της μεθόδου σε μεγάλο αριθμό συνθετικών σημάτων, τα οποία προσομοίαζαν χαρακτηριστικά τυπικών σημάτων ρεύματος Α/Γ. Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι η IHTT δεν παρουσιάζει την ίδια ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά ενδέχεται να δίνει εσφαλμένα αποτελέσματα υπό ορισμένες συνθήκες λόγω συχνοτήτων και πλατών των αρμονικών συνιστωσών.

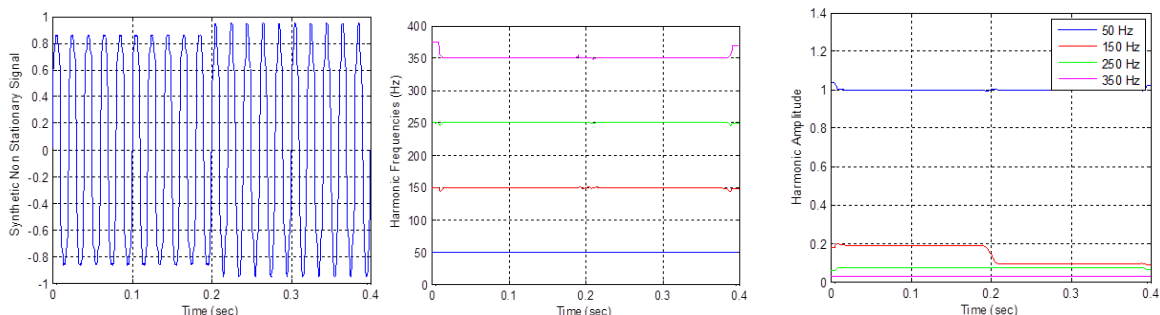
Εμβαθύνοντας περισσότερο στη μεθοδολογία και με αφορμή τη δημοσίευση νέων σχετικών εργασιών, [127], [131], διαπιστώνεται ότι υπάρχουν περαιτέρω περιθώρια βελτίωσης της εφαρμογής των *masking signals* αναγνωρίζοντας δύο ξεχωριστές περιπτώσεις:

- όταν το σήμα περιλαμβάνει συνιστώσες χαμηλής συχνότητας
- όταν το πλάτος της συνιστώσας με την υψηλότερη συχνότητα είναι πολύ μικρότερο από τα υπόλοιπα και ιδιαίτερα από αυτή που βρίσκεται ακριβώς δίπλα της στο φάσμα Fourier
- όταν οι συνιστώσες συχνότητας έχουν μεγάλα πλάτη αλλά είναι σχετικά κοντά η μία στην άλλη

Στα πλαίσια αυτά, προτείνεται εναλλακτικός αλγόριθμος που διαχειρίζεται ξεχωριστά το κάθε σήμα ανάλογα σε ποια κατηγορία ανήκει. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Refined Hilbert Huang Transform (RHHT) και χρησιμοποιείται εναλλακτικά στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα βασικά στάδια του αλγορίθμου RHHT, όπου οι διαφορές του με τον αλγόριθμο IHHT εντοπίζονται μόνο στον τρόπο διαχείρισης των IMF που προκύπτουν μετά την εφαρμογή των *masking signals* (Βήμα 3). Δεδομένου ότι η πλειοψηφία των σημάτων ποιότητας ισχύος υπάγεται σε μία από τις κατηγορίες του Σεναρίου 1 του Πίνακα 2.6, το πρόσθετο πλεονέκτημα της μεθόδου RHHT είναι η μεγαλύτερη ευκολία και ο μικρότερος υπολογιστικός χρόνος υλοποίησης σε σχέση με την IHHT.

Πίνακας 2.6. Αλγόριθμος RHHT εφαρμογής της βελτιωμένης μεθόδου Hilbert-Huang
<p>Βήμα 1: Εφαρμογή του FFT για την προκαταρκτική εκτίμηση των στάσιμων συνιστωσών f_1, f_2, \dots, f_n του σήματος, όπου $f_1 < f_2 < \dots < f_n$. Οι συχνότητες αυτές ενδέχεται να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.</p> <p>Βήμα 2: Σύνθεση των <i>masking signals</i>, $mask_2, mask_3, \dots, mask_n$, όπου $mask_k(t) = M_k \times \sin(2\pi(f_k + f_{k-1})t)$. Η τιμή του πλάτους M_k επιλέγεται εμπειρικά. Προτείνεται ωστόσο, ως αποδοτική, η τιμή $5.5 \times$ (Πλάτος της συνιστώσας f_k που προκύπτει από τον FFT spectrum).</p>
<p>Βήμα 3. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ανάλογα με τις φυσικές τιμές των υψίσυχνων συνιστωσών και των σχετικών πλατών τους.</p> <p>Σενάριο 1: Εάν ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες $\alpha. f_1 < 1$ και $M_1 < R_{21}M_2$; $\beta. f_1 > 1$ και $f_1 \leq R_{1f2}$; $\gamma. f_1 > 1$ και $R_{1f2} < f_1 < R_{2f2}$ και $M_1 < R_{22}M_2$; $\delta. f_1 > 1$ και $f_1 > R_{2f2}$ και $M_1 < R_{23}M_2$, όπου $R_{21}=1.1, R_1=1.5, R_2=2, R_{22}=2$ και $R_{23}=0.5$, τότε: - Χρησιμοποιείται μόνο το πρώτο <i>masking signal</i> για ολόκληρη τη διαδικασία $mask_1(t) = M_1 \times \sin(2\pi(f_1 + f_2)t)$ - Κατασκευάζονται δύο σήματα $x^+(t) = x(t) + mask_1(t)$ και $x^-(t) = x(t) - mask_1(t)$. Εφαρμόζεται η EMD σε κάθε σήμα και λαμβάνονται όλες οι αντίστοιχες IMF $c_i^+(t)$ και $c_i^-(t), i=1, 2, \dots, n$ καθώς και τα υπόλοιπα $r_n^+(t)$ και $r_n^-(t)$ - Οι IMF και το υπόλοιπο του εξεταζόμενου σήματος θα είναι τελικά: $c_i(t) = \frac{c_i^+(t) + c_i^-(t)}{2} \text{ και } r_n(t) = \frac{r_n^+(t) + r_n^-(t)}{2}, i=1, 2, \dots, n$ Οι συναρτήσεις αυτές είναι μοναδικής συχνότητας και μπορεί να εφαρμοστεί με αποτελεσματικότητα ο μετασχηματισμός Hilbert για την εύρεση του πλάτους και της συχνότητας των φασματικών συνιστωσών</p> <p>Σενάριο 2: Εάν δεν ισχύουν οι συνθήκες του Σεναρίου 1 τότε χρησιμοποιούνται όλα τα <i>masking signals</i> που πρόέκυψαν από το Βήμα 2 και ακολουθείται η μεθοδολογία του αλγορίθμου IHHT</p>

Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, ο RHHT εφαρμόστηκε με επιτυχία σε μία σειρά συνθετικών σημάτων, ενδεικτικό παράδειγμα των οποίων εικονίζεται στο Σχήμα 2.22, όπου παρουσιάζεται η ανάλυση ενός σήματος με θεμελιώδη συνιστώσα 50 Hz και αρμονικές 3^{ης}, 5^{ης} και 7^{ης} τάξης, από τις οποίες η 3^η αρμονική εμφανίζει μία βηματική μείωση κατά 50% τη χρονική στιγμή t=0.2 s. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, ο υπολογισμός των αρμονικών συνιστωσών είναι ικανοποιητικός ενώ η μέθοδος επιτυγχάνει με ευκολία να εντοπίσει τη βηματική μεταβολή του πλάτους της 3^{ης} αρμονικής.



Σχήμα 2.22. Εφαρμογή μεθόδου RHHT σε συνθετικό σήμα 50 Hz που περιλαμβάνει 3^η, 5^η και 7^η αρμονική.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος Hilbert-Huang και ειδικότερα οι βελτιωμένες εκδόσεις της IHHT και RHHT, οι οποίες είναι προσαρμοσμένες στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος, παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του FFT στην εκτίμηση αρμονικών που μεταβάλλονται με το χρόνο. Από την άλλη πλευρά, πρέπει σημειωθεί ότι κατόπιν εξαντλητικής διερεύνησης των

δυνατοτήτων της μεθόδου, διαπιστώθηκε ότι περιπτώσεις σημάτων με μεγάλο αριθμό γειτονικών συχνοτήτων συγκρίσιμου πλάτους δεν αντιμετωπίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια. Ωστόσο, η δυναμική της μεθόδου στην ανάλυση χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων την καθιστά ελκυστική για περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής στο πεδίο των Α/Γ, η οποία περιλαμβάνεται στο 5^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Συνοπτικά, τα χαρακτηριστικά της μεθόδου Hilbert-Huang παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7. Σύνοψη χαρακτηριστικών μεθόδου Hilbert-Huang

Πλεονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα ανίχνευσης διακύμανσης πλάτους και συχνότητας αρμονικών συνιστωσών χωρίς προαπαιτούμενες παραμέτρους υλοποίησης • Ικανοποιητικός υπολογιστικός χρόνος • Υπό προϋποθέσεις, μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού
Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> • Αδυναμία διαχωρισμού κοντινών συχνοτήτων (<i>mode mixing</i>) • Διαφοροποίηση αποτελεσμάτων ανάλογα με τον αλγόριθμο EMD • Απαιτήση χρήσης πρόσθετων εργαλείων για την απαλοιφή ανεπιθύμητων ταλαντώσεων στις υπολογιζόμενες συχνότητες
Εφαρμογές στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> • Ανάλυση δονήσεων και διάγνωση σφαλμάτων ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού • Μελέτη υποσύγχρονων ταλαντώσεων σε διασυνδεδεμένα συστήματα • Κατά περίπτωση εφαρμογές στην εκτίμηση χρονικά μεταβαλλόμενων
Ανεμογεννήτριες
<p>Παρά την μεγάλη δυναμική της μεθόδου στην ανάλυση διαφόρων τύπων σημάτων στα ΣΗΕ και την εφαρμογή της, σε ερευνητικό στάδιο, ακόμη και στις Α/Γ, η δυσκολία στο διαχωρισμό κοντινών συχνοτήτων και η απαίτηση πρόσθετης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, καθιστούν εξαιρετικά αμφίβολη την αποτελεσματικότητα της στη φασματική ανάλυση των Α/Γ, στις οποίες η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών αρμονικών είναι πολύ μικρότερη της μίας οκτάβας. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος παρουσιάζει μεγάλο πλεονέκτημα έναντι του FFT στην παρακολούθηση των μεταβολών των αρμονικών (σε πλάτος και συχνότητα). Το πλεονέκτημα αυτό αναδεικνύεται στο 5^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου στο υπολογισμό των διακυμάνσεων της θεμελιώδους συχνότητας αλλά και των κύριων αρμονικών χαμηλής τάξης.</p>

2.6 Παραμετρικές μέθοδοι

3.5.1 Εισαγωγή στις παραμετρικές μεθόδους

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν μέχρι το σημείο αυτό, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως μη-παραμετρικές, όρος που χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι η εφαρμογή τους απαιτεί περιορισμένη ή καθόλου εκ των προτέρων γνώση του εξεταζόμενου σήματος. Τα μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών (φασματική διαρροή, αδυναμία διαχωρισμού κοντινών συχνοτήτων, διακριτότητα συχνότητας κ.λπ.), σε συνδυασμό με την αύξηση στην ταχύτητα των υπολογιστών και τη χρήση εξελιγμένων προγραμματιστικών πακέτων, έδωσαν μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη των λεγόμενων «παραμετρικών» μεθόδων. Πρόκειται για μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα για την αναπαράσταση του σήματος με βάση τα οποία εξάγεται το αρμονικό του περιεχόμενο. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν την, ως ένα βαθμό, πρότερη γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος που εξετάζεται, προσφέρουν όμως αρκετά πλεονεκτήματα που τις καθιστούν ανταγωνιστικές των «κλασικών» μεθόδων και ελκυστικές για την ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος, όπως:

- τα χρονικά παράθυρα της ανάλυσης μπορούν να έχουν μεταβλητό μήκος, εξασφαλίζοντας την καλύτερη δυνατή προσαρμογή στα χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα
- το μήκος του χρονικού παραθύρου δεν περιορίζει τη διακριτότητα της συχνότητας
- δεν υποφέρουν από το φαινόμενο της φασματικής διαρροής

Η εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων ξεκίνησε από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ενώ η χρήση τους στην ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος γίνεται ολοένα και συχνότερη τα τελευταία χρόνια. Η πιο πλήρης και πρόσφατη ανασκόπηση των παραμετρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αρμονικών στα ΣΗΕ περιλαμβάνεται στην αναφορά [113]. Ανάμεσα στις πιο δημοφιλείς μεθόδους συγκαταλέγονται οι μέθοδοι Prony, ARMA, MUSIC, ESPRIT, Φίλτρων Kalman (KF) και Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Network - ANN). Στις επόμενες παραγράφους επιχειρείται σύντομη περιγραφή των μεθόδων αυτών με κύριο γνώμονα όχι τόσο τη λεπτομερή ανάπτυξη του θεωρητικού τους υπόβαθρου όσο τη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τους σε πραγματικά σήματα Α/Γ.

3.5.2 Η μέθοδος Prony

Από τις παραμετρικές μεθόδους που εξετάζονται στη βιβλιογραφία για την ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος, η μέθοδος Prony συγκεντρώνει τις περισσότερες αναφορές και θετικές αξιολογήσεις, [115], [128], [130], [131], [142], [238]-[243]. Η ανάλυση Prony δεν αποτελεί νέα τεχνική, αφού το θεωρητικό της υπόβαθρο τεκμηριώθηκε το 1795 από τον Gaspard Riche de Prony. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου υλοποίησης, η πρώτη εφαρμογή της στα ΣΗΕ εντοπίζεται το 1991 από τον Hauer, [128]. Τα επόμενα χρόνια, η βελτίωση της μεθόδου απασχόλησε αρκετούς ερευνητές στα πεδία των μαθηματικών και επεξεργασίας σήματος, [238]-[239], όμως η πρώτη ουσιαστική αναφορά στην ανάλυση ποιότητας ισχύος και αρμονικών έγινε από τον Meunier το 1998, [115]. Τα τελευταία χρόνια, δεδομένης της αύξησης της ταχύτητας των επεξεργασιών αλλά και της ευρείας χρήσης ολοκληρωμένων προγραμματιστικών εργαλείων έχει εμφανιστεί σημαντικό ενδιαφέρον για τη χρήση της μεθόδου στην εκτίμηση ακέραιων και ενδιάμεσων αρμονικών στα ΣΗΕ, [130], [131], [142], [240]-[245]. Αξιοσημείωτη αναφορά στη δυναμική της μεθόδου Prony, ως βασικού εργαλείου για την ανάλυση χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων, επιτυγχάνεται από τον Ribeiro, [142], ο οποίος αφιερώνει ιδιαίτερο κεφάλαιο για την περιγραφή της μεθόδου και της επιλογής παραμέτρων υλοποίησης. Αντίστοιχη συμβολή παρέχεται και από τον Messina, [131], όπου παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της Prony και της HHT για την ανάλυση ταλαντώσεων σε γειτονικά διασυνδεδεμένα συστήματα (inter-area oscillations).

Εκτός από τις δημοσιεύσεις που επικεντρώνονται στην Prony, υπάρχει και αξιόλογος αριθμός αναφορών, στις οποίες η μέθοδος προτείνεται είτε ως εναλλακτική μέθοδος μεγάλης ακρίβειας για τον υπολογισμό αρμονικών, [111], [129] ή ως μέρος υβριδικών αλγορίθμων με χρήση περισσότερων της μιας μεθόδων, [224]. Ειδικότερα για τις Α/Γ, αξιοσημείωτες είναι οι αναφορές [116], [146], [246] και [247], όπου περιγράφονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της Prony στον υπολογισμό αρμονικών και στον εντοπισμό διαταραχών σε δίκτυα με Α/Γ (σταθερών στροφών και ΑΓΔΤ). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά [116], στην οποία συγκρίνονται ο μετασχηματισμός Wavelets και η Prony. Όλες οι εφαρμογές βασίζονται σε αποτελέσματα προσομοίωσης των Α/Γ και του ηλεκτρικού συστήματος. Τέλος, ουσιαστική συμβολή στη χρήση της Prony στην ανάλυση αρμονικών, παρέχει η αναφορά [129], στην οποία επιχειρείται η εκτίμηση ενδιάμεσων αρμονικών (σε σύγκριση με τις MUSIC και ESPRIT), οι οποίες προέρχονται είτε από κατάλληλα επιλεγμένα συνθετικά σήματα, ή από πραγματικές μετρήσεις σε κοινά φορτία. Στην αναφορά πραγματοποιείται σύνδεση των προηγμένων τεχνικών με τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης (grouping) του προτύπου IEC 61000-4-7. Το συμπέρασμα είναι ότι η Prony (και εναλλακτικά η ESPRIT) μπορεί να υποκαταστήσει με επιτυχία τον FFT, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα της απουσίας φασματικής διαρροής και δυνατότητας διαχωρισμού πολύ κοντινών αρμονικών που θα ήταν αδύνατον να εντοπιστούν από τον FFT λόγω ανεπαρκούς διακριτότητας στη συχνότητα.

Συνοψίζοντας, από την αξιολόγηση του περιεχομένου και των συμπερασμάτων του συνόλου της σχετικής βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η διαθέσιμη πληροφορία και τεκμηρίωση της μεθόδου Prony αλλά και οι προοπτικές της στο χώρο των μετρήσεων και της επεξεργασίας σήματος αποτελούν σημαντικούς λόγους για την περαιτέρω μελέτη της στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και την εφαρμογή της σε πραγματικά σήματα μετρήσεων Α/Γ. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου εξηγείται στη συνέχεια.

Θεωρούμε N δείγματα $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]$, ενός σήματος $x(t)$ που έχουν μετρηθεί με ομοιόμορφη δειγματοληψία συχνότητας f_s . Η μέθοδος Prony προσεγγίζει το σήμα προσαρμόζοντας σε αυτό ένα γραμμικό συνδυασμό P εκθετικών όρων σύμφωνα με την εξίσωση:

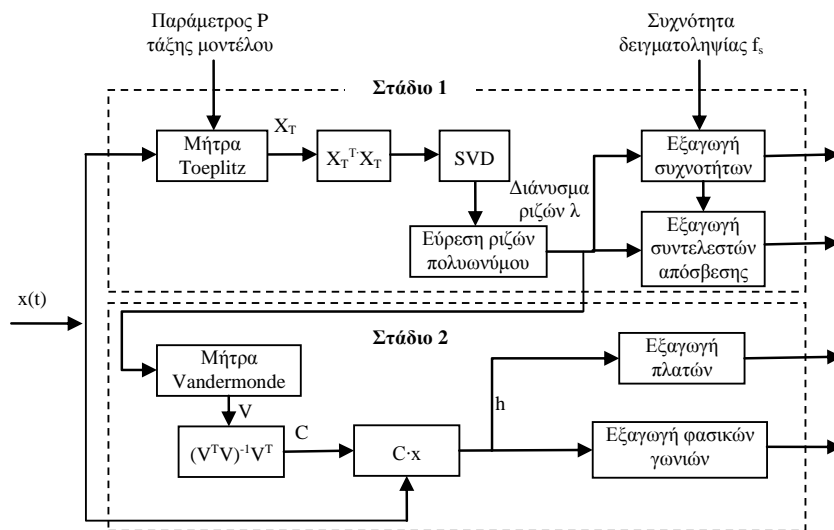
$$x(t_n) = \sum_{k=1}^P \left(A_k \cdot e^{(\sigma_k + j2\pi f_k)(n-1)T_s + j\phi_k} \right), n = 1, 2, \dots, N \quad (2.69)$$

Κάθε όρος στην εξίσωση 2.69 έχει τέσσερα στοιχεία: το μέτρο A_k , τον παράγοντα απόσβεσης σ_k , τη συχνότητα f_k και τη φασική γωνία ϕ_k , όπου k αντιστοιχεί στον αντίστοιχο τρόπο ταλάντωσης για κάθε περίοδο δειγματοληψίας ίση με $T_s=1/f_s$. Κάθε εκθετική συνιστώσα με διαφορετική συχνότητα λαμβάνεται ως ιδιαίτερος τρόπος ταλάντωσης του σήματος $x(t)$. Τα τέσσερα στοιχεία κάθε τρόπου ταλάντωσης αναγνωρίζονται μέσω της αναπαράστασης ενός δείγματος δεδομένων με τη μορφή εξισώσεων κατάστασης. Το χρονικό διάστημα μεταξύ κάθε δείγματος είναι T_s . Χρησιμοποιώντας τη σχέση του Euler θεωρώντας $t=i \cdot T_s$, τα δείγματα του σήματος $x(t)$ γράφονται:

$$x_i = \sum_{k=1}^P \left(B_{k_i} \cdot \lambda_{k_i}^i \right) \quad (2.70)$$

όπου $B_{k_i} = \frac{A_{k_i}}{2} \cdot e^{j\phi_{k_i}}$ και $\lambda_{k_i} = e^{(\sigma_{k_i} + j2\pi f_{k_i})T_s}$ (2.71)

Ο αλγόριθμος υλοποίησης της μεθόδου χωρίζεται σε δύο στάδια, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23. Διάγραμμα αλγορίθμου υλοποίησης της μεθόδου Prony. [130].

Κατά το πρώτο στάδιο εξάγονται οι συντελεστές ενός γραμμικού μοντέλου πρόβλεψης (LPM), τάξης P , το οποίο καταstrώνεται για να προσαρμοστεί στα N δείγματα του σήματος $x(t)$.

$$x_i = \lambda_1 x_{i-1} + \lambda_2 x_{i-2} + \dots + \lambda_p x_{i-p}, i=N, N-1, \dots, 1 \quad (2.72)$$

Για τον ακριβή υπολογισμό των συντελεστών λ_i μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι. Ο πιο αποδοτικός, σύμφωνα με την αναφορά [240], αφορά την αναπαράσταση του σήματος σε μορφή μήτρας Toeplitz σε κάθε χρονική στιγμή, διαμορφώνοντας το μοντέλο της εξίσωσης 2.72 ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ x_{p+1} \\ \dots \\ x_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p-1} & x_{p-2} & \dots & x_0 \\ x_p & x_{p-1} & \dots & x_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i-2} & x_{i-3} & \dots & x_{N-p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_p \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Στη συνέχεια, η μήτρα αναλύεται σε ιδιάζουσες τιμές (Singular Value Decomposition –SVD) για την εύρεση των ριζών λ_k του πολυωνύμου της 2.72, από τις οποίες υπολογίζονται ο συντελεστής απόσβεσης σ_k και η συχνότητα f_k σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$f_k = \frac{\arctan\left(\frac{\text{Im}\{\lambda_k\}}{\text{Re}\{\lambda_k\}}\right)}{2\pi T} \quad \text{και} \quad \sigma_k = \frac{\ln|\lambda_k|}{T} \quad (2.74)$$

Κατά το δεύτερο στάδιο της μεθόδου (βλ. Σχήμα 2.23) το διάνυσμα ριζών λ χρησιμοποιείται για την κατασκευή της μήτρας Vandermonde:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1^1 & \lambda_2^1 & \dots & \lambda_p^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_p^{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Με τη βοήθεια της 2.75 εξάγεται η νέα μήτρα C:

$$C = (V^T \cdot V)^{-1} \cdot V^T \quad (2.76)$$

από την οποία προκύπτει το διάνυσμα B που περιέχει το πλάτος και τη φασική γωνία του εξεταζόμενου σήματος:

$$B = C \cdot x \quad (2.77)$$

όπου $x^T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]$ είναι η μήτρα που περιλαμβάνει τα N δείγματα του σήματος $x(t)$

και $B^T = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_p]$ η μήτρα από τα στοιχεία της οποίας υπολογίζονται το μέτρο και η φασική γωνία του εξεταζόμενου σήματος:

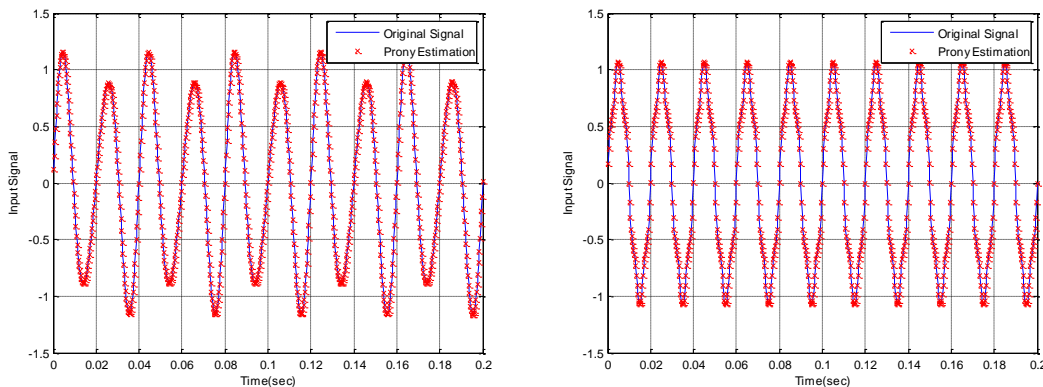
$$A_k = |b_k| \quad \text{και} \quad \phi_k = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{b_k\}}{\text{Re}\{b_k\}}\right) \quad (2.78)$$

Το τελικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει p τρόπους ταλάντωσης (όροι A_{ki} , σ_{ki} , f_{ki} και ϕ_{ki}). Κύριος στόχος της διαδικασίας επίλυσης της Prony είναι η ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμούμενων τιμών:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N |x_i - \hat{x}_i|^2 \quad (2.80)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23, το μοντέλο χρησιμοποιεί ως εισόδους το εξεταζόμενο σήμα, τη συχνότητα δειγματοληψίας f_s και μία αρχική εκτίμηση του αριθμού των συχνοτήτων (παράμετρος p).

Η ευελιξία της Prony στην ανάλυση σημάτων με πολλές και κοντινές αρμονικές συνιστώσες αναδεικνύεται μέσω της εφαρμογής της σε μεγάλη ποικιλία καταρχήν συνθετικών σημάτων, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε δύο σήματα που περιλαμβάνουν πολύ κοντινές συχνότητες χαμηλής τάξης, συγκρίσιμου πλάτους, περιπτώσεις όπου η μέθοδος HHT αντιμετώπιζε σημαντικές δυσκολίες στην επίλυση. Διαπιστώνεται ότι η Prony εκτιμά πολύ γρήγορα και με απόλυτη ακρίβεια το φασματικό περιεχόμενο των δύο σημάτων, χωρίς περιορισμούς στην επιλογή του χρονικού μήκους του παραθύρου.



Σχήμα 2.24. Αποτελέσματα εφαρμογής Prony σε συνθετικά σήματα. Στο αριστερό γράφημα αναλύεται υποθετικό σήμα αποτελούμενο από συνιστώσα 50 Hz μαζί με ενδιάμεση αρμονική συχνότητα 75 Hz πλάτους ίσου με 20% της θεμελιώδους. Δεξιά προσομοιώνεται σήμα 50 Hz με 3^η, 5^η και 7^η αρμονική.

Η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων υλοποίησης της Prony (παράμετρος p , χρονικό παράθυρο, συχνότητα δειγματοληψίας) αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή της. Γενικά, για τη βέλτιστη επιλογή απαιτείται δοκιμαστική διαδικασία τύπου *trial and error*, η οποία είναι δυνατό να απλουστευθεί και επιταχυνθεί εφόσον ακολουθηθούν κάποιοι κανόνες, όπως εξηγείται στο 5^ο Κεφάλαιο. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Prony συνοψίζονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8. Σύνοψη χαρακτηριστικών μεθόδου Prony*Πλεονεκτήματα*

- Το μήκος του χρονικού παραθύρου δεν περιορίζει τη διακριτότητα συχνότητας.
- Δεν υποφέρει από φασματική διαρροή.
- Τα χρονικά παράθυρα μπορούν να έχουν μεταβλητό μήκος, εξασφαλίζοντας την καλύτερη προσαρμογή στην χρονικά μεταβαλλόμενη κυματομορφή.
- Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού.
- Δυνατότητα υπολογισμού ρυθμού απόσβεσης αρμονικών.

Μειονεκτήματα

- Η επιλογή της τάξης του μοντέλου p για την υλοποίηση του αλγορίθμου δεν είναι προφανής σε πραγματικά σήματα με αποτέλεσμα να απαιτείται διαδικασία τύπου trial and error που αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο.
- Σε θορυβώδη σήματα που περιλαμβάνουν συχνότητες με χαμηλό πλάτος η επιτυχής σύγκλιση του μοντέλου δεν είναι εξασφαλισμένη.
- Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.

Εφαρμογές στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

- Ανάλυση δονήσεων και διάγνωση σφαλμάτων ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Μελέτη υποσύγχρονων ταλαντώσεων σε διασυνδεδεμένα συστήματα.
- Κατά περίπτωση εφαρμογές στην εκτίμηση χρονικά μεταβαλλόμενων αρμονικών σε σήματα τάσης ή ρεύματος.

Ανεμογεννήτριες

Η ευελιξία της μεθόδου στον εντοπισμό κοντινών αρμονικών ανεξαρτήτως του μήκους του χρονικού παραθύρου την καθιστά κατάλληλη για την ανάλυση σημάτων Α/Γ με αυξημένο φασματικό περιεχόμενο ενδιάμεσων αρμονικών. Επιπρόσθετα, η απουσία φασματικής διαρροής διασφαλίζει την ακριβέστερη εκτίμηση αρμονικών. Από την άλλη πλευρά, η Prony είναι ευαίσθητη στην ύπαρξη θορύβου, και απαιτεί σαφώς μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, ιδιαίτερα σε μεγάλες συχνότητες δειγματοληψίας. Με βάση τα παραπάνω κρίνεται ότι η μέθοδος Prony θα μπορούσε να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των αρμονικών Α/Γ και για το λόγο αυτό θα εξεταστεί αναλυτικά στο 5^ο Κεφάλαιο.

3.5.3 Άλλες παραμετρικές μέθοδοι*A. Autoregressive Moving Average (ARMA)*

Η τεχνική ARMA, [113], είναι μία παραμετρική μέθοδος στην οποία το σήμα $x(n)$ θεωρείται ως έξοδος ενός συστήματος $H(z)$ με είσοδο λευκό θόρυβο $w(n)$:

$$H(z) = \frac{x(n)}{w(n)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_z z^{-z}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p}} \quad (2.81)$$

όπου P είναι ο αριθμός των πόλων και Z ο αριθμός των μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς $H(z)$. Οι παράμετροι a_i και b_i του μοντέλου ARMA εκτιμώνται χρησιμοποιώντας ως βάση καθορισμένο δείγμα του εξεταζόμενου σήματος και στη συνέχεια εξάγεται το φάσμα $M(e^{j\omega})$ από την 2.81 ως εξής:

$$M(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sum_{i=0}^Z b_i e^{-j\omega i}}{1 + \sum_{i=1}^P a_i e^{-j\omega i}} \right| \quad (2.82)$$

Η τεχνική ARMA παρουσιάζει πολύ καλή διακριτότητα και ικανοποιητική ακρίβεια ακόμη και με μικρό αριθμό δεδομένων αλλά παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην ύπαρξη θορύβου στο σήμα, δυσκολία στο διαχωρισμό πολύ κοντινών συχνοτήτων και δίνει ανακριβή αποτελέσματα στην περίπτωση λανθασμένης επιλογής της τάξης του μοντέλου. Επιπρόσθετα, η διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία δεν παρέχει επαρκή πληροφορία για την υλοποίηση της στα σήματα των Α/Γ.

B. Multiple Signal Classification (MUSIC)

Η μέθοδος MUSIC χρησιμοποιεί την προβολή του διανύσματος του σήματος σε ολόκληρο τον υπόχωρο του θορύβου (noise subspace) και χρησιμοποιεί ημιτονοειδές (εξ. 2.83) ή εκθετικό μοντέλο (εξ. 2.84) για την εκτίμηση των συχνοτήτων.

$$x(n) = \sum_{k=1}^K a_k \cos(2\pi f_k n + \phi_k) + w(n) \quad (2.83)$$

$$x(n) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j2\pi f_k n} + w(n) \quad (2.84)$$

όπου a_k είναι το πλάτος, A_k το μιγαδικό πλάτος, ϕ_k η αρχική φασική γωνία, f_k η αρμονική συχνότητα και $w(n)$ ο λευκός θόρυβος. Η $M \times M$ μήτρα συνδιακύμανσης (covariance) που λαμβάνεται από τα διαθέσιμα δείγματα του σήματος $x(n)$, αναλύεται σε δύο ορθογώνιους υπόχωρους, το υπόχωρο θορύβου που καλύπτεται από ιδιοδιανύσματα άνευ ενδιαφέροντος και τον υπόχωρο του σήματος που καλύπτεται από τα ιδιοδιανύσματα που ενδιαφέρουν. Η συνάρτηση εκτίμησης της συχνότητας για τη μέθοδο MUSIC δίνεται από τη σχέση:

$$P_{X_{MUSIC}}(e^{j\omega}) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^M |r^H v_i|^2} \quad (2.85)$$

όπου $r^H = [1 \ r^{j\omega} \ r^{j2\omega} \ \dots \ r^{j(N-1)\omega}]^T$ αντιστοιχεί στη μιγαδική συζυγή μετάθεση του ιδιοδιανύσματος του σήματος, v_i στο ιδιοδιάνυσμα του χώρου του θορύβου και M στη διάσταση του χώρου των δεδομένων $x(n)$. Οι θέσεις των K υψηλότερων τοπικών ακρότατων της 2.85 αντιστοιχούν στις συχνότητες που περιλαμβάνονται στο σήμα.

Τα πλάτη και οι φάσεις μπορούν τελικά να υπολογιστούν με την ταυτόχρονη επίλυση των K εξισώσεων:

$$\sum_{k=1}^K P_k |r_k^H v_i|^2 = \lambda_i - \hat{\sigma}_w^2, \text{ για } i=1,2,\dots,K \quad (2.86)$$

Η μέθοδος MUSIC συναντάται στη βιβλιογραφία πιο συχνά από την ARMA για την αρμονική ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος. Ειδικότερα στην αναφορά [129] παρουσιάζεται η χρήση μίας εκδοχής της μεθόδου (Root-MUSIC) σε σύγκριση με τη μεθοδολογία ομαδοποίησης (Grouping) του προτύπου IEC 61000-4-7 αλλά και των μεθόδων ESPRIT και PRONY που αναλύονται παρακάτω. Επιπρόσθετα στην αναφορά [248] παρουσιάζεται αλγόριθμος για την εκτίμηση αρμονικών βασισμένος στην MUSIC. Τα βασικά συμπεράσματα είναι ότι η μέθοδος MUSIC παρέχει το πλεονέκτημα της μηδενικής φασματικής διαρροής και καλής διακριτότητας της συχνότητας, υστερεί όμως σε ακρίβεια σε σχέση τις ESPRIT και PRONY στην εκτίμηση των ενδιάμεσων αρμονικών. Γενικά πάντως δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου υλοποίησης.

Γ. Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (ESPRIT)

Σε αντίθεση με τη μέθοδο MUSIC, η οποία υπολογίζει τις συχνότητες βασιζόμενη στον υπόχωρο θορύβου, η ESPRIT βασίζεται στον υπόχωρο του σήματος. Μόλις υπολογιστούν οι συχνότητες, το πλάτος και η φάση τους υπολογίζονται για κάθε συνιστώσα συχνότητας με εφαρμογή ανάλυσης ιδιοτιμών. Ο βασικός αλγόριθμος ESPRIT περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα, [112], [249]-[254]:

- Κατασκευή της μήτρας συνδιακύμανσης R_x από τα διαθέσιμο δείγμα δεδομένων του σήματος $x(n)$
- Ανάλυση της μήτρας συνδιακύμανσης R_x στον πίνακα χώρου σήματος R_{xs} και χώρου θορύβου R_{xn}
- Χρήση επιλεγμένων πινάκων S_1 και S_2 για την εύρεση δύο υποπινάκων R_1 και R_2 από τον πίνακα R_{xs} :

$$S_1 = \begin{bmatrix} I_{N_s} & 0_{ds} \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0_{ds} & I_{N_s} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

όπου I_{N_s} είναι ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης $N_s \times N_s$ και $N_s = M - d_s$ και d_s είναι η απόσταση μεταξύ δύο υποπινάκων συνήθως ίση με τη μονάδα. Για $i = 1$ και 2 :

$$R_i = S_i \cdot R_{xs} \quad (2.89)$$

- Χρήση μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων για την εύρεση της μήτρας ψ που συνδέει τις μήτρες R_1 και R_2 .
- Οι συχνότητες υπολογίζονται τελικά από τα διαγώνια στοιχεία της στρεφόμενης μήτρας φ , που αποτελούν ιδιοτιμές της μήτρας ψ .

Η μέθοδος ESPRIT παρουσιάζει όλα τα πλεονεκτήματα των παραμετρικών μεθόδων αλλά και αυτή απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ενώ παράλληλα προϋποθέτει ακριβή γνώση της τάξης του μοντέλου (που αντιστοιχεί στον αριθμό των αρμονικών συνιστωσών του σήματος), η οποία δεν είναι

γνωστή εκ των προτέρων στα σήματα ποιότητας ισχύος. Στην πιο πρόσφατη αναφορά [251] προτείνεται αλγόριθμος εφαρμογής της ESPRIT σε πραγματικά σήματα με χρήση μεθοδολογίας εκτίμησης της τάξης του μοντέλου (και επομένως του αριθμού των συχνοτήτων που περιέχονται στο σήμα). Η επαλήθευση της μεθόδου γίνεται με χρήση συνθετικών και πραγματικών σημάτων, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του FFTG και της Prony. Το τελικό συμπέρασμα της [251] είναι ότι η ESPRIT μπορεί να υπολογίσει τις αρμονικές ενός σήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον FFTG και την PRONY. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, ότι η μέχρι στιγμής εμπειρία από την εφαρμογή της μεθόδου είναι περιορισμένη, γεγονός που αποτρέπει καταρχήν την επιλογή της για εφαρμογή σε σήματα ρεύματος και τάσης Α/Γ, χωρίς αυτό να αποκλείει τη μελλοντική χρήση της.

Δ. Φίλτρα Kalman (KF)

Τα φίλτρα Kalman είναι μία σειρά μαθηματικών εξισώσεων που χρησιμοποιούν θορυβώδη και ανακριβή δεδομένα μετρήσεων και παρέχουν υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο για την εκτίμηση τιμών (στο παρελθόν, το παρόν και το μέλλον), έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Το μαθηματικό μοντέλο έχει τη μορφή της εξίσωσης κατάστασης και μέτρησης 2.90α και 2.90β:

$$y_{n+1} = \phi_n y_n + \omega_n \quad (2.90\alpha)$$

$$x_n = h_n y_n + \eta_n \quad (2.90\beta)$$

όπου y_n είναι το διάνυσμα κατάστασης και x_n είναι η μέτρηση τη χρονική στιγμή t_n , ω_n και η_n είναι τα σφάλματα του μοντέλου και της μέτρησης αντίστοιχα, ενώ ϕ_n είναι η μήτρα μεταβατικής κατάστασης (state transition) που συνδέει την προηγούμενη κατάσταση με την παρούσα και h_n η μήτρα εξόδου που συνδέει την κατάσταση με τη μέτρηση. Ο αλγόριθμος φίλτρου Kalman ξεκινά με μία αρχική εκτίμηση y_0 για τη μεταβλητή κατάστασης. Ορίζει το προγενέστερο σφάλμα και προσπαθεί να βελτιώσει την αρχική εκτίμηση με αξιοποιώντας κατάλληλα την εκτίμηση της μεταβλητής κατάστασης και του σφάλματος πρόβλεψης.

Η αναδρομική εξίσωση για την ανανέωση των μεταβλητών κατάστασης είναι η ακόλουθη:

$$y_n = y_n^0 + K_n (x_n - h_n y_n^0) \quad (2.91)$$

Ο πίνακας K_n είναι γνωστός ως κέρδος Kalman (Kalman Gain).

Η μέθοδος KF δεν είναι ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου και παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης των συνιστωσών που μεταβάλλονται με το χρόνο. Στα μειονεκτήματα της συγκαταλέγονται η δυσκολία στην κατάστρωση των εξισώσεων κατάστασης, η πιθανότητα εμφάνισης αστάθειας του φίλτρου, [113], και ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος, [255]. Η εφαρμογή της KF στην ανάλυση σημάτων στα ΣΗΕ συναντάται αρκετά συχνά στη βιβλιογραφία, [255]-[263]. Αποτελέσματα εκτίμησης αρμονικών παρουσιάζονται στην αναφορά [256], όπου υπολογίζονται με χρήση φίλτρων Kalman οι ενδιάμεσες αρμονικές ενός συστήματος στο οποίο η θεμελιώδης συχνότητα παρουσιάζει διακυμάνσεις. Συμπεραίνεται ότι η μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με την εφαρμογή του FFT. Στην αναφορά [264] η χρήση φίλτρων Kalman κρίνεται πλεονεκτικότερη σε σχέση με τις MUSIC και ESPRIT στην ανίχνευση των αρμονικών. Ειδικά για τις Α/Γ, η εφαρμογή των φίλτρων Kalman φαίνεται εφικτή και μάλιστα έχει ήδη προταθεί ως μέρος μεθοδολογίας για την εκτίμηση του flicker, [255]. Παρόλα αυτά η μεγάλη ποικιλία παραλλαγών της μεθόδου στη βιβλιογραφία, οι οποίες διαφέρουν ως προς το βαθμό ακρίβειας και αξιοπιστίας, δεν τεκμηριώνουν επαρκώς την εφαρμογή της μεθόδου για τον υπολογισμό των αρμονικών των Α/Γ, αφήνοντας ωστόσο ανοικτό το θέμα της περαιτέρω διερεύνησης και μελέτης.

Ε. Artificial Neural Network (ANN)

Τα τελευταία χρόνια πολλές τεχνικές βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη γίνονται δημοφιλείς για την αντιμετώπιση αδυναμιών των συμβατικών παραμετρικών μεθόδων. Οι μέθοδοι των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN), έχουν πολλές παραλλαγές και είναι δύσκολο να περιγραφούν με έναν απλό ορισμό. Γενικά αποτελούν δικτυακές δομές τεχνητών νευρώνων συνδεδεμένων μέσω κατευθυντήριων συνδέσμων μεταξύ της εισόδου και της εξόδου με τη βοήθεια σειράς δοκιμαστικών δεδομένων. Οι εφαρμογές της ANN είναι δυνατές με διάφορες δομές, με πιο κοινές τα δίκτυα Back Propagation (BPN), ADALINE κ.λπ. Η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την εκτίμηση αρμονικών στα ΣΗΕ συναντάται σε αρκετές εργασίες τα τελευταία χρόνια, [265]-[272].

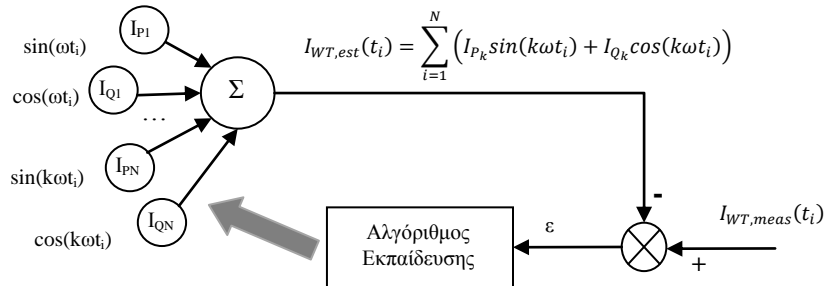
Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.25 παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής τους βασισμένο στη μεθοδολογία της αναφοράς [267], κατάλληλα προσαρμοσμένο για τη φασματική ανάλυση του

ρεύματος εξόδου μιας Α/Γ. Το μαθηματικό μοντέλο υποθέτει ότι το σήμα είναι το άθροισμα της θεμελιώδους συχνότητας και $k-1$ αρμονικών συνιστωσών άγνωστου πλάτους και φασικής γωνίας και μπορεί να παρασταθεί από τη σχέση:

$$I_{WT,est}(t_i) = \sum_{i=1}^N (I_{P_k} \sin(k\omega t_i) + I_{Q_k} \cos(k\omega t_i)) \quad (2.92)$$

Η εκτίμηση αρμονικών του μετρούμενου ρεύματος $I_{WT,meas}$ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα εκπαίδευσης κατάλληλου δικτύου νευρώνων μέσω ρυθμιζόμενων παραμέτρων στάθμισης I_{P_i} και I_{Q_i} . Στόχος του αλγορίθμου εκπαίδευσης είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ του μετρούμενου και του εκτιμώμενου ρεύματος:

$$\varepsilon = \sqrt{(I_{WT,meas}(t_i) - I_{WT,est}(t_i))^2} \quad (2.93)$$



Σχήμα 2.25. Εφαρμογή ANN στην ανάλυση ρεύματος Α/Γ.

Στην ίδια αναφορά ([267]) παρουσιάζονται αποτελέσματα εφαρμογής των νευρωνικών δικτύων μέσω κατάλληλου αλγορίθμου εκπαίδευσης και σύγκριση με τη μεθοδολογία του IEC 61000-4-7. Τα βασικά συμπεράσματα είναι ότι η μέθοδος παρουσιάζει πολύ καλή ακρίβεια και ενδείκνυται για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο λόγω της αναδρομικής δομής, ενώ λειτουργεί ικανοποιητικά και στην περίπτωση παρουσίας θορύβου. Είναι ωστόσο αναγκαία η εφαρμογή του FFT για την καταρχήν εκτίμηση των αρμονικών του εκτιμώμενου σήματος και τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών. Προφανώς τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στις Α/Γ. Ωστόσο η απουσία σχετικών εργασιών για άντληση επαρκούς πληροφορίας, αποτέλεσαν ανασταλτικό παράγοντα για την εφαρμογή της μεθόδου στα πλαίσια της διατριβής.

2.7 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι επικρατέστερες στη βιβλιογραφία μέθοδοι για τη φασματική ανάλυση σημάτων ποιότητας ισχύος. Στο συγκριτικό Πίνακα 2.9 της επόμενης σελίδας συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες των μεθόδων αυτών και παρέχεται εκτίμηση της δυνατότητας χρήσης τους σε Α/Γ. Οι μέθοδοι που τελικά προκρίνονται ως πιο κατάλληλες για εφαρμογή σε σήματα Α/Γ, όχι μόνο ως προς την ακρίβεια και αποτελεσματικότητά τους αλλά και τη διαθέσιμη βιβλιογραφία και εμπειρία εφαρμογής, είναι ο μετασχηματισμός Wavelets, η Hilbert-Huang και η Prony.

Πίνακας 2.9. Σύνοψη χαρακτηριστικών μεθόδων εκτίμησης αρμονικών

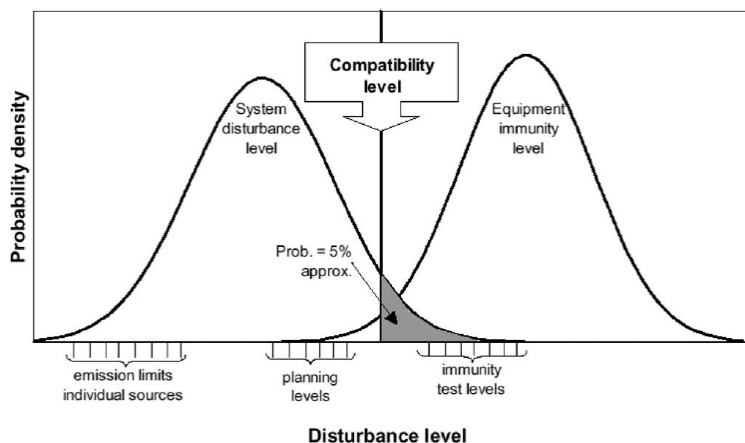
Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Δυνατότητα εφαρμογής στις Α/Γ
<i>Μη παραμετρικές μέθοδοι</i>			
<i>Short Time Fourier Transform</i>	+ Ευρέως διαδεδομένη και τεκμηριωμένη μέθοδος	- Αδυναμία παρακολούθησης μεταβαλλόμενων συχνοτήτων - Εξάρτηση αποτελέσματος από τη διακριτότητα συχνότητας - Προβληματική σε συνθήκες ασύγχρονης δειγματοληψίας	Εφαρμόζεται ήδη για τον υπολογισμό των αρμονικών και πρόσφατα για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος των Α/Γ.
<i>Wavelet Transform</i>	+ Δυνατότητα ανάλυσης ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας + Μεγάλη ευελιξία στον εντοπισμό μεταβατικών διαταραχών	- Υπολογίζει ζώνες συχνοτήτων - Εξαρτάται από την επιλογή της μητρικής συνάρτησης wavelets - Περιορισμένη φασματική διαρροή - Ανάγκη για πρόσθετα εργαλεία μετεπεξεργασίας των δεδομένων	Με την ψηφιακή υλοποίηση μέσω του Wavelet Packet Transform μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση των ανώτερων αρμονικών των Α/Γ (>2 kHz) σύμφωνα με το IEC 61000-4-7.
<i>S-Transform</i>	+ Ανίχνευση διακυμάνσης πλάτους αρμονικών + Αυτόματος εντοπισμός μεταβατικών διαταραχών	- Εμφάνιση ψευδών συχνοτήτων - Απαιτήση φίλτρου εξομάλυνσης - Αδυναμία διαχωρισμού κοντινών συχνοτήτων	Δεν ενδείκνυται για την εκτίμηση αρμονικών Α/Γ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση του flicker
<i>Hilbert-Huang Transform</i>	+ Δυνατότητα ανίχνευσης διακυμάνσης πλάτους και συχνότητας αρμονικών συνιστωσών	- Αδυναμία διαχωρισμού κοντινών συχνοτήτων - Ανάγκη χρήσης εργαλείων για προεπεξεργασία - Απαιτήση φίλτρου εξομάλυνσης	Εφαρμογή στην εκτίμηση διακυμάνσεων θεμελιώδους συχνότητας και στον εντοπισμό διακυμάνσεων αρμονικών χαμηλής τάξης.
<i>Παραμετρικές μέθοδοι</i>			
<i>Prony</i>	+ Πολύ καλή διακριτότητα συχνότητας + Δεν υποφέρει από φασματική διαρροή + Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού	- Η βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων επιτυγχάνεται μέσω διαδικασίας trial and error - Ασταθής σε θορυβώδη σήματα - Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο	Κατάλληλη για την ανάλυση σημάτων Α/Γ με αυξημένο φασματικό περιεχόμενο ενδιάμεσων αρμονικών.
<i>Autoregressive Moving Average (ARMA)</i>	+ Πολύ καλή διακριτότητα + Ικανοποιητική ακρίβεια ακόμη και με μικρό αριθμό δεδομένων	- μεγάλη ευαισθησία στην ύπαρξη θορύβου στο σήμα - δυσκολία στο διαχωρισμό πολύ κοντινών συχνοτήτων	Η διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν παρέχει επαρκή πληροφορία για την υλοποίηση της στα σήματα των Α/Γ
<i>Multiple Signal Classification (MUSIC)</i>	+ μηδενική φασματική διαρροή + καλή διακριτότητα συχνότητας	- υστερεί ακρίβεια σε σχέση άλλες παραμετρικές μεθόδους στην εκτίμηση των μη ακέραιων αρμονικών - μεγάλος υπολογιστικός φόρτος	Η διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν παρέχει επαρκή πληροφορία για την υλοποίηση της στα σήματα των Α/Γ
<i>Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (ESPRIT)</i>	+ μηδενική φασματική διαρροή + καλή διακριτότητα συχνότητας	- Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο	Εξεταστέα η δυνατότητα εφαρμογής στα σήματα των Α/Γ
<i>Φίλτρα Kalman (KF)</i>	+ μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού - μεγάλη ποικιλία παραλλαγών της μεθόδου στη βιβλιογραφία	- Διαφορές ως προς το βαθμό ακρίβειας και αξιοπιστίας, ανάλογα με την παραλλαγή της μεθόδου	Εξεταστέα η δυνατότητα εφαρμογής στα σήματα των Α/Γ
<i>Artificial Neural Network (ANN)</i>	- Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού - ενδείκνυται για real-time εφαρμογές	- Ανάγκης προκαταρκτικής εκτίμησης αρμονικών μέσω FFT	Εξεταστέα η δυνατότητα εφαρμογής στα σήματα των Α/Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

3.1. Θέσπιση ορίων αρμονικής παραμόρφωσης

Οι απαιτήσεις σύνδεσης εγκαταστάσεων αιολικής παραγωγής στα δίκτυα εντάσσονται στο ευρύτερο πλαίσιο απαιτήσεων για τη σύνδεση κάθε είδους εγκατάστασης, η οποία είναι δυνατό να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία των εγκαταστάσεων των χρηστών και του δικτύου. Για να είναι αποδεκτή η σύνδεση, θα πρέπει να μην επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ισχύος που παρέχεται στους άλλους συνδεδεμένους (παραγωγούς ή καταναλωτές), να μην διαταράσσει την ορθή λειτουργία των μέσων ρύθμισης και προστασίας του δικτύου και να μην δημιουργεί προβλήματα ασφάλειας σε πρόσωπα και άλλες εγκαταστάσεις. Ειδικά όσον αφορά τις αρμονικές, ο περιορισμός των αρμονικών ρευμάτων που εγχέονται στο δίκτυο από τους αιολικούς σταθμούς αποσκοπεί στη διατήρηση των επιπέδων αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης σε χαμηλά επίπεδα, προκειμένου να μην παρενοχλείται η λειτουργία άλλων εγκαταστάσεων ή στοιχείων του δικτύου. Η μεθοδολογία ελέγχου καθορίζεται από τα πρότυπα IEC 61000-2-12, [73], και IEC 61000-3-6, [16], και τα βασικά της στάδια εξηγούνται στη συνέχεια. Το πρότυπο IEC 61000-3-6¹¹ είναι το πλέον κατάλληλο για αξιολόγηση αιολικών εγκαταστάσεων και αποτελεί οδηγό για τους Διαχειριστές σε ό,τι αφορά τις βασικές αρχές εκτίμησης της δυνατότητας σύνδεσης εγκαταστάσεων παραγωγής.



Σχήμα 3.1. Γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ των επιπέδων συμβατότητας, «ατροφσίας» εξοπλισμού, σχεδιασμού και εκπομπών, [68], [73].

Το γράφημα του σχήματος 3.1 απεικονίζει την ενδεικτική σχέση μεταξύ των διαφόρων επιπέδων και ορίων, που διαμορφώνουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μεταξύ δικτύου και συνδεδεμένου εξοπλισμού για όλα τα επίπεδα τάσης. Η αριστερή καμπύλη αντιστοιχεί στα τυπικά επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης των δικτύων (*disturbance levels*), η οποία οφείλεται στο σύνολο του συνδεδεμένου εξοπλισμού. Τα επίπεδα αυτά είναι γενικά χαμηλότερα όσο αυξάνει το επίπεδο τάσης του δικτύου (με την επιφύλαξη περιπτώσεων συντονισμού). Τα *επίπεδα συμβατότητας (compatibility levels)* για κάθε τάξη αρμονικών καθορίζονται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να καλύπτουν το σύνολο των εμφανιζόμενων επιπέδων παραμόρφωσης, αφήνοντας μικρή μόνο πιθανότητα υπέρβασης (<5%), ενώ παράλληλα είναι χαμηλότερα από τα τυπικά επίπεδα «ατροφσίας» του συνόλου του εξοπλισμού που συνδέεται στο δίκτυο (*immunity levels*), εξασφαλίζοντας έτσι τη μη παρενόχλησή του από τις συνηθεις διαταραχές. Από την άλλη πλευρά, ο καθορισμός ορίων εκπομπών αρμονικών (*emission limits*) από τις επιμέρους ανεξάρτητες πηγές εξασφαλίζει ότι τα προκύπτοντα επίπεδα παραμόρφωσης της τάσης εξαιτίας των εκπομπών αυτών δεν θα υπερβαίνουν τα επίπεδα συμβατότητας. Για μεγάλες εγκαταστάσεις, όπως είναι τα αιολικά πάρκα, εισάγεται η έννοια των *επιπέδων σχεδιασμού (planning levels)* κατά τον καθορισμό κατάλληλων ορίων εκπομπών. Πρόκειται για τιμές που ορίζονται από τους διαχειριστές των δικτύων για τον σχεδιασμό ένταξης εγκαταστάσεων σημαντικής ισχύος, έτσι ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα υπέρβασης των επιπέδων συμβατότητας με ένα περιθώριο ασφαλείας. Για τον λόγο αυτό, τα επίπεδα σχεδιασμού είναι γενικά χαμηλότερα από τα επίπεδα

¹¹ Τυπικά, χαρακτηρίζεται ως τεχνική έκθεση (Technical Report) και όχι πρότυπο.

συμβατότητας κατά ένα περιθώριο, το οποίο εξαρτάται από παράγοντες όπως η τοπολογία και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου, τα επίπεδα προϋπάρχουσας παραμόρφωσης, την πιθανότητα εμφάνισης συντονισμών, το προφίλ του φορτίου κ.λπ. και επομένως διαφέρουν κατά περίπτωση. Επίσης, ο καθορισμός τους εξαρτάται και από την τήρηση των ορίων που επιβάλλονται στον εξοπλισμό χαμηλής ισχύος που συνδέεται στη ΧΤ.

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται τα επίπεδα συμβατότητας (*compatibility levels*) για την αρμονική παραμόρφωση της τάσης των δικτύων ΧΤ και ΜΤ, όπως προτείνονται από τα πρότυπα IEC 61000-2-12 και IEC 61000-3-6.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1. Επίπεδα συμβατότητας για τις επιμέρους αρμονικές συνιστώσες τάσης των δικτύων ΧΤ και ΜΤ ως ποσοστό % της θεμελιώδους, σύμφωνα με τα IEC 61000-2-12 και IEC 61000-3-6					
Περιττές αρμονικές (όχι πολλαπλάσιες του 3)		Περιττές αρμονικές (πολλαπλάσιες του 3)		Άρτιες αρμονικές	
Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)	Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)	Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \cdot (17/h) - 0.27$	$21 < h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot (10/h) + 0.25$

- Ολική Αρμονική Παραμόρφωση THD=8%
 - Τα επίπεδα συμβατότητας για τις ενδιάμεσες αρμονικές (interharmonics) προτείνεται να λαμβάνονται ίσα με τα αντίστοιχα επίπεδα της αμέσως επόμενης τάξης άρτιας αρμονικής
 - Για τις ανώτερες αρμονικές (>50^η τάξης) δεν έχει ουσιαστικό νόημα να γίνεται διάκριση μεταξύ ακέραιων και ενδιάμεσων αρμονικών. Το όριο συμβατότητας για τους διακριτούς τόνους καθορίζεται στο 0.2% της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης. Σε περίπτωση που αντί διακριτών συχνοτήτων χρησιμοποιείται ζώνη συχνοτήτων, το επίπεδο συμβατότητας προσαυξάνεται στο 0.3%.

Αντίστοιχες τιμές (ελαφρώς ελαστικότερες στις υψηλές τάξεις) καθορίζονται και από το πρότυπο EN 50160 [100] το οποίο καθορίζει τα χαρακτηριστικά της τάσης που παρέχεται από τα δημόσια δίκτυα διανομής και έχει υιοθετηθεί και στην Ελλάδα.

Οι τιμές του Πίνακα 3.1 αναφέρονται σε αρμονικές μόνιμης ή σχεδόν μόνιμης (quasi-stationary) κατάστασης, εκφρασμένες ως μέσες τιμές 10λέπτου ή μεγαλύτερης διάρκειας. Οι αρμονικές αυτές αποτελούν τις βασικές αιτίες θερμικής καταπόνησης καλωδίων και αγωγών, μετασχηματιστών, ηλεκτρικών μηχανών, πυκνωτών κ.λπ. Αντίστοιχου ενδιαφέροντος ωστόσο, είναι και οι αρμονικές πολύ σύντομης διάρκειας (μέσης τιμής διάρκειας ≤ 3 s), οι οποίες επιδρούν στη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών. Για τις αρμονικές αυτές ισχύουν τα επίπεδα συμβατότητας του Πίνακα 3.1, προσαυξημένα κατά k_{hvs} φορές, όπου k_{hvs} δίνεται από τη σχέση:

$$k_{hvs} = 1.3 + \frac{0.7}{45}(h - 5) \quad (3.1)$$

όπου h η τάξη της αρμονικής.

Η ένταξη νέων αιολικών εγκαταστάσεων στα δίκτυα θα πρέπει να μην οδηγεί σε υπέρβαση των επιπέδων συμβατότητας του Πίνακα 3.1. Αποτελεί υποχρέωση του Διαχειριστή να καθορίσει αποδεκτά όρια αρμονικών εκπομπών από τα προς σύνδεση Α/Π, λαμβάνοντας υπόψη τις ήδη υφιστάμενες αλλά και τις μελλοντικές εγκαταστάσεις και προφανώς τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Τα όρια αυτά είναι τα επίπεδα σχεδιασμού και γενικά είναι χαμηλότερα από τα επίπεδα συμβατότητας για τη σύνδεση στη ΜΤ ή την ΥΤ. Ειδικά στις συνδέσεις ΧΤ, μπορούν να θεωρούνται ίσα με τα επίπεδα συμβατότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα συμβατότητας του Πίνακα 3.1 και θεωρώντας τυπικές καταστάσεις παραμόρφωσης του δικτύου (disturbance levels), το IEC 61000-3-6 προτείνει ενδεικτικά επίπεδα σχεδιασμού για τις επιμέρους αρμονικές τάσης αλλά και τη συνολική αρμονική παραμόρφωση, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 3.2. Και σε αυτόν τον Πίνακα, τα όρια αναφέρονται σε αρμονικές μέσω των τιμών 10λέπτου ή μεγαλύτερης διάρκειας. Σε περίπτωση που ενδιαφέρουν οι αρμονικές πολύ σύντομης διάρκειας (≤ 3 s) τα επίπεδα του Πίνακα 3.2 πολλαπλασιάζονται με τον παράγοντα k_{hvs} , όπως ορίζεται στην εξίσωση 3.1.

Η τήρηση των επιπέδων σχεδιασμού δεν απαντά απ' απευθείας στο ερώτημα εάν μία Α/Γ ή ένα Α/Π μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Και αυτό γιατί σε κάθε επίπεδο τάσης, η αρμονική παραμόρφωση δεν προέρχεται μόνο από τον συγκεκριμένο αιολικό παραγωγό αλλά και από τους υπόλοιπους παραγωγούς και καταναλωτές που συνδέονται σε αυτό το επίπεδο και κατά ένα μέρος στην

παραμόρφωση που μεταφέρεται από το ανώτερο επίπεδο τάσης, μέσω των μετασχηματιστών υποβιβασμού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2. Επίπεδα σχεδιασμού (planning levels) για τις επιμέρους αρμονικές συνιστώσες τάσης των δικτύων ΜΤ και ΥΤ ως ποσοστό % της θεμελιώδους, σύμφωνα με το IEC 61000-3-6.

Περιττές αρμονικές (όχι πολλαπλάσιες του 3)			Περιττές αρμονικές (πολλαπλάσιες του 3)			Άρτιες αρμονικές		
Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)		Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)		Αρμονική τάξη h	Αρμονική τάση (%)	
	ΜΤ	ΥΤ		ΜΤ	ΥΤ		ΜΤ	ΥΤ
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17 ≤ h ≤ 49	1.9 · (17/h) - 0.2	1.2 · 17/h	21 < h ≤ 45	0.2	0.2	10 ≤ h ≤ 50	0.25 · (10/h) + 0.22	0.19 · (10/h) + 0.16

Για τις ενδιάμεσες αρμονικές προτείνεται η χρήση συντηρητικής τιμής ίσης με 0.2%.
Ολική Αρμονική Παραμόρφωση στα δίκτυα ΜΤ και ΥΤ: THD_{MV}=6.5% και THD_{HV}=3%.

Για παράδειγμα, οι αρμονικές τάσης στα δίκτυα ΜΤ οφείλονται αφενός στους συνδεδεμένους στο δίκτυο (ΜΤ αλλά και ΧΤ, μέσω των μετασχηματιστών διανομής) και αφετέρου στην υφιστάμενη παραμόρφωση του δικτύου ΥΤ, η οποία μεταφέρεται στην πλευρά ΜΤ των μετασχηματιστών ΥΤ/ΜΤ, [86]. Συνεπώς, για τον ρεαλιστικό καθορισμό των ορίων σχεδιασμού του Πίνακα 3.2 και την ορθή αξιολόγηση της συμβατότητας κάθε εγκατάστασης, θα πρέπει να εκτιμάται η συμβολή της κάθε πηγής αρμονικών στη συνολική αρμονική παραμόρφωση και να αφαιρείται το μέρος της παραμόρφωσης που θεωρείται ότι προέρχεται από το υπερκείμενο δίκτυο, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Η διαδικασία υπολογισμού της συνολικής παραμόρφωσης της τάσης προϋποθέτει τη διανυσματική άθροιση της συμβολής των επιμέρους πηγών, λόγω των διαφορετικών φασικών γωνιών των αρμονικών ρευμάτων κάθε πηγής και άρα των αντίστοιχων προκαλούμενων αρμονικών τάσεων. Επειδή τις περισσότερες φορές, η γνώση των επιμέρους φασικών γωνιών κάθε πηγής δεν είναι εξασφαλισμένη, το IEC 61000-3-6 προτείνει την εφαρμογή του παρακάτω γενικού κανόνα άθροισης για τις τάσεις και τα ρεύματα:

$$U_h = \sqrt{\sum_i U_{hi}^a} \quad \text{και} \quad I_h = \sqrt{\sum_i I_{hi}^a} \quad (3.2)$$

όπου:

U_h, I_h είναι το μέτρο της προκύπτουσας συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάξης h της τάσης και του ρεύματος.

U_{hi}, I_{hi} είναι το μέτρο της παραμόρφωσης τάξης h της τάσης και του ρεύματος κάθε επιμέρους πηγής i.

α εκθέτης που εξαρτάται κυρίως από τη στατιστική κατανομή του πλάτους και των φασικών γωνιών των αρμονικών τάσεων και ρευμάτων των επιμέρους πηγών.

Στον Πίνακα 3.3 παρατίθενται οι προτεινόμενες από το IEC 61000-3-6 τιμές του εκθέτη α , ανάλογα με την τάξη της εξεταζόμενης αρμονικής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3. Προτεινόμενες τιμές εκθετικού συντελεστή για την άθροιση περιττών και ανώτερων αρμονικών από πολλαπλές πηγές, σύμφωνα με το IEC 61000-3-6

Αρμονική τάξη	α
h < 5	1.0
5 ≤ h ≤ 10	1.4
h > 10	2

Για την επιλογή των τιμών αυτών λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Οι πηγές που συμβάλλουν στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου είναι οι μεγάλοι πελάτες ΜΤ (παραγωγοί ή καταναλωτές), οι διαταραχές που μεταφέρονται από το ένα επίπεδο τάσης στο άλλο μέσω των μετασχηματιστών υποβιβασμού και η συνολική παραμόρφωση που προέρχεται από τις πολυάριθμες εγκαταστάσεις που συνδέονται στο δίκτυο ΧΤ.
- Οι περιττές αρμονικές χαμηλής τάξης έχουν σημαντικά πλάτη σε όλα τα σημεία του δικτύου, τα οποία παραμένουν γενικά σταθερά για μεγάλες περιόδους, ενώ οι φασικές τους γωνίες παρουσιάζουν μικρό εύρος διακύμανσης, εκτός βέβαια από την περίπτωση συντονισμών.

- Οι αρμονικές υψηλής τάξης παρουσιάζουν ευρεία διακύμανση, τόσο σε πλάτος, όσο και σε φασική γωνία.

Εάν είναι γνωστό ότι οι επιμέρους αρμονικές συμβολές βρίσκονται σε φάση (οι φασικές διαφορές τους είναι μικρότερες των 90°), τότε μπορεί να χρησιμοποιείται $\alpha = 1$ και για $h \geq 5$. Επίσης, ορισμένες μη χαρακτηριστικές αρμονικές χαμηλής τάξης (π.χ. η $3^{\text{η}}$) μπορεί να προκαλούνται από ανεξάρτητες αιτίες κατά τρόπο ώστε να είναι απίθανη η ταύτιση των φάσεων των επιμέρους πηγών. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιείται εκθέτης μεγαλύτερος από 1 (ενδεικτικά προτεινόμενος $\alpha=1.2$). Τέλος, για τις άρτιες αρμονικές, οι οποίες γενικά δεν είναι συμφασικές, μπορεί να χρησιμοποιείται ο εκθετικός συντελεστής που προτείνεται για τις ανώτερες αρμονικές.

Αξιοποιώντας τον παραπάνω κανόνα άθροισης μπορεί να εκτιμηθεί η συνολική συνεισφορά όλων των αρμονικών πηγών που συνδέονται σε ένα δίκτυο MT, συμπεριλαμβανομένων και των αιολικών εγκαταστάσεων. Πράγματι, για κάθε τάξη αρμονικής, η αντίστοιχη αρμονική τάσης προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα της αρμονικής που προέρχεται από το υπερκείμενο δίκτυο (που μπορεί να είναι το δίκτυο YT ή ένα άλλο δίκτυο MT) και της αρμονικής τάσης που οφείλεται σε όλες τις εγκαταστάσεις που συνδέονται στο δίκτυο MT και XT και αποτελούν πηγές αρμονικής παραμόρφωσης. Η προκύπτουσα συνολική αρμονική τάσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το επίπεδο σχεδιασμού του δικτύου MT που εκτιμάται από τη σχέση, [16]:

$$L_{hMV} = \sqrt[\alpha]{G_{hMV+LV}^a - (T_{hUM} \cdot L_{hUS})^a} \quad (3.3\alpha)$$

Το συνολικό όριο παραμόρφωσης που μπορεί να διατεθεί για το σύνολο των εγκαταστάσεων XT και MT που συνδέονται στο συγκεκριμένο δίκτυο MT δίνεται από τη σχέση, [5]:

$$G_{hMV+LV} = \sqrt[\alpha]{L_{hMV}^a - (T_{hUM} \cdot L_{hUS})^a} \quad (3.3\beta)$$

όπου

G_{hMV+LV}	είναι το συνολικό όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάξης h , εξαιτίας όλων των εγκαταστάσεων MT ή XT που τροφοδοτούνται από το δίκτυο MT (ως ποσοστό % της θεμελιώδους τάσης).
L_{hMV}	το επίπεδο σχεδιασμού για την αρμονική τάξης h της τάσης του δικτύου MT, όπως δίνεται ενδεικτικά στον Πίνακα 3.2.
L_{hUS}	το επίπεδο σχεδιασμού για την αρμονική τάξης h της τάσης του υπερκείμενου δικτύου, όπως δίνεται ενδεικτικά στον Πίνακα 3.2.
α	ο εκθέτης του κανόνα άθροισης αρμονικών του Πίνακα 3.3.
T_{hUM}	συντελεστής μεταφοράς της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης από το δίκτυο στα ανάντι προς το εξεταζόμενο δίκτυο MT, η τιμή του οποίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου, μπορεί να προκύψει από προσομοίωση ή μετρήσεις και καθορίζεται με ευθύνη του διαχειριστή (ενδεικτική τιμή ίση με 0.8).

3.2. Διαδικασία ελέγχου τήρησης ορίων αρμονικών εκπομπών

Έχοντας αναγνωρίσει τις επιμέρους πηγές αρμονικών εκπομπών στο εξεταζόμενο σημείο του δικτύου και λαμβάνοντας υπόψη τον αναμενόμενο βαθμό συμβολής κάθε πηγής, σύμφωνα με την εξίσωση 3.2 και τον Πίνακα 3.3, το όριο παραμόρφωσης G_{hMV+LV} μπορεί να καταναμηθεί στις επιμέρους εγκαταστάσεις του δικτύου αναλογικά με την ονομαστική τους ισχύ. Μια ρεαλιστική προσέγγιση είναι να θεωρηθεί ο λόγος μεταξύ της συμφωνημένης ισχύος¹² και της συνολικής ισχύος των εγκαταστάσεων του δικτύου σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{Uhi} = G_{hMV+LV} \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t}} \quad (3.4)$$

όπου

E_{Uhi}	είναι το επιτρεπόμενο όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάξης h της τάσης, εξαιτίας της εγκατάστασης i (%) που τροφοδοτείται απευθείας στη MT.
-----------	--

¹² Με τον όρο συμφωνημένη ισχύς ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς που έχει συμφωνηθεί μεταξύ του παραγωγού και του διαχειριστή να παρέχεται στο ΣΚΣ.

G_{hMV+LV}	το συνολικό όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάξης h της τάσης, εξαιτίας όλων των εγκαταστάσεων MT ή XT που συνδέονται στο δίκτυο.
α	ο εκθέτης του κανόνα άθροισης αρμονικών του Πίνακα 3.3.
$S_i = P_i / \cos\phi_i$	είναι η συμφωνημένη φαινόμενη ισχύς της εγκατάστασης i
S_t	είναι η συνολική ισχύς των εγκαταστάσεων του δικτύου (ήδη συνδεδεμένων ή αναμενόμενων), οι οποίες προκαλούν αρμονική παραμόρφωση.

Για τη ακριβέστερη εκτίμηση του ορίου E_{Uhi} είναι σκόπιμο η τιμή του S_i στην εξίσωση 3.4 να τίθεται ίση, όχι με την εγκατεστημένη ισχύ αλλά με τη συνολική ισχύ των εγκαταστάσεων που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρώντας ωστόσο ότι γενικά οι αιολικές εγκαταστάσεις λειτουργούν με αυξημένο ποσοστό ταυτοχρονισμού, η τιμή του S_i είναι κοντά στην συνολική εγκατεστημένη. Επιπρόσθετα, προκειμένου να αποφευχθούν πολύ χαμηλές τιμές ορίων για αιολικούς σταθμούς μικρής συμφωνημένης ισχύος ($S_i \ll S_t$), οι οποίες θα καθιστούσαν απαγορευτική τη σύνδεση, προτείνεται από το IEC 61000-3-6 η χρήση ενός ελάχιστου ορίου $S_i/S_t = 0.2$, κάτω από το οποίο θα μπορούν να εγκαθίστανται χωρίς περαιτέρω έλεγχο. Τέλος, τιμές ορίων E_{Uhi} κάτω από 0.1% θεωρούνται μη πρακτικές και προτείνεται να λαμβάνονται ίσες με 0.1% (εκτός από τις περιπτώσεις που εγκυμονεί κίνδυνος εμφάνισης ακουστικού θορύβου στις τηλεφωνικές επικοινωνίες, ή εάν η συγκεκριμένη τάξη αντιστοιχεί σε κάποια συχνότητα ασύρματης επικοινωνίας, οπότε δικαιολογείται αυστηρότερος περιορισμός).

Έχοντας προσδιορίσει το όριο αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου, το οποίο αντιστοιχεί στην εγκατάσταση i , που στην παρούσα μελέτη πρόκειται για Α/Π, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της πραγματικής αρμονικής παραμόρφωσης που προκαλείται από αυτό, ώστε να συγκριθεί με το τιθέμενο όριο. Προφανώς, δεδομένου ότι δεν είναι εκ των προτέρων διαθέσιμα στοιχεία αρμονικών εκπομπών για το σύνολο του εξεταζόμενου Α/Π, είναι λογικό να θεωρούνται ως αναφορά οι τιμές των αρμονικών ρευμάτων $I_{hA/G}$ κάθε επιμέρους Α/Γ, όπως διατίθενται από τον κατασκευαστή της μέσω του πιστοποιητικού δοκιμών. Με βάση αυτές, εφαρμόζεται ο κανόνας άθροισης της εξίσωσης 3.2 και προκύπτει το συνολικό ρεύμα του Α/Π, I_{h_i} . Η αρμονική παραμόρφωση τάσης που προκαλείται από το Α/Π, μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί με τη βοήθεια της σχέσης, [86]:

$$U_{hi} = Z_h \cdot I_{h_i} \leq E_{Uhi} \quad (3.5)$$

όπου

U_{hi}	είναι η αρμονική συνιστώσα τάξης h της τάσης, η οποία προκαλείται από το Α/Π _{i} .
I_{h_i}	είναι η αρμονική συνιστώσα τάξης h του ρεύματος εξόδου του Α/Π _{i} , η οποία εκτιμάται με βάση τα πιστοποιητικά δοκιμών των επιμέρους Α/Γ (μέγιστη τιμή κανονικής λειτουργίας $I_{h_i,max}$).
Z_h	είναι η τιμή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου στο ΣΚΣ για τη συχνότητα $h \cdot f_1$ της αρμονικής τάξης h (όπου $f_1 = 50$ Hz η θεμελιώδης συχνότητα του δικτύου).

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης Z_h μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης του δικτύου, την τοπολογία του και τη σύνδεση/αποσύνδεση στοιχείων αντιστάθμισης (πυκνωτών-πηνίων) και ο υπολογισμός της είναι γενικά πολύπλοκος, ιδιαίτερα για αρμονικές υψηλής τάξης ($h > 25$). Γενικά συνιστάται ο υπολογισμός της σε συνθήκες ελάχιστου φορτίου και με τους πυκνωτές αντιστάθμισης συνδεδεμένους, [86]. Πληρύτερη ωστόσο εξέταση απαιτεί τη θεώρηση εναλλακτικών λειτουργικών καταστάσεων.

Η γνώση της σύνθετη αρμονικής αντίστασης Z_h προσφέρει τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού του ισοδύναμου ορίου E_{Ihi} των αρμονικών του ρεύματος εξόδου του αιολικού πάρκου με βάση την εξίσωση 3.5:

$$E_{Ihi} = \frac{E_{Uhi}}{Z_h} \quad (3.6)$$

Ο υπολογισμός του ορίου ρεύματος εξόδου προσφέρει το πλεονέκτημα της άμεσης σύγκρισης με τα πραγματικά ρεύματα εξόδου της εξεταζόμενης εγκατάστασης και επομένως διευκολύνει στον άμεσο έλεγχο τήρησης των ορίων. Δεδομένου ωστόσο ότι η τιμή της σύνθετης αρμονικής αντίστασης δεν είναι τυποποιημένη στα δίκτυα, τα υπολογιζόμενα όρια ρεύματος διαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση και για τον λόγο αυτόν δεν συνηθίζεται ο εκ των προτέρων καθορισμός τους στα διεθνή πρότυπα, παρά μόνο ως ενδεικτικές τιμές. Σχετικοί πίνακες περιλαμβάνονται στα πρότυπα IEC

61000-3-6 και στη σειρά προτύπων 519 και 1547 της IEEE, [78], [273], στα οποία δίνονται συγκεκριμένα όρια αρμονικών ρεύματος για τις εγκαταστάσεις που συνδέονται στα δίκτυα διανομής, ως συνάρτηση της ισχύος βραχυκύκλωσης στο ΣΚΣ. Τα όρια αυτά παρατίθενται στους Πίνακες 3.4α και 3.4β.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4α. Ενδεικτικά όρια επιλεγμένων αρμονικών ρεύματος περιττής τάξης για εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος $S_i \leq 1$ MVA και $S_i / S_{sc} < 1\%$, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-3-6.					
Αρμονική τάξη h	$h = 5$	$h = 7$	$h = 11$	$h = 13$	$h > 13$
Όριο αρμονικών ρεύματος $E_{hi} = I_{hi} / I_i$ (%)	5	5	3	3	$500 / h^2$

E_{hi} είναι το όριο αρμονικών εκπομπών ρεύματος τάξης h για την εγκατάσταση i .
 I_{hi} το αρμονικό ρεύμα τάξης h που προκαλείται από την εγκατάσταση i .
 I_i το rms ρεύμα που αντιστοιχεί στη συμφωνημένη ισχύ της εγκατάστασης i .

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4β. Όρια αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος για τη σύνδεση εγκαταστάσεων στα δίκτυα διανομής (120V έως 69kV), ως ποσοστό του θεμελιώδους, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 519.					
I_{sc}/I_L	Περιττές αρμονικές ρεύματος (%)				
	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4

Οι άρτιες αρμονικές περιορίζονται στο 25% των τιμών των περιττών αρμονικών.
 I_{sc} είναι το ρεύμα που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στο ΣΚΣ.
 I_L το μέγιστο παραγόμενο ρεύμα της αιολικής εγκατάστασης (ουσιαστικά πρέπει να λαμβάνεται το ονομαστικό).
 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση στα δίκτυα έως 69kV: $THD_{MV} = 5\%$.

Συνοψίζοντας τη διαδικασία ελέγχου της τήρησης των ορίων αρμονικών εκπομπών, η ακριβής εκτίμηση της δυνατότητας σύνδεσης ενός Α/Π, όσον αφορά τις αρμονικές, απαιτεί τη γνώση:

- Των ορίων αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης που αντιστοιχεί στο υπό εξέταση Α/Π.
- Των μέγιστων τιμών $I_{hi,max}$ των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος εξόδου κανονικής λειτουργίας των Α/Γ.
- Της αρμονικής σύνθετης αντίστασης του δικτύου Z_h για κάθε τάξη αρμονικών h .
- Των φασικών γωνιών των αρμονικών ρευμάτων, εφόσον το Α/Π περιλαμβάνει περισσότερες από μία Α/Γ. Όταν αυτές δεν είναι γνωστές, εφαρμόζεται ο προσεγγιστικός κανόνας άθροισης της εξίσωσης 3.2.

Εφόσον τα στοιχεία αυτά είναι διαθέσιμα, οι διαχειριστές δικτύου προβαίνουν στον έλεγχο της τήρησης των σχετικών ορίων, ανά αρμονική τάξη, σε συνδυασμό ενδεχομένως με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού αρμονικής φορτίου σε σύνθετες περιπτώσεις δικτύων, [86].

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε ακολουθείται για τη σύνδεση των αιολικών σταθμών στη ΜΤ. Όσον αφορά τις Α/Γ που συνδέονται στο δίκτυο ΧΤ, εφαρμόζονται τα πρότυπα IEC 61000-3-2, 61000-3-4 και 61000-3-12, [74]-[76], όπου καθορίζονται συγκεκριμένα όρια ρεύματος. Η σύνδεση στη ΧΤ αφορά τις λεγόμενες μικρές Α/Γ, γενικά ισχύος έως 50kW ($I_{AI} < 75A$ ανά φάση).

Σε κάθε περίπτωση, όταν τα τιθέμενα όρια παραβιάζονται, ο παραγωγός πρέπει να λάβει μέτρα περιορισμού των εκπομπών αρμονικών από τις εγκαταστάσεις του (εγκατάσταση φίλτρων συνοδευόμενη από σχετική μελέτη, επιλογή άλλου εξοπλισμού) ή να επιλεγεί σημείο σύνδεσης με υψηλότερη ισχύ βραχυκύκλωσης.

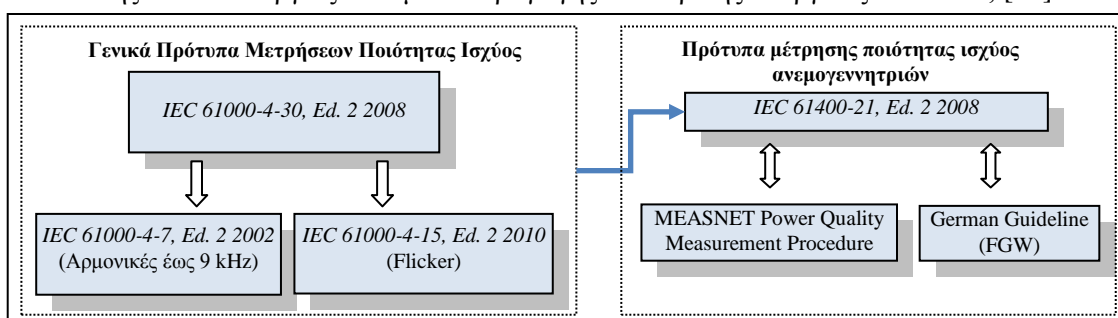
3.3. Δοκιμές και μετρήσεις ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών

Το βασικό ερώτημα που απασχολεί τους διαχειριστές των δικτύων κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των αρμονικών εκπομπών είναι με ποιον τρόπο θα εξασφαλίζουν την εκ των προτέρων ακριβή γνώση των επιμέρους αρμονικών συνιστωσών των ρευμάτων που παράγει μία Α/Γ που πρόκειται να συνδεθεί στο δίκτυο. Η γνώση αυτή θα μπορούσε καταρχήν να προκύψει ως αποτέλεσμα υπολογιστικής προσομοίωσης του συστήματος της εξεταζόμενης Α/Γ. Η πρακτική αυτή ωστόσο, προϋποθέτει λεπτομερή πληροφόρηση για τις παραμέτρους σχεδίασης, ιδιαίτερα όσον αφορά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τύπος και έλεγχος inverter, τύπος και παράμετροι γεννήτριας, στοιχεία φίλτρων

κ.λπ), η οποία δεν διατίθεται γενικά από τους κατασκευαστές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, παρά τη ευρεία διαθεσιμότητα υπολογιστικών εργαλείων και την πληθώρα μοντέλων προσομοίωσης Α/Γ στη βιβλιογραφία, τα αναπτυχθέντα μοντέλα να μην μπορούν να αξιοποιηθούν αποδοτικά για την εκ των προτέρων αξιολόγηση των εμπορικών εγκαταστάσεων.

Το μειονέκτημα αυτό δημιουργεί την ανάγκη για τη διεξαγωγή συστηματικών μετρήσεων που θα αποτυπώνουν τις απαιτούμενες παραμέτρους ποιότητας ισχύος μιας Α/Γ χωρίς να είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των λεπτομερειών σχεδίασης της μηχανής. Στο πλαίσιο αυτό, η Τεχνική Επιτροπή TC77 της IEC έχει συντάξει τη σειρά προτύπων IEC 61000-4, τα οποία προδιαγράφουν τεχνικές μετρήσεων και δοκιμών, όχι μόνο για τις Α/Γ αλλά για το σύνολο του εξοπλισμού που συνδέεται στα ηλεκτρικά συστήματα, [274]. Από τα πρότυπα αυτά, το IEC 61000-4-30, [79], αποτελεί το γενικό πρότυπο μετρήσεων ποιότητας ισχύος και καλύπτει το σύνολο των συσκευών ή διατάξεων που συνδέονται στα δίκτυα είτε ως παραγωγοί ή ως καταναλωτές, σκιαγραφώντας τον τρόπο μέτρησης του συνόλου των διαταραχών ποιότητας ισχύος στα δίκτυα (συχνότητα, flicker, βυθίσεις και διακοπές τάσης, υπερτάσεις, ταλαντώσεις, ασυμμετρία και αρμονικές τάσης και ρεύματος)¹³. Όσον αφορά τις Α/Γ, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στις παραπομπές του προτύπου στα επιμέρους πρότυπα μέτρησης αρμονικών και flicker (IEC 61000-4-7 και IEC 61000-4-15, [13], [275]). Ωστόσο, παρά τη γενικότητα του IEC 61000-4-30 και τη δυνατότητα εφαρμογής του στις ανανεώσιμες πηγές, δεν επαρκεί για να προδιαγράψει με πληρότητα τη διαδικασία μετρήσεων στις Α/Γ. Ο λόγος είναι ότι οι Α/Γ αποτελούν ιδιαίτερη περίπτωση εγκαταστάσεων, καθώς το σημείο λειτουργίας τους δεν είναι σταθερό αλλά διαμορφώνεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμος, ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία, υγρασία), ενώ η λειτουργία τους είναι περισσότερο σύνθετη και λιγότερο προβλέψιμη σε σχέση με άλλες ΑΠΕ, όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά συστήματα, των οποίων η παραγωγή είναι επίσης κυμαινόμενη.

Σε αυτή την κατεύθυνση, η μέτρηση ποιότητας ισχύος των Α/Γ διαχωρίζεται από αυτή των κοινών φορτίων και των υπόλοιπων εγκαταστάσεων παραγωγής από ΑΠΕ και εξειδικεύεται μέσω του προτύπου IEC 61400-21, [14], το οποίο έχει συνταχθεί και παρακολουθείται από την Τεχνική Επιτροπή TC88 της IEC¹⁴, προκειμένου να καλύπτει το σύνολο των Α/Γ που είναι σχεδιασμένες για σύνδεση στο δίκτυο. Ρόλος του IEC 61400-21 είναι ο καθορισμός κοινής διαδικασίας μέτρησης και εκτίμησης των απαραίτητων παραμέτρων ποιότητας ισχύος (συμπεριλαμβανομένων και των αρμονικών) κατά τρόπο ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα που είναι αξιόπιστα, επαναλήψιμα, επεκτάσιμα και ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της θέσης μέτρησης και από την ισχύ λειτουργίας της Α/Γ. Η σημασία του προτύπου αναδεικνύεται και από το γεγονός ότι έχει ενσωματωθεί στους Κώδικες Δικτύου των περισσότερων χωρών με αυξημένη αιολική διείσδυση. Ειδικότερα στο Ελληνικό Σύστημα, η συγκεκριμένη απαίτηση καθορίζεται στον Κανονισμό Αδειών Εγκατάστασης και Λειτουργίας Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ, [12].



Σχήμα 3.2. Εφαρμογή προτύπων μέτρησης ποιότητας ισχύος στις ανεμογεννήτριες.

Εκτός από το IEC 61400-21, αξιοσημείωτη συνεισφορά στην πληρότητα των μετρήσεων στις Α/Γ παρέχουν και οι οδηγίες του Δικτύου Εργασιών Μετρήσεων Αιολικής Ενέργειας MEASNET (www.measnet.org), [15], και της Γερμανικής Ομοσπονδίας Αιολικής Ενέργειας, [81], οι οποίες επικεντρώνονται στη διασαφήνιση λεπτομερειών του IEC 61400-21 αλλά και στον καθορισμό

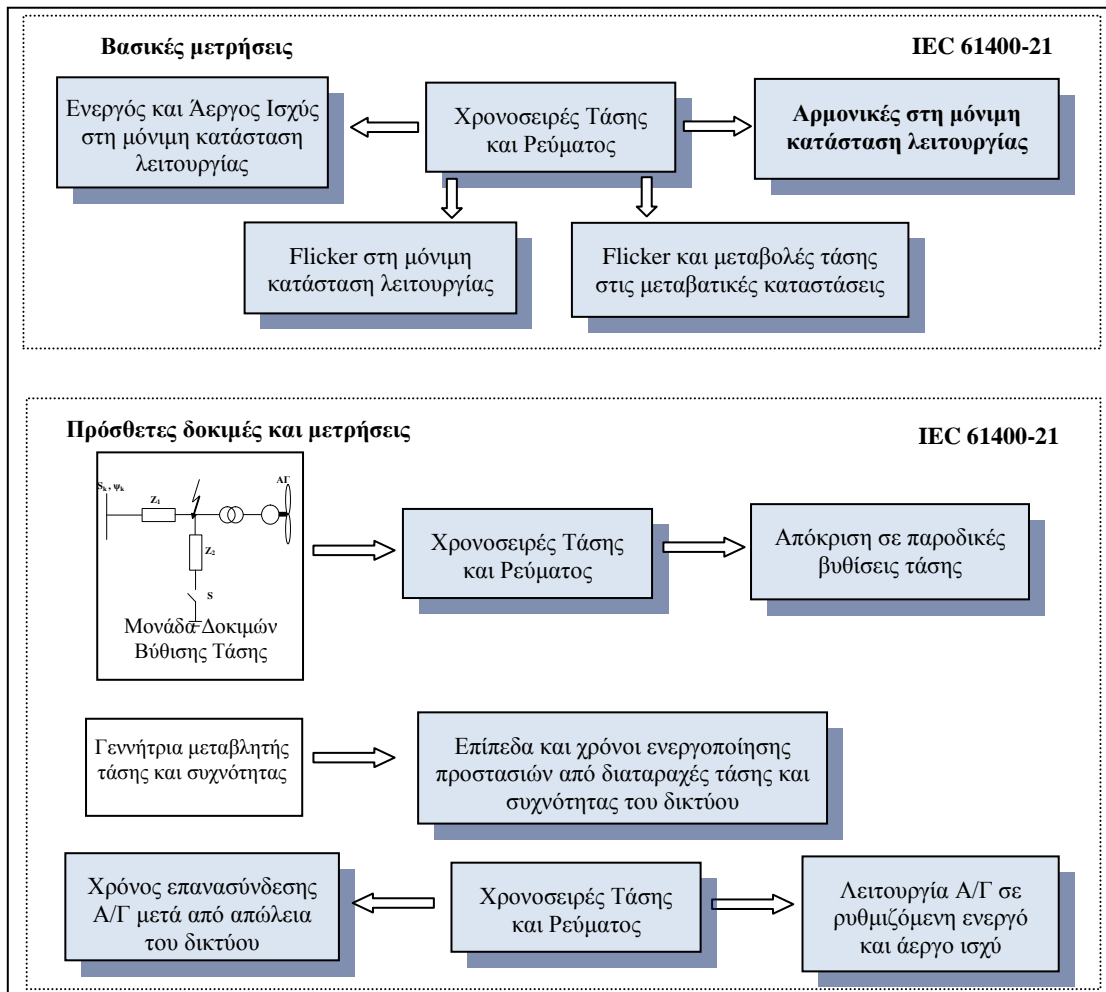
¹³ Συστηματική κατηγοριοποίηση των διαταραχών ποιότητας ισχύος δίνεται στο πρότυπο 1159 της IEEE, [166].

¹⁴ Η TC88 καλύπτει το σύνολο των προτύπων για τις Α/Γ (σειρά 61400), έχοντας ως γενικό στόχο τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου για τη σχεδίαση, τη διασφάλιση ποιότητας και την πιστοποίηση.

εξειδικευμένων απαιτήσεων. Συνοπτικά τα υφιστάμενα πρότυπα μέτρησης ποιότητας ισχύος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Επικεντρώνοντας στο IEC 61400-21, η διαδικασία προβλέπει τη διεξαγωγή συστηματικών μετρήσεων ρεύματος και τάσης σε Α/Γ συνδεδεμένες στο δίκτυο. Βασικοί στόχοι του προτύπου είναι οι ακόλουθοι:

- καθορισμός των παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν για το χαρακτηρισμό της ποιότητας ισχύος Α/Γ που συνδέονται στο δίκτυο.
- καθορισμός της μετρητικής διαδικασίας και της μεθοδολογίας ανάλυσης.
- προσδιορισμός μεθοδολογίας για την αναγωγή των αποτελεσμάτων στο ΣΚΣ Α/Π (ιδιαίτερα flicker και αρμονικών) με βάση τις μετρήσεις από μία Α/Γ.

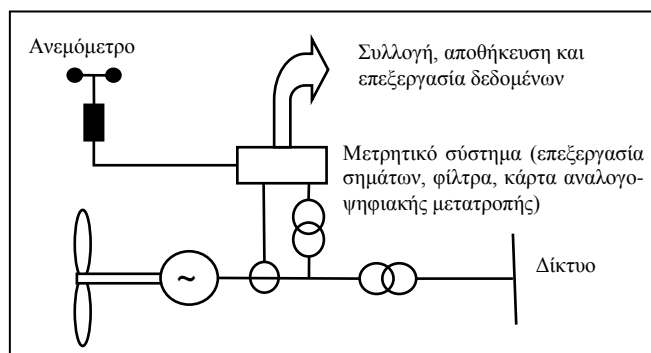
Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται σε πρωτότυπα μοντέλα εγκατεστημένα σε πεδία δοκιμών του κατασκευαστή. Για να θεωρούνται ωστόσο αντιπροσωπευτικές, θα πρέπει να αντιστοιχούν στη λειτουργία της Α/Γ μετά την οριστικοποίηση των παραμέτρων σχεδίασης και των ρυθμίσεων του συστήματος ελέγχου. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται συνοπτική επισκόπηση του περιεχομένου του IEC 61400-21.



Σχήμα 3.3. Συνοπτικό σχηματικό διάγραμμα των απαιτούμενων δοκιμών και μετρήσεων ποιότητας ισχύος σύμφωνα με την τρέχουσα έκδοση του προτύπου IEC 61400-21 (Ed.2).

Η διαδικασία δοκιμών περιλαμβάνει τη διενέργεια μίας σειράς ανεξάρτητων ομάδων μετρήσεων των στιγμιαίων ρευμάτων και φασικών τάσεων (τρία ρεύματα και τρεις τάσεις) στους ακροδέκτες της Α/Γ, σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και με διαφορετικές παραμέτρους μετρήσεων (συχνότητα δειγματοληψίας, χρονική διάρκεια), ανάλογα με το εξεταζόμενο μέγεθος. Οι βασικές συνιστώσες του μετρητικού συστήματος περιλαμβάνουν κατάλληλους αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικών και μετεωρολογικών μεγεθών (Μ/Σ τάσης και έντασης, ανεμόμετρο), καθώς και σύστημα συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ακρίβειας μέτρησης, οι Μ/Σ τάσης και έντασης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον

κλάσης 1, ενώ η ακρίβεια του υπόλοιπου μετρητικού συστήματος (φίλτρα, κάρτα A/D, σύστημα συλλογής δεδομένων) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 1% της ονομαστικής κλίμακας.



Σχήμα 3.4. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μέτρησης ποιότητας ισχύος ανεμογεννήτριας.

Η βασική πρωτογενής πληροφορία των χρονοσειρών ρεύματος και τάσης που προκύπτει από κάθε δοκιμή αξιοποιείται για την εκτίμηση, μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας, των ακόλουθων παραμέτρων, οι οποίες περιλαμβάνονται στα πιστοποιητικά δοκιμών των εμπορικών μοντέλων:

A. Flicker ρεύματος, ενεργός και άεργος ισχύ κατά την κανονική λειτουργία

Για να θεωρείται πλήρης η μέτρηση αυτή θα πρέπει να συλλεχθούν τουλάχιστον 15 δείγματα 10λεπτης διάρκειας (3 φάσεις x 5 καταγραφές) για κάθε βαθμίδα ταχύτητας ανέμου ίσης με 1 m/s, μεταξύ της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας της Α/Γ (cut-in) έως τα 15 m/s. Η προτεινόμενη συχνότητα δειγματοληψίας είναι τουλάχιστον 3200 Hz και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η συχνότητα αποκοπής των χρησιμοποιούμενων φίλτρων¹⁵ είναι τουλάχιστον 400 Hz. Για τη μέτρηση της ταχύτητας ανέμου, συχνότητα δειγματοληψίας 1 Hz θεωρείται επαρκής. Όσον αφορά τις ρυθμίσεις του συστήματος ελέγχου, οι μετρήσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται με την άεργο ισχύ της Α/Γ να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μηδέν (η ρύθμιση της άεργου ισχύος θα πρέπει να ορίζεται $Q=0$, εφόσον το επιτρέπει η τεχνολογία και το σύστημα ελέγχου της εξεταζόμενης Α/Γ).

B. Flicker τάσης και ρεύματος εξόδου κατά τη ζεύξη στο δίκτυο

Προβλέπονται οι ακόλουθες δοκιμές:

- Εκκίνηση σε ταχύτητα ανέμου ίση με την ταχύτητα έναρξης
- Εκκίνηση στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
- Εναλλαγή γεννητριών (σε Α/Γ που χρησιμοποιούν περισσότερες από μία γεννήτριες ή μία γεννήτρια με πολλαπλά τυλίγματα στάτη)

Για τις παραπάνω περιπτώσεις ισχύουν οι εξής απαιτήσεις:

- η προτεινόμενη συχνότητα δειγματοληψίας είναι τουλάχιστον 12800 Hz με την ελάχιστη αποδεκτή συχνότητα αποκοπής των φίλτρων μέτρησης να ορίζεται στα 1500 Hz.
- η διάρκεια των καταγραφών θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η απαλειφή του μεταβατικού φαινομένου και η αποκατάσταση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της Α/Γ. Ως ενδεικτικός χρόνος, ιδιαίτερα στην εκκίνηση υπό ονομαστική ταχύτητα ανέμου, θεωρούνται τα 2 min.
- κάθε δοκιμή εκκίνησης πρέπει να επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 5 φορές.
- η συχνότητα δειγματοληψίας της ταχύτητας ανέμου ορίζεται στο 1 Hz με τη μέση τιμή λεπτού κατά τη στιγμή της δοκιμής να πρέπει να βρίσκεται εντός του εύρους ± 2 m/s της ταχύτητας έναρξης ή της ονομαστικής
- οι μετρήσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται με την άεργο ισχύ της Α/Γ να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μηδέν.

Γ. Ακέραιες και ενδιάμεσες αρμονικές ρεύματος κατά την κανονική λειτουργία και αρμονική παραμόρφωση ρεύματος έως 9 kHz

Θα πρέπει να εκτιμηθούν οι αρμονικές ρεύματος σε όλο το εύρος λειτουργίας της Α/Γ με την ελάχιστη απαίτηση να καθορίζεται στα 9 δείγματα τάσης και ρεύματος διάρκειας 10λέπτου για κάθε βαθμίδα ισχύος εύρους 10% της ονομαστικής. Η προτεινόμενη συχνότητα δειγματοληψίας είναι τα




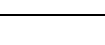
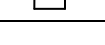
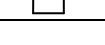
¹⁵ Τεχνικές λεπτομέρειες για τις προδιαγραφές του συστήματος μέτρησης ποιότητας ισχύος περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

51.2 kHz με τη συχνότητα αποκοπής να επιτρέπει τον υπολογισμό των αρμονικών έως τα 9 kHz. Παράλληλα προβλέπεται και η εκτίμηση των αρμονικών τάσης για όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η διαδικασία εκτίμησης των αρμονικών θα πρέπει να ακολουθεί το πρότυπο IEC 61000-4-7. Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση οι μετρήσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται με την άεργο ισχύ της Α/Γ να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μηδέν.

Η πλήρης περιγραφή της μεθοδολογίας εκτίμησης των αρμονικών που προδιαγράφεται στο IEC 61000-4-7 περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

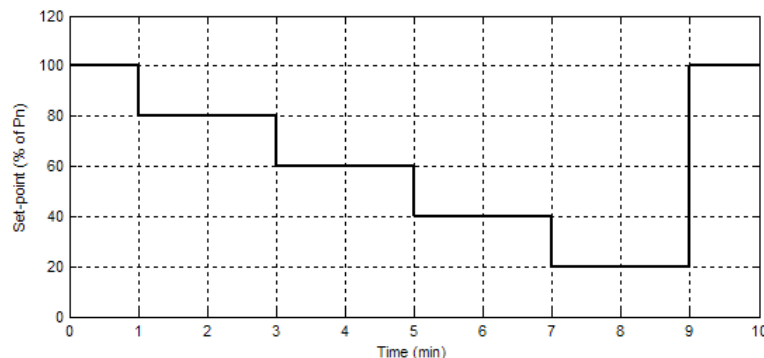
Δ. Απόκριση σε βυθίσεις τάσης

Οι δοκιμές απόκρισης της Α/Γ σε βυθίσεις τάσης αφορούν τις έξι περιπτώσεις που περιγράφονται στον Πίνακα 3.5 και θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε δύο επίπεδα παραγόμενης ισχύος: (α) μεταξύ 10 και 30% της ονομαστικής και (β) > 90% της ονομαστικής. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με σκοπό τον έλεγχο της απόκρισης των Α/Γ σε βυθίσεις τάσης που προέρχονται από σφάλματα στο δίκτυο καθώς και για την επαλήθευση των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές και οι φορείς πιστοποίησης στις φάσεις σχεδίασης και πιστοποίησης αντίστοιχα. Προφανώς, οι βυθίσεις τάσης που προβλέπονται στον Πίνακα 3.5 δεν είναι δυνατό να καλύψουν όλες τις επιμέρους απαιτήσεις των διαφόρων κωδικών δικτύου που ισχύουν σε κάθε χώρα. Στην περίπτωση που απαιτείται η πιστοποίηση συμβατότητας με συγκεκριμένο κώδικα, τότε ο Πίνακας μπορεί να συμπληρωθεί με πρόσθετες χαρακτηριστικές βύθισης τάσης, ενώ οι δοκιμές Β1 έως Β6 παρέχουν μία κοινή βάση δεδομένων για τη συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης διάφορων μοντέλων Α/Γ στο στάδιο της πιστοποίησης. Οι δοκιμές Β1 και Β4 αναφέρονται σε μηχανές που δεν διαθέτουν δυνατότητα FRT και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την επαλήθευση αριθμητικών μοντέλων.

Πίνακας 3.5. Καθορισμός βυθίσεων τάσης αναφοράς σύμφωνα με το IEC 61400-21				
Είδος βύθισης τάσης	Μέτρο πολικής τάσης (ποσοστό της τάσης πριν το σφάλμα)	Μέτρο τάσης θετικής ακολουθίας (ποσοστό της τάσης πριν το σφάλμα)	Διάρκεια (s)	Μορφή
B1. Συμμετρική τριφασική	0.90 ± 0.05	0.90 ± 0.05	0.5 ± 0.02	
B2. Συμμετρική τριφασική	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.05	0.5 ± 0.02	
B3. Συμμετρική τριφασική	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.05	0.2 ± 0.02	
B4. Διφασική	0.90 ± 0.05	0.95 ± 0.05	0.5 ± 0.02	
B5. Διφασική	0.50 ± 0.05	0.75 ± 0.05	0.5 ± 0.02	
B6. Διφασική	0.20 ± 0.05	0.60 ± 0.05	0.2 ± 0.02	

Ε. Έλεγχος δυνατότητας περιορισμού στον ρυθμό ανάληψης ενεργού ισχύος και λειτουργίας με ρυθμιζόμενη ενεργό ισχύ

Προβλέπεται η καταγραφή και ο έλεγχος της δυνατότητας λειτουργίας της Α/Γ σε καταστάσεις: (α) περιορισμού του ρυθμού ανάληψης ισχύος στο 10% της ονομαστικής ανά λεπτό για διάστημα 10 min και (β) σε συγκεκριμένη ρύθμιση της ισχύος εξόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

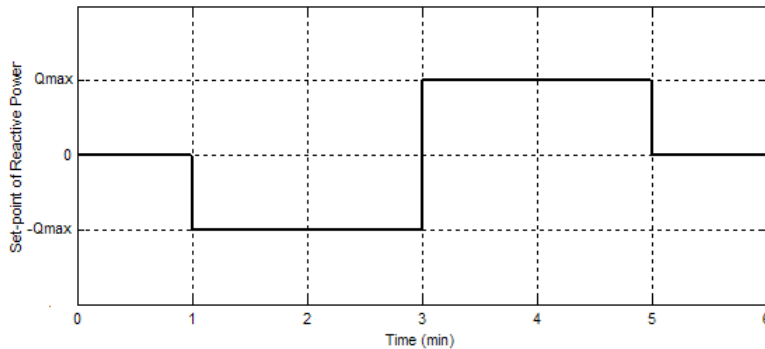


Σχήμα 3.4. Δοκιμή λειτουργίας ανεμογεννήτριας με ρυθμιζόμενη ενεργό ισχύ.

ΣΤ. Έλεγχος τήρησης των μέγιστων ορίων θετικής και αρνητικής άεργου ισχύος (χωρητική και επαγωγική συμπεριφορά) αλλά και λειτουργίας με ρυθμιζόμενη άεργο ισχύ

Για τη μέτρηση της άεργου ισχύος προβλέπονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- (α) καταγραφή της μεταβολής της άεργου ισχύος σε συνάρτηση με την ενεργό ισχύ (βήματα 0, 10 ... 100% της ονομαστικής ισχύος) όταν το σύστημα ελέγχου είναι ρυθμισμένο στη μέγιστη επαγωγική άεργο ισχύ, στη μέγιστη χωρητική άεργο ισχύ και σε μηδενική άεργο ισχύ και
- (β) σε συγκεκριμένη ρύθμιση της άεργου ισχύος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5, όταν η ενεργός ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι στο 50% της ονομαστικής.



Σχήμα 3.5. Δοκιμή λειτουργίας ανεμογεννήτριας με ρυθμιζόμενη άεργο ισχύ

Z. Έλεγχος λειτουργίας προστασιών και χρόνου επανασύνδεσης μετά από σφάλματα δικτύου

Προβλέπεται ο έλεγχος της λειτουργικότητας του συστήματος προστασίας της Α/Γ από διαταραχές τάσης και συχνότητας που συμβαίνουν στο δίκτυο. Ειδικότερα ελέγχονται οι πραγματικές τιμές υπέρ/υπότασης και υπέρ/υποσυχνότητας στις οποίες λειτούργησε η αντίστοιχη προστασία, σε σχέση με τις τιμές στις οποίες ήταν ρυθμισμένη. Επίσης μετρώνται οι πραγματικοί χρόνοι αντίδρασης των προστασιών σε σχέση με τις ρυθμίσεις. Τέλος, απαιτείται η μέτρηση του χρόνου επανασύνδεσης της Α/Γ σε περίπτωση απώλειας δικτύου για διαστήματα 10 s, 1 min και 10 min αντίστοιχα. Ως χρόνος επανασύνδεσης ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί από την επάνοδο της τάσης μέχρι τη στιγμή που η Α/Γ ξεκινά να παράγει και πάλι ισχύ.

H. Έλεγχος προϋπάρχουσας κατάσταση του δικτύου

Η γνώση της κατάστασης του δικτύου είναι σημαντική για την εξασφάλιση της όσο το δυνατόν μικρότερης επίδρασής του στη λειτουργία της Α/Γ και κατ' επέκταση στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Παράμετροι που θα πρέπει να καταγράφονται είναι η συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης (με την Α/Γ εντός και εκτός λειτουργίας), η διακύμανση και ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας του δικτύου, το επίπεδο και ο συντελεστής ασυμμετρίας τάσης στους ακροδέκτες της Α/Γ και η ένταση της τύρβης του ανέμου, ενώ πρέπει να δηλώνονται και η ισχύς βραχυκύκλωσης στο ΣΚΣ και η σύνθετη αντίσταση δικτύου. Συνολικά, οι προϋποθέσεις για τη διεξαγωγή μετρήσεων ποιότητας ισχύος, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Αρμονική παραμόρφωση τάσης	$THD_{V_{10min}} = \sqrt{\sum_{i=2}^{50} \left(\frac{U_i}{U_1}\right)^2} < 5\%$
Διακύμανση συχνότητας	$f_{0.2s}(t)/f_{nom} < \pm 1\%$
Ρυθμός μεταβολής συχνότητας	$\frac{\Delta f_{0.2s}}{\Delta t} < 0.2\% \cdot f_{nom}, \Delta t = 0.2s$
Αργές μεταβολές τάσης	$U_{10min}(t)/U_{nom} < 10\%$
Συντελεστής ασυμμετρίας τάσης, [258]	$U_{UF} = \frac{\max\{(U_a - \bar{U}), (U_b - \bar{U}), (U_c - \bar{U})\}}{\bar{U}} < 2\%$
Ισχύς βραχυκύκλωσης, σύνθετη αντίσταση δικτύου και ένταση τύρβης ανέμου	Πρέπει να δηλώνονται στην έκθεση μετρήσεων

Η διαδικασία μέτρησης και εκτίμησης των παραμέτρων ποιότητας ισχύος του IEC 61400-21 έχει υιοθετηθεί και ακολουθείται από όλα τα εξειδικευμένα εργαστήρια μετρήσεων σε Α/Γ και τα αποτελέσματα που προκύπτουν περιλαμβάνονται στα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος του συνόλου σχεδόν των εμπορικών Α/Γ.

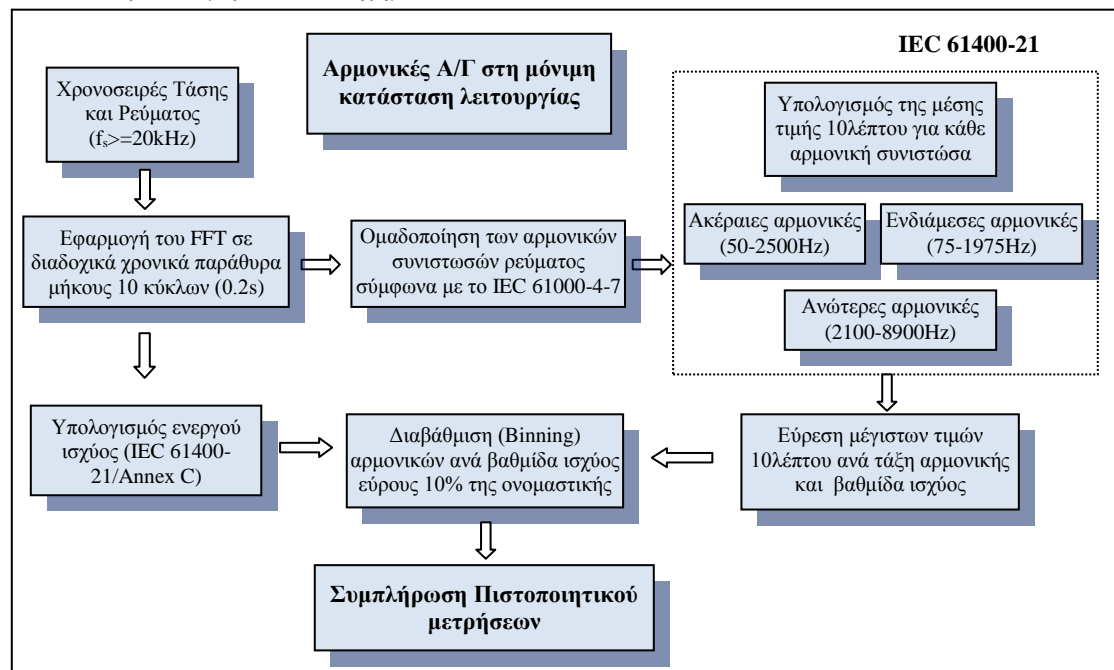
Πρόσθετες απαιτήσεις δοκιμών τίθενται από τη σχετική Γερμανική Οδηγία, [81], όσον αφορά τα ακόλουθα:

- Συμπεριφορά της Α/Γ σε συνθήκες υπερσυχνότητας.
- Έλεγχος της ισχύος και του συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση της τάσης.
- Καταγραφή της συμπεριφοράς της Α/Γ κατά το απότομο σταμάτημα (cut-out) στην ονομαστική ταχύτητα του ανέμου.
- Συμπεριφορά της Α/Γ σε συχνότητα και τάση διαφορετικές από την ονομαστική.

Τέλος, η οδηγία του δικτύου εργαστηρίων MEASNET, [15], κατά βάση υιοθετεί το πρότυπο IEC 61400-21, περιλαμβάνει ωστόσο πρόσθετες λεπτομέρειες με στόχο το βέλτιστο συντονισμό μεταξύ των ανεξάρτητων εργαστηρίων που διεξάγουν τις μετρήσεις ποιότητας ισχύος.

3.4. Μετρήσεις αρμονικών ανεμογεννητριών κατά IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7

Η μέτρηση των αρμονικών συνιστωσών των Α/Γ αποτελεί ιδιαίτερο κομμάτι της συνολικής διαδικασίας μετρήσεων ποιότητας ισχύος και απαιτεί μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας (> 20 kHz), συγκεκριμένες προδιαγραφές για το μετρητικό εξοπλισμό και ιδιαίτερη μεθοδολογία ανάλυσης των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, όπως περιγράφονται λεπτομερώς στο IEC 61000-4-7, το οποίο είναι το γενικό πρότυπο μέτρησης αρμονικών για κάθε τύπο εξοπλισμού. Ουσιαστικά, υιοθετώντας τις απαιτήσεις του IEC 61000-4-7, η συμβολή του IEC 61400-21 στη μέτρηση των αρμονικών αφορά την κατάστρωση συστηματικής μεθοδολογίας ελέγχου προσαρμοσμένης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Α/Γ, όπως συνοψίζεται στο Σχήμα 3.6.



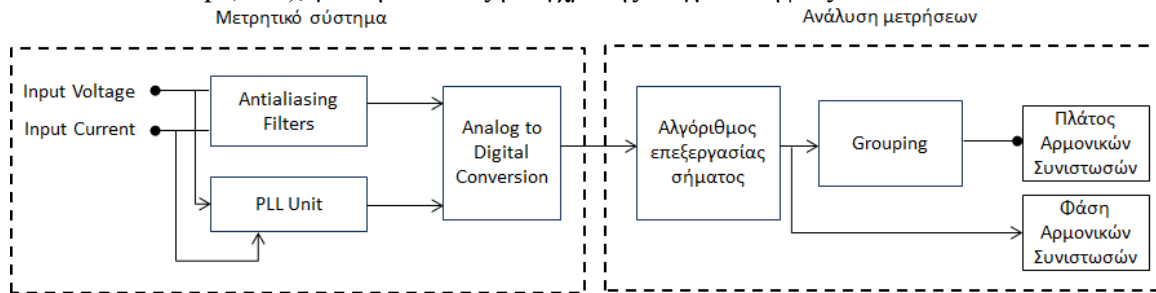
Σχήμα 3.6. Επισκόπηση διαδικασίας μέτρησης και εκτίμησης αρμονικών Α/Γ σύμφωνα με το IEC 61400-21.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συνεχή καταγραφή της τάσης και του ρεύματος κατά την κανονική λειτουργία της Α/Γ με συχνότητα δειγματοληψίας τουλάχιστον ίση με 20 kHz και την εκτίμηση τριών ομάδων αρμονικών ρεύματος (ακέραιες, ενδιάμεσες και ανώτερες έως 9 kHz) για όλο το εύρος της ισχύος λειτουργίας¹⁶. Η πληρότητα της μέτρησης διασφαλίζεται εφόσον συλλεχθούν κατ' ελάχιστο 9 χρονοσειρές ρεύματος διάρκεια 10 λεπτών για κάθε βαθμίδα ισχύος εύρους 10%, από 0 έως 100% της

¹⁶ Ο υπολογισμός της ισχύος βασίζεται στην εφαρμογή του FFT στις χρονοσειρές τάσης και ρεύματος για την απομόνωση της θεμελιώδους συνιστώσας, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IEC 61400-21/Annex C, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

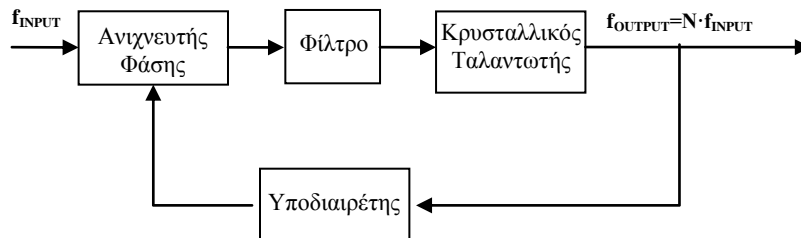
ονομαστικής ισχύος. Οι καταγραφές τάσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστοιχης ισχύος καθώς και της υφιστάμενης αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου, όπου συνδέεται η Α/Γ.

Η διαδικασία εκτίμησης των αρμονικών περιλαμβάνει δύο στάδια, όπως εικονίζονται στο Σχήμα 3.7: το στάδιο μέτρησης και το στάδιο επεξεργασίας. Κατά το πρώτο στάδιο, τα αναλογικά σήματα εξόδου των μετασχηματιστών τάσης και έντασης (V ή mA), αφού περάσουν από κατάλληλη μονάδα φίλτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου *aliasing*, οδηγούνται σε κάρτα αναλογοψηφιακής μετατροπής (A/D), όπου δειγματοληπτούνται και καταγράφονται σε μονάδα αποθήκευσης δεδομένων για τη μετέπειτα επεξεργασία. Η βαθμίδα A/D περιλαμβάνει διάταξη Track and Hold (T/H), η οποία διαχειρίζεται το χρονισμό αποθήκευσης των λαμβανόμενων σημάτων σε συνεργασία με μονάδα Phase-Locked-Loop (PLL), για την επίτευξη σύγχρονης δειγματοληψίας.



Σχήμα 3.7. Διάταξη συστήματος μέτρησης και ανάλυσης αρμονικών κατά IEC 61000-4-7

Η λειτουργία του PLL επιτυγχάνει το συγχρονισμό της συχνότητας δειγματοληψίας με τη συχνότητα του εξεταζόμενου σήματος, ώστε ο αριθμός των δειγμάτων σε κάθε πραγματική περίοδο του σήματος να παραμένει σταθερός σε ολόκληρη τη διάρκεια της μέτρησης. Το τυπικό μπλοκ διάγραμμα ενός PLL εικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Ο τρόπος λειτουργίας του περιλαμβάνει τη σύγκριση της φάσης του σήματος με τη φάση ενός τεχνητού σήματος που δημιουργείται από κατάλληλο κρυσταλλικό ταλαντωτή. Στη συνέχεια η διάταξη προσαρμόζει τη φάση του ταλαντωτή στη φάση του σήματος και επομένως τα δύο σήματα έχουν ακριβώς την ίδια φάση. Η τεχνική PLL είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επίτευξη σύγχρονης δειγματοληψίας γιατί επιτρέπει πολλαπλά σήματα να «κλειδώνουν» τη φάση τους με ένα σήμα αναφοράς. Άμεση συνέπεια αυτής της ιδιότητας είναι η καταγραφή των μετρήσεων όλων των σημάτων ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.8. Μπλοκ διάγραμμα μονάδας PLL.

Η διάταξη συγχρονισμού με τη συχνότητα του δικτύου θα πρέπει να χρησιμοποιείται οπωσδήποτε για τη μέτρηση των συχνοτήτων τουλάχιστον έως 2 kHz. Για την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας μέτρησης, το μήκος του χρονικού παραθύρου T_w πρέπει να συγχρονίζεται με την πραγματική διάρκεια ακέραιου αριθμού κύκλων της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου 50 Hz, σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_w = t_{N+1} - t_1 = \Delta T_{Actual} \pm 0.03\% \quad (3.7)$$

όπου t_N είναι η χρονική στιγμή λήψης του N-οστού δείγματος και ΔT_{Actual} είναι η πραγματική διάρκεια του επιθυμητού αριθμού κύκλων της συχνότητας του δικτύου. Η υλοποίηση της τεχνικής PLL με χρήση hardware θεωρείται ταχύτερη σε σχέση με άλλες τεχνικές που βασίζονται στην χρήση software και απασχολεί αξιοσημείωτο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας για τα συστήματα ποιότητας ισχύος, [104], [276], [277]. Δεν αποκλείονται ωστόσο εναλλακτικές μέθοδοι συγχρονισμού με χρήση λογισμικού, όπως τα ψηφιακά φίλτρα, [152], [278], [279], η εφαρμογή μεθόδων φασματικής ανάλυσης όπως ο μετασχηματισμός Chirp-Z, [276], ή η ρυθμιζόμενη συχνότητα δειγματοληψίας, [106]. Σημειώνεται ότι το IEC 61000-4-7 επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών μεθόδων συγχρονισμού αρκεί η ακρίβεια στη μέτρηση οποιασδήποτε συχνότητας να είναι μικρότερη από $\pm 5\%$ της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος.

Μετά την αναλογιοηφιακή μετατροπή, τα δεδομένα τάσης και ρεύματος αποθηκεύονται σε μονάδα μνήμης και μπορούν να αναλυθούν με την εφαρμογή κατάλληλου αλγόριθμου επεξεργασίας σήματος. Προκειμένου να διευκολύνεται η σχεδίαση του μετρητικού συστήματος και να διατηρείται κοινή μεθοδολογία για τα συστήματα 50 Hz και 60 Hz, το μήκος του χρονικού παραθύρου ορίζεται σε 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας για τα συστήματα με θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz και σε 12 κύκλους για τα συστήματα 60 Hz, που θεωρητικά αντιστοιχούν σε κοινό διάστημα ίσο με 200 ms.

Η ανάλυση των μετρήσεων για την εκτίμηση των αρμονικών ρεύματος, βασίζεται στη μεθοδολογία της ομαδοποίησης (grouping) των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν από την εφαρμογή του FFT στις πρωτογενείς χρονοσειρές. Η μεθοδολογία αυτή υιοθετείται από το IEC 61400-21 για τον υπολογισμό των αρμονικών συνιστωσών των Α/Γ στα πιστοποιητικά μετρήσεων και περιγράφεται με λεπτομέρεια στην επόμενη παράγραφο.

3.5. Μεθοδολογία ομαδοποίησης (Grouping) αρμονικών συνιστωσών

Η εκτίμηση των αρμονικών σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-7 βασίζεται στην εφαρμογή του STFT, η υλοποίηση του οποίου πραγματοποιείται μέσω του FFT με διακριτότητα συχνότητας ίση με 5 Hz, που αντιστοιχεί στην επιλογή χρονικού μήκους παραθύρου 200 ms ($\Delta f=1/T_w$). Η τιμή αυτή επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά των σημάτων τάσεων και ρεύματος στα ΣΗΕ και αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και της ακρίβειας στον υπολογισμό των αναμενόμενων συχνοτήτων, [110], [132]. Όσον αφορά την επιλογή της «παραθυρικής» συνάρτησης και με την προϋπόθεση χρήσης PLL για την εξασφάλιση σύγχρονης δειγματοληψίας, το πρότυπο υποδεικνύει τη χρήση «κλασικού» τετραγωνικού παραθύρου, μη επικαλυπτόμενου, για τη στάθμιση των N δειγμάτων του χρονικού παραθύρου T_w . Η χρήση εναλλακτικών συναρτήσεων, όπως το παράθυρο *Hanning*, επιτρέπεται μόνο σε περίπτωση απώλειας συγχρονισμού, αλλά τότε τα δεδομένα θα πρέπει να σημαίνονται. Συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των δύο τύπων παραθυρικών συναρτήσεων επιχειρείται στις αναφορές [107], [108] και [280]. Εφαρμόζοντας τις δύο συναρτήσεις για τον υπολογισμό του πλάτους αρμονικών συνιστωσών σε παραδείγματα τυπικών σημάτων ποιότητας ισχύος, διαπιστώνεται ότι γενικά το τετραγωνικό παράθυρο υπερτερεί σε ακρίβεια του *Hanning*. Όσον αφορά τον όρο «μη επικαλυπτόμενα» χρονικά παράθυρα, σημαίνει ότι ο FFT επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά χρονικά βήματα ίσα με το χρονικό παράθυρο των 200 ms. Μικρότερο βήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ειδικές περιπτώσεις, όπου αναζητείται η διακύμανση κάποιας αρμονικής συνιστώσας σε μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Η πιο αξιοσημείωτη καινοτομία που εισάγει το IEC 61000-4-7 για την αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής των αρμονικών και τη βελτίωση της ακρίβειας στον υπολογισμό τους, είναι η εφαρμογή της «ομαδοποίησης» (grouping). Η βασική ιδέα είναι ότι, σε συνθήκες απώλειας συγχρονισμού ή διακύμανσης της θεμελιώδους συχνότητας, το φάσμα που προκύπτει από την εφαρμογή του FFT περιλαμβάνει, εκτός από τις πραγματικές αρμονικές, μία σειρά γειτονικών «ψευδών» αρμονικών, ως προϊόν φασματικής διαρροής, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη στον τελικό υπολογισμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του τετραγωνικού αθροίσματος της ενεργού (rms) τιμής της κύριας ακέραιης αρμονικής συνιστώσας και των rms τιμών κατάλληλα επιλεγμένου αριθμού γειτονικών μη ακέραιων αρμονικών.

Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθοδολογίας ομαδοποίησης βασίζεται στην ισοδυναμία της ισχύος (ή της ενέργειας) του εξεταζόμενου σήματος όταν εκφράζεται στο πεδίο του χρόνου, με την αντίστοιχη ισχύ (ή ενέργεια) όταν εκφράζεται στο πεδίο της συχνότητας, όπως αποδίδεται μέσω της εξίσωσης Parseval, γνωστής και ως ενεργειακό θεώρημα Rayleigh, [13]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [x(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(j\omega)|^2 d\omega \quad (3.8)$$

όπου $x(t)$ είναι το εξεταζόμενο σήμα στο πεδίο του χρόνου και $X(j\omega)$ ο μιγαδικός μετασχηματισμός Fourier, ενώ $\omega=2\pi f$.

Ποιοτικά, η εξίσωση 3.8 τεκμηριώνεται ως εξής: Δεδομένου ότι το τετράγωνο ενός σήματος εκφράζει την ισχύ του (P), το αριστερό σκέλος της εξίσωσης 3.8 έχει διαστάσεις ενέργειας ($P \cdot t$). Ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος $X(j\omega)$ έχει διαστάσεις τις μονάδες του σήματος ανά Hz (1/s) και επομένως το δεξί σκέλος της 3.8 θα έχει επίσης διαστάσεις ενέργειας ($P/f=P \cdot t$). Εάν το σήμα $x(t)$ δεν είναι περιοδικό, τότε το φάσμα του είναι συνεχές. Όταν όμως είναι περιοδικό μπορεί να θεωρηθεί

ότι επαναλαμβάνεται άπειρες φορές εντός πεπερασμένου χρονικού παραθύρου T_w , οπότε ο μετασχηματισμός Fourier δεν είναι πλέον συνεχής αλλά περιλαμβάνει μεμονωμένες φασματικές γραμμές με διακριτότητα $f_w=1/T_w$. Το γινόμενο του χρονικού παραθύρου T_w και της τετραγωνικής rms τιμής X_k^2 της μιγαδικής συνιστώσας στη συχνότητα $f=k \cdot f_w$ αντιστοιχεί στην ενέργεια της συνεχούς φασματικής πυκνότητας που προκύπτει με ολοκλήρωση στην περιοχή $f-f_w/2$ έως $f+f_w/2$. Το ενεργειακό άθροισμα όλων των φασματικών συνιστωσών είναι ισοδύναμο με την ενέργεια του σήματος στο πεδίο του χρόνου εντός του συγκεκριμένου χρονικού παραθύρου. Διαιρώντας την ενέργεια με το χρονικό παράθυρο T_w προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{1}{T_w} \int_{-\frac{T_w}{2}}^{+\frac{T_w}{2}} [x(t)]^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |X_k|^2 \quad (3.9)$$

όπου το αριστερό σκέλος αντιστοιχεί στη μέση ισχύ του σήματος μέσα στο παράθυρο και το δεξί σκέλος στη συνολική ισχύ όλων των φασματικών γραμμών.

Το χαρακτηριστικό του μετασχηματισμού Fourier είναι ότι οι φασματικές γραμμές στις αρνητικές συχνότητες είναι συζυγείς μιγαδικοί των γραμμών στις αντίστοιχες θετικές συχνότητες, δηλαδή το φάσμα ισχύος είναι συμμετρικό ως προς τη μηδενική συχνότητα ($f=0$). «Διπλώνοντας» το αρνητικό μέρος του φάσματος στη θετική πλευρά, η εξίσωση 3.9 απλοποιείται ως εξής:

$$\frac{1}{T_w} \int_{-\frac{T_w}{2}}^{+\frac{T_w}{2}} [x(t)]^2 dt = X_0^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} |X_k|^2 \quad (3.10)$$

Δεδομένου ότι στην εξίσωση 3.10 οι συντελεστές X_k είναι μιγαδικοί, το «δίπλωμα» του φάσματος στις θετικές συχνότητες έχει ως συνέπεια την υπέρθεση των συμμετρικών συνιστωσών του φάσματος και την εμφάνιση τους στο τελικό φάσμα με διπλάσιο πλάτος, εκτός από τη dc συνιστώσα:

$$C_k = 2 \times X_k \rightarrow C_{k_{RMS}} = \sqrt{2} \times X_k \quad (3.11)$$

Με βάση την εξίσωση 3.11, η 3.10 γράφεται:

$$\frac{1}{T_w} \int_{-\frac{T_w}{2}}^{+\frac{T_w}{2}} [x(t)]^2 dt = C_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} |C_{k_{RMS}}|^2 = \sum_{k=0}^{\infty} |C_{k_{RMS}}|^2 \quad (3.12)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι εκφρασμένες θεωρώντας συνεχή σήματα. Σε διακριτή μορφή η 3.12 γράφεται:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t_i)]^2} = \sqrt{\sum_{k=0}^{N/2} |C_{k_{RMS}}|^2} \quad , N=f_s \times T_w, t_i=i \times T_w/N \quad (3.13)$$

εφόσον τηρούνται οι ακόλουθες βασικές προϋποθέσεις:

- Η επιλεγθείσα συχνότητα δειγματοληψίας f_s ικανοποιεί το θεώρημα του Shannon, σύμφωνα με το οποίο θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την ανώτερη συχνότητα που είναι παρούσα στο σήμα ($f_s > 2 \times f_k$). Προφανώς για να έχει επιτευχθεί αυτό θα πρέπει το μετρητικό σύστημα να περιλαμβάνει κατάλληλα φίλτρα αποκοπής.
- Το σήμα είναι περιοδικό και το χρονικό παράθυρο είναι συγχρονισμένο με την περίοδο.

Η εξίσωση 3.13 επιβεβαιώνει ότι και σε διακριτή μορφή, το rms περιεχόμενο των συνιστωσών του σήματος στο πεδίο της συχνότητας ισούται με το rms περιεχόμενο στο πεδίο του χρόνου. Θεωρώντας ότι ισχύουν οι παραπάνω βασικές προϋποθέσεις, το φάσμα ισχύος που υπολογίζεται, αντιστοιχεί στη μέση ισχύ των φασματικών συνιστωσών που περιλαμβάνονται στο σήμα κατά τη διάρκεια του θεωρούμενου χρονικού παραθύρου. Επομένως, το φάσμα ισχύος αναπαριστά επακριβώς τη συνολική ισχύ του σήματος, την ισχύ των επιμέρους φασματικών συνιστωσών και τη συχνότητα τους, εφόσον βέβαια όλες οι συνιστώσες είναι ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας $f_w=1/T_w$ (τυπικά ίση με 5 Hz).

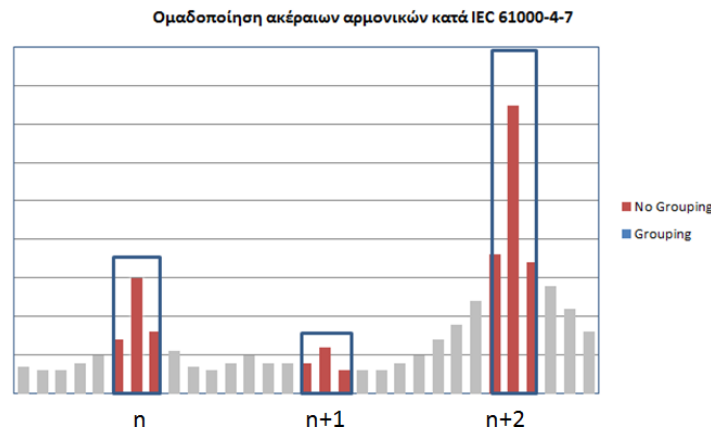
Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης του IEC 61000-4-7, όπως υιοθετείται από το IEC 61400-21, διαχωρίζει τις αρμονικές συνιστώσες σε τρεις κατηγορίες, τις οποίες υπολογίζει θεωρώντας διαφορετικό αριθμό διαδοχικών φασματικών γραμμών από το προκύπτον φάσμα του FFT, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

3.5.1 Εκτίμηση των ακέραιων αρμονικών υποομάδων χαμηλής τάξης (έως 2.5 kHz)

Για τις ακέραιες αρμονικές χαμηλής τάξης (έως 50th), το «πραγματικό» μέγεθος G_n της αρμονικής n -τάξης προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων της κύριας συχνότητας $n \cdot f_1$ που προκύπτει από τον FFT και των δύο πλευρικών αρμονικών (sidebands) στα $n \cdot f_1 \pm 5$ Hz:

$$G_n^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{n-50+i}^2 \quad (3.14)$$

όπου C είναι οι συντελεστές που προκύπτουν από τον FFT και αντιστοιχούν στις ενεργές τιμές των αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση της ομαδοποίησης ακέραιων αρμονικών έως 2.5kHz σύμφωνα με το IEC 61000-4-7.

Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται γραφικά η επίδραση της ομαδοποίησης ακέραιων αρμονικών συνιστωσών δύο γειτονικών τάξεων n και $n+1$, σύμφωνα με το IEC 61000-4-7. Οι κόκκινες ράβδοι αντιστοιχούν στους συντελεστές C_i του FFT για κάθε βήμα συχνότητας i , ίσο με 5 Hz που λαμβάνονται υπόψη στην ομαδοποίηση, ενώ οι διαφανείς πλατιές ράβδοι με μπλε περίγραμμα είναι οι προκύπτοντες συντελεστές ομαδοποίησης G_n με κέντρο την αντίστοιχη ακέραια αρμονική n τάξης, υπολογιζόμενες από τη σχέση 3.14. Με γκριζό χρώμα απεικονίζονται οι συντελεστές Fourier που θεωρούνται ότι δεν συνεισφέρουν στο ενεργειακό περιεχόμενο της κάθε ακέραιης αρμονικής και επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της σχέσης 3.14.

Από τις ακέραιες αρμονικές συνιστώσες ρεύματος που προκύπτουν μετά την εφαρμογή της ομαδοποίησης, υπολογίζεται στη συνέχεια και η «προσαρμοσμένη» συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος (Total Harmonic Current distortion – THC), ως ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος της Α/Γ, σύμφωνα με τη σχέση:

$$THC = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_H^2}}{I_N} \quad (3.15)$$

3.5.2 Εκτίμηση των ενδιάμεσων αρμονικών υποομάδων (75 έως 1975 Hz)

Οι ενδιάμεσες αρμονικές (interharmonics) υπολογίζονται σε ενδιάμεσες συχνότητες ανάμεσα στις ακέραιες αρμονικές $(n+0.5) \cdot f_1$, (π.χ. στα 75, 125, 175 Hz κ.λπ. για θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz), μέσω της άθροισης των συντελεστών FFT μέσα σε ένα εύρος συχνοτήτων ± 15 Hz γύρω από το μέσο της αντίστοιχης ζώνης (π.χ. από 60 Hz έως 90 Hz για τη μη ακέραιη συνιστώσα των 75 Hz), σύμφωνα με τη σχέση:

$$G_{n+0.5}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{n-50+i}^2 \quad (3.16)$$

Όπως προκύπτει από τη σχέση 3.16, για τον υπολογισμό κάθε ενδιάμεσης αρμονικής λαμβάνονται υπόψη περισσότερες των δύο συχνότητες εκατέρωθεν αυτής.

Η λογική της μεθοδολογίας αντικατοπτρίζεται πιο παραστατικά στο Σχήμα 3.10, όπου με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι πρωτογενείς συντελεστές Fourier που προκύπτουν από την εφαρμογή του FFT και με διακεκομμένο μπλε χρώμα το περίγραμμα των ενδιάμεσων αρμονικών που συνυπολογίζονται κατά την ομαδοποίηση, οι οποίες στον πίνακα αποτελεσμάτων αντιστοιχίζονται στην κεντρική συχνότητα κάθε ομάδας. Στην εξίσωση δεν λαμβάνονται υπόψη οι συνιστώσες $n \cdot f_1 \pm 5$ Hz, οι οποίες έχουν θεωρηθεί στον υπολογισμό των ακέραιων αρμονικών.

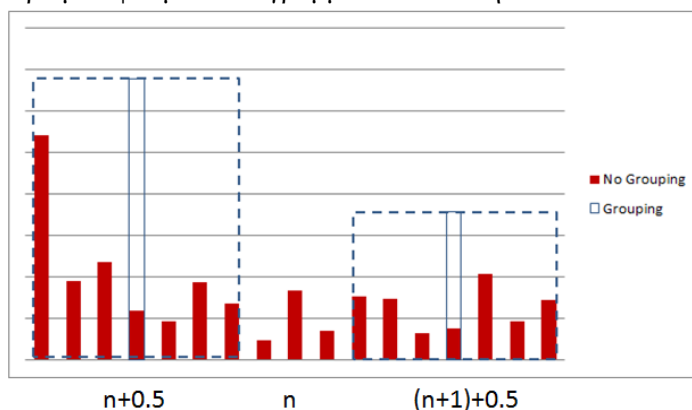
3.5.3 Εκτίμηση ανώτερων αρμονικών από 2 έως 9 kHz

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μέτρησης ανώτερων αρμονικών συνιστωσών είναι ότι οι απαιτήσεις σε διακριτότητα συχνότητας είναι λιγότερο αυστηρές σε σχέση με τις αρμονικές χαμηλής

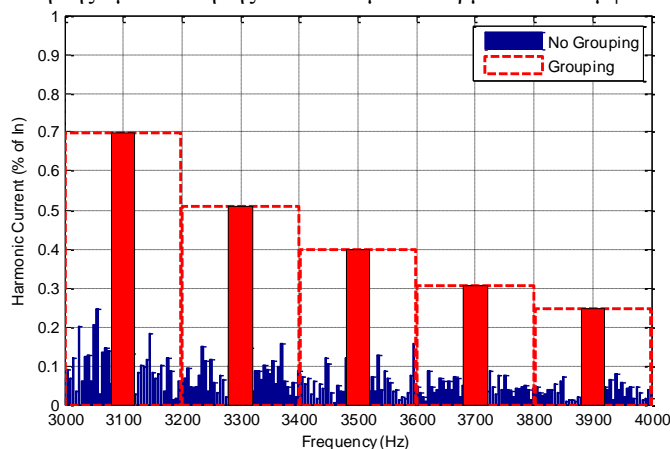
τάξης. Επιδιώκοντας συμβατότητα με το πρότυπο CISPR-16-1, [27], το IEC 61000-4-7 καθορίζει το αποδεκτό εύρος ζώνης για την ομαδοποίηση των αντίστοιχων συνιστωσών στα 200 Hz. Η κεντρική συχνότητα της πρώτης ομάδας είναι τα 2100 Hz. Οι αρμονικές άνω της 40^{ης} αρμονικής τάξης¹⁷ (μεταξύ 2 και 9 kHz), υπολογίζονται σε βήματα των 200 Hz (στα 2100, 2300, 2500, ..., 8900 Hz). Η εφαρμογή της ομαδοποίησης είναι δυνατή μέσω της παρακάτω εξίσωσης (θεωρώντας και πάλι διακριτότητα συχνότητας 5 Hz¹⁸):

$$G_n^2 = \sum_{i=-19}^{20} C_{n-50+i}^2 \tag{3.17}$$

Στο σχήμα 3.11 απεικονίζεται η εφαρμογή της διαδικασίας ομαδοποίησης για τις ανώτερες συχνότητες, όπου για λόγους παρουσίασης επιλέγεται η λεπτομέρεια από 3 έως 4 kHz. Είναι προφανές ότι οι προκύπτουσες «ομαδοποιημένες» συχνότητες έχουν πλάτος σημαντικά μεγαλύτερο σε σχέση με τους πρωτογενείς συντελεστές Fourier, καθώς συγκεντρώνουν το ενεργειακό περιεχόμενο μεγάλου αριθμού φασματικών γραμμών απόσταση 5 Hz.



Σχήμα 3.10. Απεικόνιση της ομαδοποίησης των ενδιάμεσων αρμονικών σύμφωνα με το IEC 61000-4-7.



Σχήμα 3.11. Απεικόνιση της ομαδοποίησης των ανώτερων αρμονικών σύμφωνα με το IEC 61000-4-7 (λεπτομέρεια από 3 έως 4 kHz).

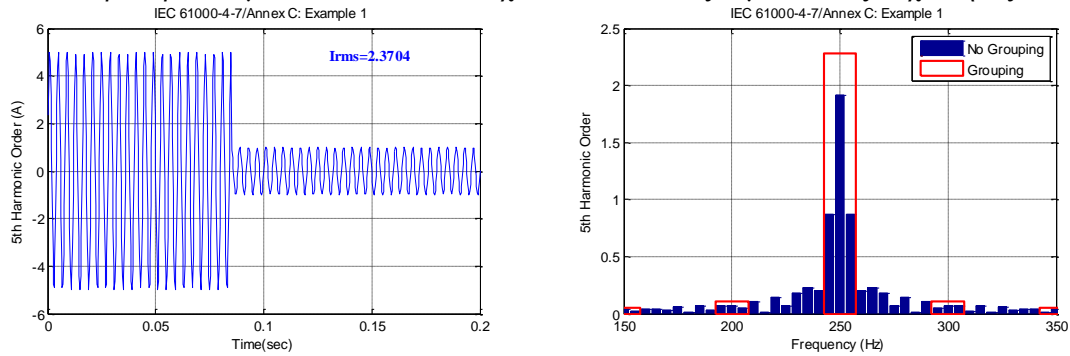
Συνοψίζοντας, η μέθοδος της ομαδοποίησης του IEC 61000-4-7 εξασφαλίζει ότι η συνολική ισχύς του μετρούμενου σήματος υπολογίζεται με ακρίβεια. Λαμβάνει υπόψη όλες τις φασματικές γραμμές απόστασης 5 Hz και όχι μόνο τα ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Προφανώς σε περίπτωση που επιλεγεί διαφορετικό μήκος χρονικού παραθύρου, που θα αντιστοιχεί σε διαφορετική διακριτότητα συχνότητας, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη τροποποίηση.

¹⁷ Η μικρή επικάλυψη στην εκτίμηση των ακέραιων και των ανώτερων αρμονικών στην περιοχή 2 – 2.5 kHz είναι σκόπιμη, προκειμένου να καλυφθούν οι περιπτώσεις ύπαρξης διακριτών τόνων στο αρμονικό φάσμα των Α/Γ έως τα 2.5 kHz.

¹⁸ Για την ανάλυση των ανώτερων αρμονικών άνω των 2 kHz, το IEC 61000-4-7 προτείνει προαιρετικά τη χρήση τετραγωνικού παραθύρου μήκους 100 ms (αντί 200 ms για τις αρμονικές χαμηλής τάξης), το οποίο αντιστοιχεί σε διακριτότητα συχνότητας ίση με 10 Hz. Για λόγους διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων στην ανάλυση αρμονικών Α/Γ θεωρείται ενιαίο μήκος παραθύρου ίσο με 200 ms.

3.5.4 Επαλήθευση της μεθόδου της ομαδοποίησης με χρήση συνθετικών σημάτων

Για την επαλήθευση της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης, το IEC 61000-4-7 χρησιμοποιεί μία σειρά από συνθετικά σήματα, προσομοιώνοντας επιλεγμένες καταστάσεις που μπορεί να συναντηθούν σε πραγματικά σήματα ποιότητας ισχύος. Στο Σχήμα 3.12 εικονίζεται η βηματική μεταβολή της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος από το πλάτος των 5 A στο 1 A. Η μετάβαση συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t=0.085$ s (δηλαδή μετά από 21.25 περιόδους της 5^{ης} αρμονικής). Το σήμα εξετάζεται σε χρονικό παράθυρο ίσο με 0.2 s, που αντιστοιχεί σε 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας.

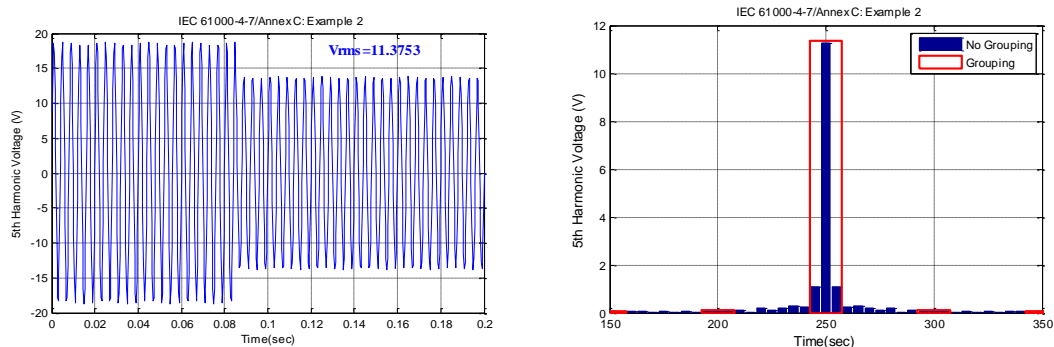


Σχήμα 3.12. Παράδειγμα 1: Βηματική μείωση του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας ρεύματος (IEC 61000-4-7/ Παρ. C3/1).

Ως αντιπροσωπευτικό κριτήριο για την αξιολόγηση της μεθόδου της ομαδοποίησης σε σχέση με το πραγματικό σήμα αλλά και σε σύγκριση με τις πρωτογενείς φασματικές συνιστώσες που προκύπτουν από τον κλασικό FFT, θεωρείται η rms τιμή του εξεταζόμενου σήματος, η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} \quad (3.18)$$

όπου I_i ισούται με την τιμή του ρεύματος τη χρονική στιγμή i και n είναι το μήκος δείγματος των εξεταζόμενων δεδομένων ρεύματος. Η ακριβής rms τιμή που προκύπτει από την εξίσωση 3.18 επηρεάζεται ελαφρώς από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 3200 Hz και η υπολογιζόμενη rms τιμή του ρεύματος ισούται με 2.37 A. Η αποδοτικότητα της μεθοδολογίας ομαδοποίησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12 (β), όπου παρουσιάζονται οι πρωτογενείς συντελεστές Fourier και η «ομαδοποιημένη» συνιστώσα που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης 3.14. Η τιμή της 5^{ης} αρμονικής που προκύπτει απευθείας από την εφαρμογή του FFT σε ολόκληρο το χρονικό παράθυρο των 10 κύκλων ισούται με 1,91 A, που αντιστοιχεί σε σφάλμα ίσο με 19.4 % σε σχέση με την rms τιμή του σήματος κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, ενώ με την εφαρμογή της ομαδοποίησης, το προκύπτον πλάτος της αρμονικής συνιστώσας στα 250 Hz ισούται με 2.28 A, δηλαδή το σφάλμα μειώνεται στο 3.8%.

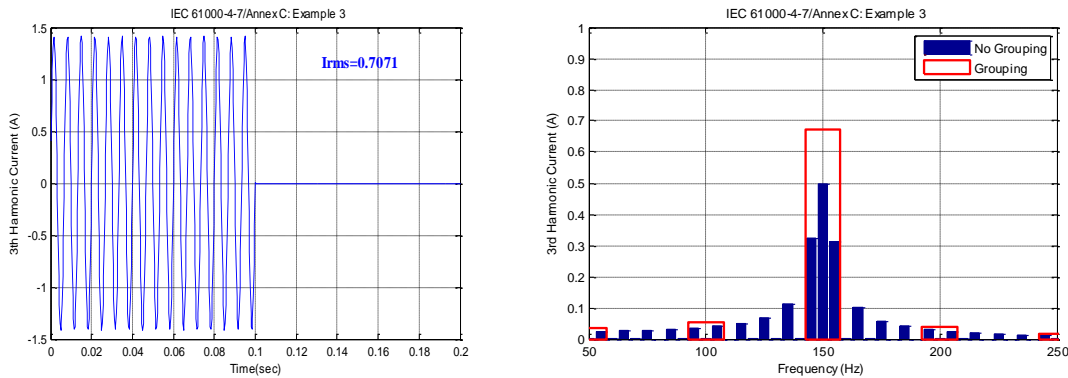


Σχήμα 3.13. Παράδειγμα 2: Βηματική μείωση του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας τάσης (IEC 61000-4-7/ Παρ. C3/2).

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά τη μείωση της rms τιμής της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας της τάσης από 13.225 V σε 9.775 V, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Η διαταραχή της τάσης του σχήματος 3.13 θεωρείται αντιπροσωπευτική των πραγματικών διαταραχών στα ΣΗΕ καθώς οι αρμονικές τάσης διαμορφώνονται από το συνδυασμό αρμονικών ρευμάτων που εκπέμπονται από ένα σύνολο μη γραμμικών φορτίων, η συσχέτιση μεταξύ των οποίων δεν είναι γενικά σημαντική. Όπως φαίνεται στο

σχήμα, η rms τιμή της τάσης στο χρονικό παράθυρο των 0.2 s ισούται με 11.3753 V, ενώ η αντίστοιχη αρμονική συνιστώσα που προκύπτει από την εφαρμογή του Fourier είναι ίση με 11.2466 V. Με την εφαρμογή της σχέσης 3.14, η νέα συνιστώσα που προκύπτει έχει rms τιμή ίση με 11.3478 V γεγονός που αντιστοιχεί σε μείωση του σφάλματος υπολογισμού από 1.13% σε 0.24%, το οποίο είναι χαμηλότερο από την αβεβαιότητα του οργάνου μέτρησης.

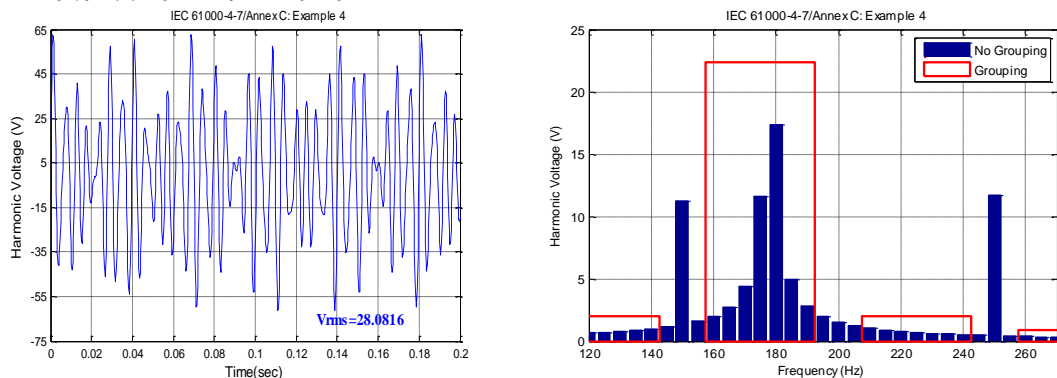
Στη συνέχεια η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε σήμα 3^{ης} αρμονικής ρεύματος, το οποίο είναι διακοπτόμενο με συγκεκριμένη συχνότητα. Η μεταβολή του αρμονικού ρεύματος 3^{ης} τάξης εικονίζεται στην αριστερή πλευρά του σχήματος 3.14, ενώ στα δεξιά παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της εφαρμογής του FFT, χωρίς και με την ομαδοποίηση. Η rms τιμή του σήματος είναι ίση με 0.7071 A, ενώ η αντίστοιχη αρμονική συνιστώσα Fourier είναι ίση με 0.5 A, εμφανίζοντας σφάλμα 29.3%, το οποίο διορθώνεται μέσω της εξίσωσης 3.14, η οποία δίνει αποτέλεσμα ίσο με 0.692 A, δηλαδή σφάλμα ίσο με 2%.



Σχήμα 3.14. Παράδειγμα 3: Βηματική μείωση του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας τάσης (IEC 61000-4-7/ Παρ. C3/3).

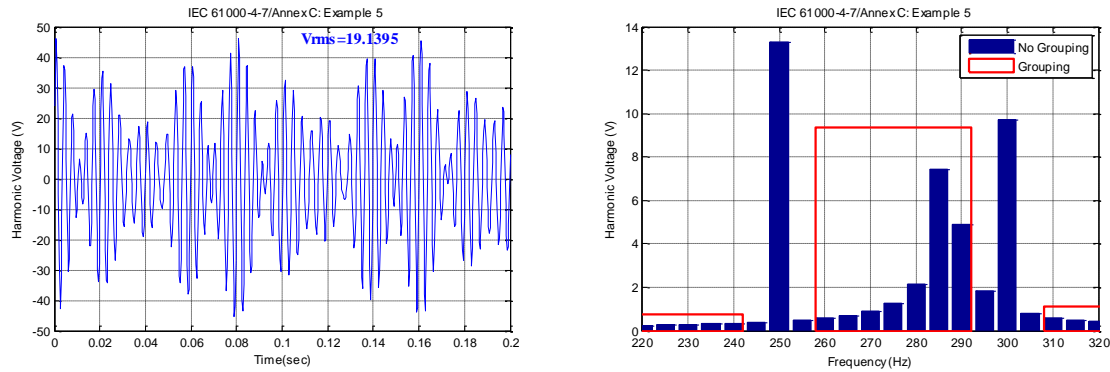
Εκτός από τις ακέραιες αρμονικές, η μεθοδολογία δοκιμάζεται και σε τρία παραδείγματα υπολογισμού ενδιάμεσων αρμονικών. Το πρώτο παράδειγμα αφορά την παρουσία συχνότητας 178 Hz σε σήμα με διακριτές αρμονικές συχνότητες 3^{ης} και 5^{ης} τάξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Ενώ ο κλασικός FFT με χρήση χρονικού παραθύρου 0.2 Hz (διακριτότητα συχνότητας 5 Hz) έχει ως αποτέλεσμα τη διαρροή του φασματικού περιεχομένου εκατέρωθεν των 178 Hz (175 και 180 Hz) με πολύ χαμηλότερο πλάτος σε σχέση με την πραγματική rms τιμή, η εφαρμογή της ομαδοποίησης περιορίζει το σφάλμα στο 2.15%. Αντίστοιχα αποδοτική είναι η μεθοδολογία του IEC 61000-4-7 και στο παράδειγμα του σχήματος 3.16.

Τέλος, στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η ανάλυση ενός σήματος τάσης, του οποίου η 5^η αρμονική ταλαντώνεται με διακύμανση πλάτους 10 V ± 20% και συχνότητα 5 Hz, ενώ περιλαμβάνει και ενδιάμεση συχνότητα ίση με 287 Hz και πλάτους 9.8 V. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή του FFT έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των πλευρικών φασματικών γραμμών 245 Hz και 255 Hz με διαφορετικό πλάτος¹⁹. Επίσης εμφανής είναι η φασματική διαρροή της συνιστώσας των 287 Hz στις γειτονικές γραμμές διακριτότητας 5 Hz.

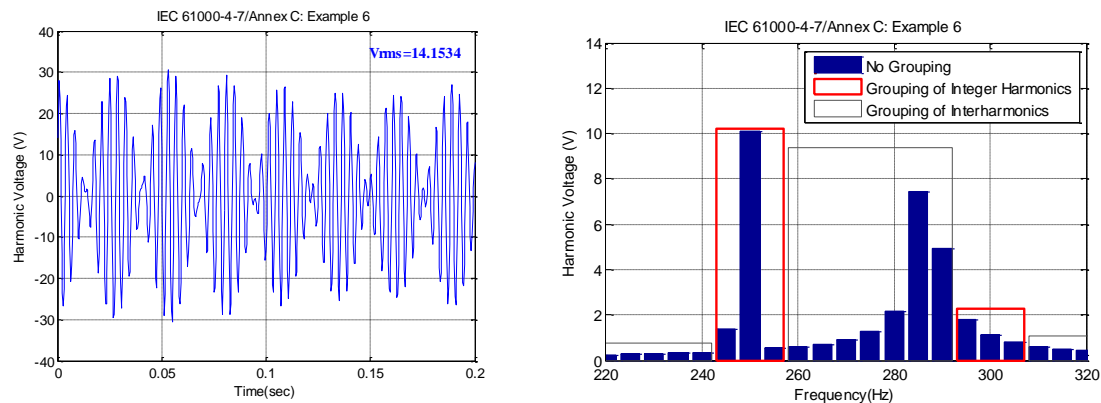


Σχήμα 3.15. Παράδειγμα 4: Αναγνώριση μη ακέραιας αρμονικής 178 Hz με rms τιμή 23V μεταξύ 3^{ης} και 5^{ης} αρμονικής τάσης με rms τιμές ίσες με 11.5 V (IEC 61000-4-7/ Παρ. C4/1).

¹⁹ Η θεωρητική ανάλυση του φάσματος του συγκεκριμένου σήματος περιλαμβάνεται στο IEC 61000-4-7 και σχολιάζεται στο 5^ο Κεφάλαιο.



Σχήμα 3.16. Παράδειγμα 5: Αναγνώριση μη ακέραιας αρμονικής 287 Hz με rms τιμή 9.8 V μεταξύ 5^{ης} και 6^{ης} αρμονικής τάσης με rms τιμές ίσες με 13.2 V και 10 V αντίστοιχα (IEC 61000-4-7/ Παρ. C4/2).



Σχήμα 3.17. Παράδειγμα 6: Αναγνώριση μη ακέραιας αρμονικής 287Hz με rms τιμή 9.8V σε ένα σήμα με ακέραια αρμονική συνιστώσα 5^{ης} τάξης, το πλάτος της οποίας εμφανίζει ταλάντωση 20% με συχνότητα 5Hz (IEC 61000-4-7/ Παρ. C4/3)

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή της ομαδοποίησης έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη αναπαράσταση του σήματος θεωρώντας ως κριτήριο την rms τιμή του, αναδεικνύοντας ωστόσο δύο βασικά μειονεκτήματα της εφαρμογής του μετασχηματισμού Fourier σε χρονομεταβλητά σήματα που περιλαμβάνουν φασματικές συνιστώσες που δεν συμπίπτουν με την επιλεχθείσα διακριτότητα συχνότητας. Τα δύο αυτά μειονεκτήματα είναι δυνατό να περιοριστούν με τη χρήση των εναλλακτικών μεθόδων φασματικής ανάλυσης, όπως θα περιγραφεί στο 5^ο Κεφάλαιο.

3.6. Συμπλήρωση του πιστοποιητικού μετρήσεων ποιότητας ισχύος A/G

Οι rms τιμές των αρμονικών συνιστωσών, όπως τελικά προκύπτουν από τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης του IEC 61000-4-7, χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση του σχετικού πίνακα μετρήσεων του IEC 61400-21 που περιλαμβάνεται στις εκθέσεις δοκιμών (Σχήμα 3.18). Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, οι μετρούμενες αρμονικές θα πρέπει να εκφράζονται ως μέσες τιμές 10λέπτου για κάθε βαθμίδα εύρους 10% της ονομαστικής ισχύος της A/G για ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας της A/G (από 0 έως 100% της ονομαστικής ισχύος). Για τον υπολογισμό των μέσων τιμών 10λέπτου των αρμονικών του παραπάνω πίνακα, είναι απαραίτητη η πρόσθετη επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την αναγωγή των πρωτογενών αρμονικών από το χρονικό παράθυρο των 10 κύκλων θεμελιώδους συχνότητας (0.2 s), σε διαστήματα 10λέπτου.

Ο υπολογισμός των μέσων τιμών των αρμονικών ρεύματος από την πρωτογενή πληροφορία του φάσματος πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{I}_{h,\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{h,i} \quad (3.19)$$

όπου N ο αριθμός των πρωτογενών δειγμάτων που περιλαμβάνονται στο επιθυμητό διάστημα ολοκλήρωσης Δt .

Με τη βοήθεια της σχέσης 3.19 οι αρμονικές συνιστώσες που προκύπτουν απευθείας από τον FFT (rms τιμές 0.2 s), μπορούν να αναχθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό χρόνο ολοκλήρωσης με την εύρεση της μέσης τιμής αντίστοιχου αριθμού διαδοχικών τιμών, εξασφαλίζοντας συμβατότητα με τα

εκάστοτε ισχύοντα πρότυπα και τους κανονισμούς σύνδεσης με το δίκτυο. Η μέγιστη τιμή 10λέπτου των αρμονικών ανά βαθμίδα ισχύος και για κάθε ζώνη συχνότητας αναγράφεται στο πιστοποιητικό μετρήσεων της Α/Γ, με τη μορφή του πίνακα του σχήματος 3.18, [13], [81]. Τιμές αρμονικών χαμηλότερες από 0.1% του ονομαστικού ρεύματος μπορούν να αγνοηθούν γιατί βρίσκονται στα όρια της ακρίβειας μέτρησης²⁰.

Στην έκθεση μετρήσεων θα πρέπει υποχρεωτικά να αναφέρεται η πλευρά του Μ/Σ, όπου έχει μετρηθεί το ρεύμα I_h . Αν οι μετρήσεις ρευμάτων έχουν πραγματοποιηθεί στην πλευρά ΧΤ, κατά τον έλεγχο συμμόρφωσης με τα όρια αρμονικών, θα πρέπει να ανάγονται στη ΜΤ μέσω του λόγου ανύψωσης του Μ/Σ ακριβώς όπως και η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος. Όσον αφορά στις αρμονικές τάσης, είναι σημαντικό να καταγράφονται για την αξιολόγηση της υφιστάμενης αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου στο οποίο συνδέεται η Α/Γ. Ως ελάχιστη απαίτηση, η συνολική αρμονική παραμόρφωση των ομαδοποιημένων αρμονικών συνιστωσών της τάσης θα πρέπει να δηλώνεται στην έκθεση μετρήσεων.

Πίνακας αποτελεσμάτων μετρήσεων αρμονικών Α/Γ (όπως περιλαμβάνεται στα πιστοποιητικά μετρήσεων)											
P _{bin} (%)	0-5	5-15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-
Ακέραιες αρμονικές											
Τάξη	I _h (% του ονομαστικού)										
2											
3											
...	...										
50											
THC (%)											
Μη ακέραιες αρμονικές (Interharmonics)											
f (Hz)	I _h (% του ονομαστικού)										
75											
125											
...	...										
1975											
Ανώτερες αρμονικές											
f(kHz)	I _h (% του ονομαστικού)										
2.1											
2.3											
...	...										
8.9											

* Αναγράφονται οι μέγιστες τιμές 10λέπτου ανά αρμονική και βαθμίδα ισχύος

Σχήμα 3.18. Πίνακας αποτελεσμάτων μετρήσεων αρμονικών Α/Γ (λεπτομέρεια του πιστοποιητικού δοκιμών ποιότητας ισχύος, σύμφωνα με το IEC 61400-21).

3.7. Συμπεράσματα

Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου ήταν η ανάδειξη της σημασίας των μετρήσεων και της μεθοδολογίας εκτίμησης των αρμονικών στις Α/Γ για την αξιολόγηση της συμβατότητας με τις απαιτήσεις σύνδεσης στα δίκτυα. Το πρώτο θέμα που διερευνήθηκε ήταν τα ισχύοντα διεθνή πρότυπα ορίων και διαδικασιών ελέγχου των αρμονικών, όπου εξηγήθηκε ο τρόπος αξιοποίησης των διαθέσιμων μετρήσεων αρμονικών των Α/Γ κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της δυνατότητας σύνδεσης με το δίκτυο. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία μετρήσεων ποιότητας ισχύος και αρμονικών Α/Γ, βάσει της οποίας συμπληρώνονται τα πιστοποιητικά παραμέτρων ποιότητας ισχύος που συνοδεύουν τις εμπορικές μηχανές. Τέλος μελετήθηκε η διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων για την εκτίμηση των αρμονικών έως 9 kHz, όπως προδιαγράφεται από το IEC 61000-4-7 και συστηματοποιείται από το IEC 61400-21, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή και τεκμηρίωση της μεθοδολογίας ομαδοποίησης του πλάτους των αρμονικών συνιστωσών, η οποία αποτελεί επέκταση της εφαρμογής του FFT για την αντιμετώπιση του φαινομένου της φασματικής διαρροής.

Η κύρια διαπίστωση είναι ότι η συνολική μεθοδολογία μέτρησης και ανάλυσης αρμονικών που περιγράφεται στο IEC 61000-4-7 είναι ελκυστική για τον έλεγχο συμβατότητας των μετρήσεων με τα υφιστάμενα όρια και χρησιμοποιείται ευρέως την τελευταία δεκαετία στην εκτίμηση αρμονικών ρευμάτων Α/Γ. Ωστόσο, παρά τον πολύ προσεκτικό σχεδιασμό και τη λήψη κατάλληλων μέτρων

²⁰ Αντίθετα με τα IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7, η Γερμανική Οδηγία μέτρησης χαρακτηριστικών ποιότητας ισχύος Α/Γ, [81], απαιτεί την αναγραφή όλων των τιμών αρμονικών στο πιστοποιητικό.

(μονάδα PLL, ομαδοποίηση, ακρίβεια οργάνων μέτρησης κ.λπ.), λόγω της ιδιαιτερότητας των σημάτων των Α/Γ, η εφαρμογή του FFT είναι ενδεχόμενο να παρουσιάσει απρόβλεπτες ανακρίβειες. Είναι χαρακτηριστικό ότι, από τη στιγμή που η μεθοδολογία της ομαδοποίησης συγκεντρώνει σε κάθε ακέραια αρμονική το ενεργειακό περιεχόμενο των γειτονικών μη ακέραιων συνιστωσών, οι υπολογιζόμενες ομαδοποιημένες (grouped) τιμές είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πρωτογενείς ακέραιες αρμονικές που προκύπτουν απευθείας από την εφαρμογή του FFT. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει παραβίαση των επιπέδων συμβατότητας στα ΣΗΕ. Επιπρόσθετα, η επαλήθευση της μεθοδολογίας του IEC 61000-4-7 σε συνθετικά σήματα, δεν αναδεικνύει υποχρεωτικά την αποδοτικότητά της σε πραγματικά σήματα.

Τα ζητήματα αυτά αποτελούν αντικείμενο της λεπτομερούς μελέτης εκπομπών αρμονικών Α/Γ με χρήση της μεθοδολογίας του IEC 61000-4-7 αλλά και εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας που παρουσιάζονται στα επόμενα Κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η αρμονική συμπεριφορά διαφόρων Α/Γ μοντέρνας τεχνολογίας, αξιοποιώντας συστηματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πρωτότυπα ή εμπορικά μοντέλα. Δεδομένου ότι οι Α/Γ συμπεριφέρονται ως πηγές ρεύματος, η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στις χρονοσειρές ρεύματος, ενώ οι φασικές τάσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος, την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών και την αξιολόγηση της υφιστάμενης παραμόρφωσης του δικτύου. Ειδικότερα θέματα που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν τη μορφή και το εύρος συχνοτήτων του αρμονικού φάσματος, την εξάρτηση των αρμονικών από την ισχύ λειτουργίας της Α/Γ και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους (διακύμανση μέσης τιμής, διασπορά και πιθανοτικές κατανομές του πλάτους και της φασικής γωνίας). Επίσης, αναδεικνύεται το θέμα της επίδρασης των παραμέτρων ανάλυσης στον υπολογισμό των αρμονικών. Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης των αρμονικών που εισάγεται από το πρότυπο IEC 61000-4-7, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της στη διαμόρφωση του εκτιμώμενου πλάτους των αρμονικών. Άλλη παράμετρος που εξετάζεται είναι η επίδραση του διαστήματος ολοκλήρωσης (time-averaging) και τέλος υπολογίζονται οι φασικές γωνίες των επιμέρους αρμονικών τάξεων και πραγματοποιείται ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών.

4.2 Διεξαγωγή μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους τύπους μηχανών, κυρίως εμπορικά μοντέλα αλλά και πρωτότυπα, [23], [60]. Οι Α/Γ που επιλέχθηκαν ποικίλουν ως προς την τεχνολογία, το μέγεθος και τη θέση εγκατάστασης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνολογίες μεταβλητών στροφών, όπου εξετάστηκαν Α/Γ με μετατροπέα πλήρους ισχύος και με ΑΓΔΤ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ			
No	Συμβολισμός	Τύπος Γεννήτριας	Ονομαστική Ισχύς
1	SG1	Πολυπολική σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης	< 1 MW
2	SG2	Πολυπολική σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης	< 1 MW
3	SG3	Πολυπολική σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης	> 1 MW
4	ADF1	Ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης	< 1 MW
5	ADF2	Ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης	> 1 MW
6	ASC1	Ασύγχρονη, με δρομέα τύπου κλωβού	< 1 MW

Πιο συγκεκριμένα, οι Α/Γ ήταν εφοδιασμένες με πολυπολικές σύγχρονες γεννήτριες τυλιγμένου πεδίου (wound field) και μετατροπέα AC/DC/AC πλήρους ισχύος στον στάτη (SG1, SG2, SG3), με ΑΓΔΤ και μετατροπείς μειωμένης ισχύος στον δρομέα (ADF1 και ADF2) και με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού και μετατροπέα πλήρους ισχύος στον στάτη (ASC1), [281]. Στην πλειονότητά τους διέθεταν ενεργό έλεγχο της γωνίας κλίσης των πτερυγίων (pitch control). Όσον αφορά το μέγεθος, οι Α/Γ που μετρήθηκαν καλύπτουν τόσο την κατηγορία μηχανών ονομαστικής ισχύος μικρότερης του MW, όσο και των μεγάλων Α/Γ άνω του 1 MW που κυριαρχούν πλέον στις νέες εγκαταστάσεις. Ακριβή στοιχεία για τον τύπο και το μέγεθος των Α/Γ που εξετάστηκαν δεν παρατίθενται σκόπιμα, ώστε να αποφευχθεί η σύνδεση τους με συγκεκριμένα μοντέλα εμπορικών Α/Γ. Ωστόσο, το δείγμα των μηχανών είναι αντιπροσωπευτικό, καθώς οι Α/Γ κάτω του MW εκπροσωπούν μεν σχετικά παλαιότερες τεχνολογίες, αλλά ακόμη αριθμητικά κυριαρχούν στις εγκαταστάσεις αιολικών σταθμών, ιδίως στη χώρα μας.

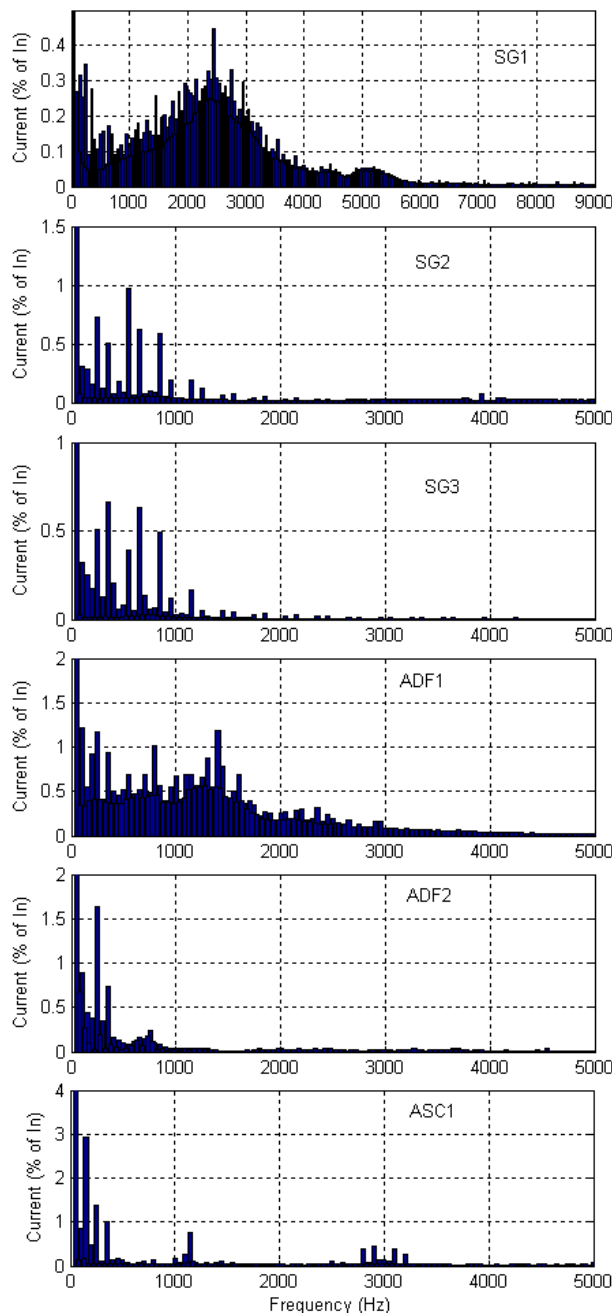
Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις περιλαμβάνουν καταγραφή της τάσης και του ρεύματος κάθε φάσης, στην πλευρά XT ή MT, ενώ η διάρκειά τους κυμαίνεται από λίγες ώρες έως αρκετές εβδομάδες, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της εξεταζόμενης Α/Γ και τις ανεμολογικές συνθήκες. Το δείγμα των μετρήσεων θεωρείται επαρκές για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά των αρμονικών. Ο μετρητικός εξοπλισμός και η μεθοδολογία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πλήρως συμβατά με τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7, όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο.

Για την ανάλυση των μετρήσεων εφαρμόστηκε ο FFT με χρήση τετραγωνικού παραθύρου πλάτους ίσου με 10 περιόδους της θεμελιώδους συχνότητας (50 Hz), το οποίο αντιστοιχεί σε διακριτότητα ίση με 5 Hz. Ακολουθώντας τις απαιτήσεις του IEC 61000-4-7 εφαρμόζεται η μεθοδολογία της ομαδοποίησης (grouping), τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με αυτά του FFT. Λεπτομέρειες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και το λογισμικό ανάλυσης παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Σημειώνεται τέλος, ότι για λόγους οικονομίας χώρου, παρουσιάζονται τα πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την τεκμηριωμένη υποστήριξη των διαπιστώσεων και συμπερασμάτων.

4.3 Μελέτη του μέτρου των αρμονικών ρευμάτων

4.3.1. Φασματικό περιεχόμενο

Τα αρμονικά φάσματα των διαφόρων τύπων Α/Γ που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Φασματικό περιεχόμενο ρευμάτων των Α/Γ που εξετάστηκαν (με εφαρμογή του «κλασικού» FFT)

Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι οι μέγιστες τιμές 30 s των αρμονικών ρευμάτων, εκφρασμένες σε επί τοις εκατό του ονομαστικού ρεύματος κάθε Α/Γ. Κάθε γράφημα περιλαμβάνει τις ακέραιες και

ενδιάμεσες αρμονικές συνιστώσες. Προκειμένου να αναδειχθεί η μορφή των φασμάτων, δεν εφαρμόστηκε ομαδοποίηση σε αυτό το στάδιο και επομένως όλες οι συνιστώσες έως τα 9 kHz αναλύονται με κοινή μέθοδο. Η μορφή του φάσματος και το εύρος συχνοτήτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο ελέγχου των μετατροπέων ισχύος, καθώς και από τον τύπο των φίλτρων αρμονικών που χρησιμοποιούνται. Στο πρώτο διάγραμμα του Σχήματος 4.1 (Α/Γ SG1), παρατηρείται διάχυση του φάσματος σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, το οποίο χαρακτηρίζει σχήματα με έλεγχο ρεύματος υστέρησης, [45], [56], [282], που ακολουθούνται από τη συγκεκριμένη Α/Γ. Παρόμοιες διαπιστώσεις ισχύουν και για την Α/Γ ADF1. Η ASC1 εφαρμόζει διαμόρφωση PWM με χρήση φέροντος σήματος, γεγονός που δικαιολογεί τις εμφανιζόμενες διακριτές χαρακτηριστικές συχνότητες και μάλιστα στην ανώτερη περιοχή συχνοτήτων. Για τις SG2, SG3 και ADF2, οι πληροφορίες για τον τρόπο ελέγχου του μετατροπέα είναι ακόμη πιο περιορισμένες, πιθανότατα ωστόσο και αυτές υιοθετούν παραλλαγές της τεχνικής PWM βασισμένες σε φέροντα σήματα. Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτο ότι οι κυρίαρχες αρμονικές συνιστώσες σε αυτές τις Α/Γ, ανήκουν στην ομάδα των χαρακτηριστικών αρμονικών 6-παλμικών μετατροπέων με μεταγωγή από το δίκτυο ($5^{\text{η}}$, $7^{\text{η}}$, $11^{\text{η}}$, $13^{\text{η}}$ κ.λπ.).

Στην περίπτωση των ΑΓΔΤ, οι αρμονικές μετρώνται στην έξοδο περιλαμβάνοντας αμφότερες τις συνεισφορές στάτη και δρομέα. Οι αρμονικές ρεύματος του κυκλώματος του δρομέα εξαρτώνται από τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Οι αρμονικές ρεύματος του στάτη οφείλονται κυρίως στη λειτουργία του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα, αλλά η συχνότητα τους διαμορφώνεται και από την ολίσθηση λειτουργίας της ηλεκτρικής γεννήτριας, [47].

Με την εξαίρεση της SG2, το αρμονικό φάσμα των μικρότερων Α/Γ (< MW) εκτείνεται έως αρκετά kHz. Στις μεγαλύτερες μηχανές, το φασματικό περιεχόμενο εντοπίζεται σε αξιοσημείωτα χαμηλότερες συχνότητες, γεγονός που οφείλεται στην αποτελεσματική χρήση φίλτρων προσαρμοσμένων στην αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων. Έτσι, παρά το γεγονός ότι στις μοντέρνες Α/Γ μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούνται μετατροπείς PWM, οι αρμονικές συχνότητες χαμηλής τάξης είναι πάντα παρούσες και συχνά κυριαρχούν στα φάσματα. Η παρουσία τους αποδίδεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Η ασυμμετρία της τάσης ακροδεκτών οδηγεί στην εμφάνιση αρμονικών ρεύματος χαμηλής τάξης (η $3^{\text{η}}$ αρμονική είναι η πιο τυπική), εξαιτίας είτε του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα ή της επαγόμενης χαμηλόσυχνης παραμόρφωσης της DC τάσης, [283]-[285].
- Οι υφιστάμενες αρμονικές χαμηλής τάξης της τάσης του δικτύου, ενισχύουν τα αντίστοιχα αρμονικά ρεύματα χαμηλής τάξης. Στην περίπτωση μετατροπέων PWM με έλεγχο ρεύματος, αυτό δημιουργείται εξαιτίας της λειτουργίας των κυκλωμάτων ελέγχου της ισχύος εξόδου και του καθορισμού των ρευμάτων αναφοράς, [62], [285], [286]. Στις ΑΓΔΤ, πρόσθετος λόγος είναι η απευθείας σύνδεση στο δίκτυο του κυκλώματος του στάτη.
- Εκτός από το κύριο κύκλωμα ισχύος, οι Α/Γ περιλαμβάνουν βοηθητικά φορτία (ελεγκτές, κινητήρες, αντικεραυνική προστασία κ.λπ.), τα οποία συμβάλλουν επίσης στην παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου.
- Τα παθητικά φίλτρα αρμονικών ενδέχεται επίσης να απορροφούν χαμηλόσυχνα αρμονικά ρεύματα, εάν η τάση ακροδεκτών έχει σχετική παραμόρφωση.

Εκτός από τις ακέριες αρμονικές, τα φάσματα όλων των Α/Γ που εξετάστηκαν, περιλαμβάνουν και σημαντικές ενδιάμεσες αρμονικές. Στις Α/Γ SG1 και ADF1, όπου εφαρμόζονται σχήματα PWM βασισμένα σε φέροντα σήματα, οι ενδιάμεσες αρμονικές είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις γειτονικές ακέριες αρμονικές. Ιδιαίτερα στις DFIG, οι ενδιάμεσες αρμονικές επάγονται στα τυλίγματα του στάτη από το μετατροπέα του δρομέα, εξαιτίας της ολίσθησης της γεννήτριας.

Συνοψίζοντας, η μορφή και το φάσμα συχνοτήτων των Α/Γ απεικονίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους μέρους και τον τρόπο ελέγχου των μετατροπέων (διακοπτική συχνότητα, τεχνική ελέγχου), ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες (> 1 kHz) όπου η επίδραση της υφιστάμενης παραμόρφωσης του δικτύου είναι μικρή. Αντίθετα, στις χαμηλές συχνότητες η διαμόρφωση των αρμονικών ρευμάτων των Α/Γ, ενδέχεται να επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το δίκτυο, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση τήρησης των ορίων αρμονικών ρεύματος. Σε γενικές γραμμές πάντως, οι αρμονικές εκπομπές των Α/Γ σύγχρονης τεχνολογίας είναι χαμηλές. Παρόλα αυτά, η μορφή των φασμάτων υποδεικνύει την ανάγκη για έλεγχο

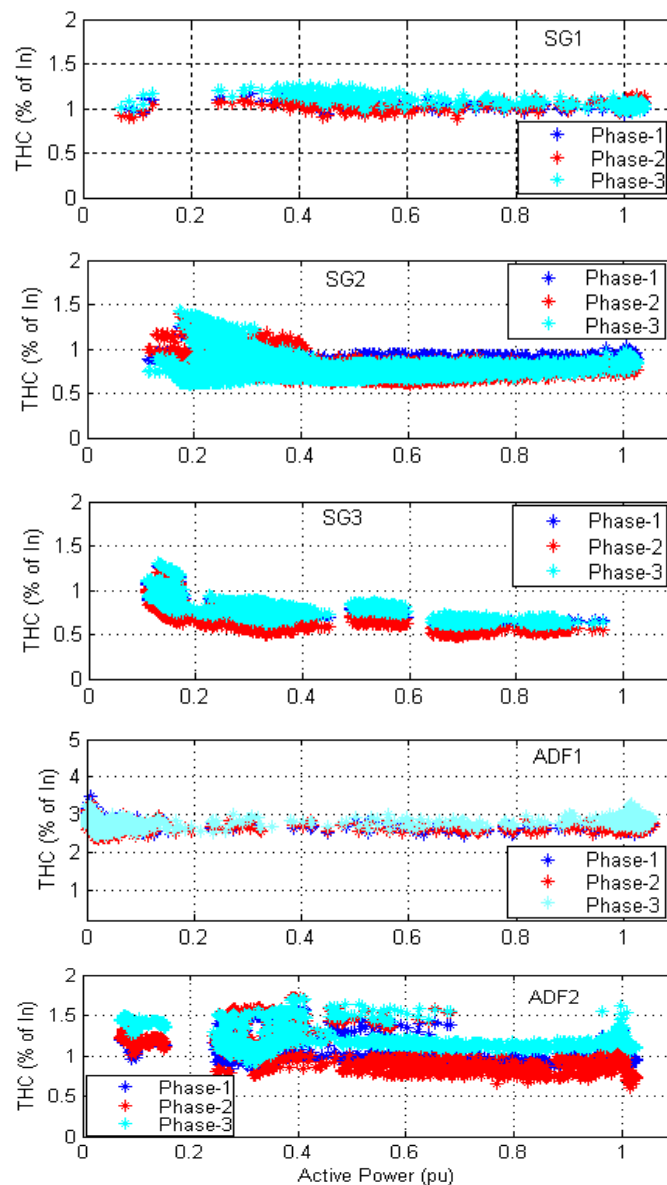
των αρμονικών εκπομπών ιδιαίτερα στις ενδιάμεσες, άρτιες και ανώτερες συχνότητες, όπου τα ισχύοντα όρια αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης είναι αυστηρά, [16], [37], [82].

4.3.2. Επίδραση του σημείου λειτουργίας

Βασικό ζητούμενο στην αξιολόγηση των αρμονικών εκπομπών των ρευμάτων είναι η εξάρτηση τους από το σημείο λειτουργίας των Α/Γ, δηλαδή η διακύμανση των μέτρων των αρμονικών συνιστωσών σε διάφορες συνθήκες ταχυτήτων ανέμου και ισχύος εξόδου. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα γραφικά διαγράμματα του συντελεστή συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος (THC) ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου των διαφόρων τύπων Α/Γ που εξετάστηκαν. Ο συντελεστής THC ορίζεται ως εξής, [14]:

$$THC(\%) = 100 \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} / I_n \right) \quad (4.1)$$

όπου I_h είναι οι επιμέρους ακέραιες αρμονικές συνιστώσες ρεύματος τάξης h και I_n το ονομαστικό ρεύμα κάθε Α/Γ. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης ίσο προς 3 s χωρίς να εφαρμοστεί και πάλι η ομαδοποίηση.

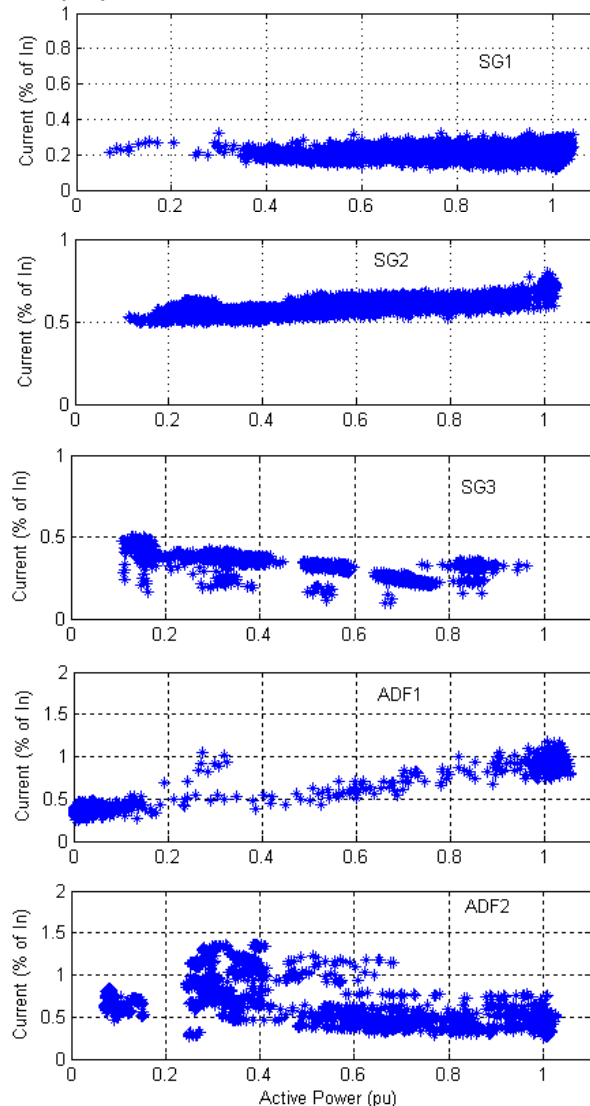


Σχήμα 4.2. Συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος (THC) ως προς την ενεργό ισχύ των Α/Γ.

Από το σχήμα διαπιστώνεται ότι το γενικό προφίλ του THC είναι σχεδόν γραμμικό, ενώ η τιμή του είναι σταθερή ή παρουσιάζει πολύ μικρή μεταβολή σε σχέση με το σημείο λειτουργίας των Α/Γ. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τις τεχνικές διαμόρφωσης που ακολουθούνται από τους μετατροπείς PWM

και είναι αναμενόμενο, π.χ. για τους ελεγκτές υστέρησης ρεύματος που θεωρούν σταθερή ζώνη υστέρησης σε ολόκληρο το εύρος ισχύος λειτουργίας της Α/Γ.

Η διατήρηση σταθερού THC ανεξάρτητα του σημείου λειτουργίας των Α/Γ, πρακτικά σημαίνει ότι και τα εμφανιζόμενα αρμονικά ρεύματα των ακέραιων αρμονικών αναμένεται να διατηρούν σχεδόν σταθερό πλάτος σε απόλυτη τιμή (Α ή % του I_n), ανεξάρτητα από την ταχύτητα ανέμου. Αυτό επιβεβαιώνεται πλήρως από τη μελέτη των αρμονικών ρευμάτων στις υψηλότερες συχνότητες, όπου οι αρμονικές σχετίζονται σχεδόν αποκλειστικά με τη διακοπτική λειτουργία των μετατροπέων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν ωστόσο οι διακυμάνσεις των αρμονικών ρευμάτων στις χαμηλές τάξεις, όπου παρατηρείται μικρή συσχέτιση με το σημείο λειτουργίας, η οποία όμως διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της Α/Γ (και ενδεχομένως και τον τύπο του δικτύου στο οποίο συνδέεται). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} τάξης ως προς την ισχύ εξόδου για όλες τις Α/Γ.



Σχήμα 4.3. Διακύμανση του μέτρου του 5^{ης} αρμονικής του ρεύματος Α/Γ ως προς την ισχύ εξόδου

Το γενικό συμπέρασμα από την ανάλυση αυτής της παραγράφου είναι ότι το σημείο λειτουργίας των Α/Γ επηρεάζει σε μικρό βαθμό το μέτρο των αρμονικών του ρεύματος εξόδου, γεγονός το οποίο διευκολύνει το Διαχειριστή του Δικτύου κατά τον έλεγχο συμμόρφωσης με τα υφιστάμενα όρια για κάθε αρμονική τάξη. Ειδικά μάλιστα στις ανώτερες συχνότητες, όπου οι εμφανιζόμενες αρμονικές συνδέονται αποκλειστικά με τον τρόπο λειτουργίας των μετατροπέων, η επίδραση του σημείου λειτουργίας είναι αμελητέα.

4.3.3. Στατιστική ανάλυση αρμονικών

Από τα γραφήματα της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει ότι τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών αποτελούν τυχαίες μεταβλητές με αξιοσημείωτη διακύμανση γύρω από τη μέση τιμή τους. Συνεπώς, τα αρμονικά ρεύματα των Α/Γ δεν μπορούν να περιγραφούν από μονοσήμαντη μαθηματική σχέση και απαιτούν την εφαρμογή στατιστικής διεργασίας. Εφαρμόζοντας απλές στατιστικές τεχνικές ανάλυσης, οι πραγματικές κατανομές των δεδομένων είναι δυνατό να προσεγγιστούν από γνωστές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, ενώ παράλληλα υπολογίζονται βασικοί στατιστικοί δείκτες όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η διασπορά τους.

Η ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων αρμονικών αποκαλύπτει ότι το μέτρο I_h των αρμονικών ακολουθεί γενικά την κατανομή Weibull:

$$f(I_h) = \frac{k}{c} \left(\frac{I_h}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left(\frac{I_h}{c} \right)^k \right\} \quad (4.2)$$

όπου k και c αντίστοιχα είναι οι παράμετροι μορφής και κλίμακας (*shape* και *scale factor*) της κατανομής. Στις χαμηλές συχνότητες, ο συντελεστής μορφής παίρνει σχετικά υψηλές τιμές ($k \geq 3$) και η κατανομή πρακτικά γίνεται Κανονική (*Normal distribution*):

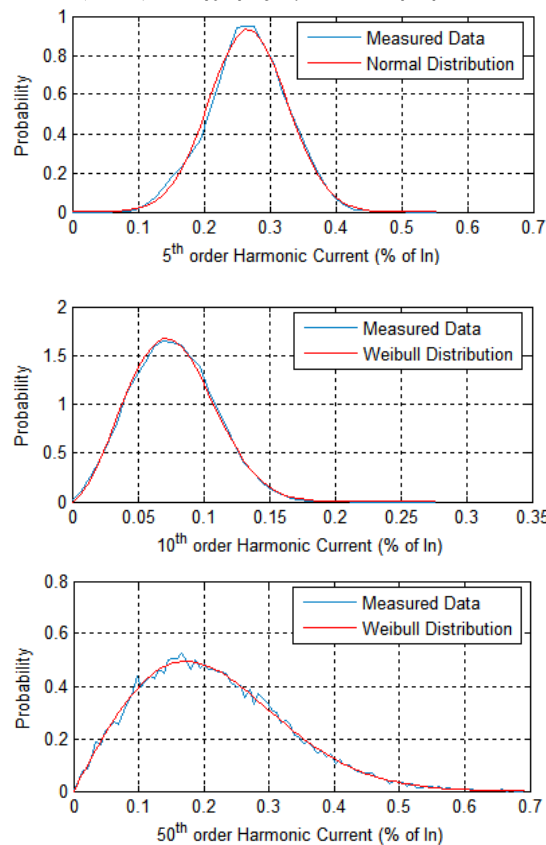
$$f(I_h) = \frac{1}{\sigma_{I_h} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{I_h - \bar{I}_h}{\sigma_{I_h}} \right)^2} \quad (4.3)$$

όπου \bar{I}_h είναι η μέση τιμή του θεωρούμενου δείγματος αρμονικών ρεύματος και σ_{I_h} είναι η τυπική απόκλιση (ενώ $\sigma_{I_h}^2$ η αντίστοιχη διασπορά).

Στις υψηλότερες συχνότητες γίνεται $k \approx 2$, οπότε η κατανομή παίρνει τη μορφή της Rayleigh:

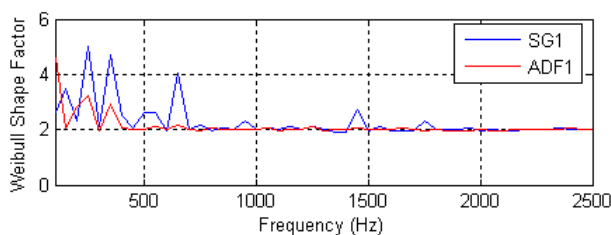
$$f(I_h) = \frac{I_h}{\sigma_{I_h}^2} \cdot e^{-\left(\frac{I_h^2}{2 \cdot \sigma_{I_h}^2} \right)} \quad (4.4)$$

Τα συμπεράσματα αυτά αποτυπώνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.4, στα οποία έχουν υπολογιστεί οι κατανομές των αρμονικών ρευμάτων για την Α/Γ SG1, με χρήση του βασικού χρονικού παραθύρου 10 κύκλων (0.2 s) και χωρίς ομαδοποίηση.



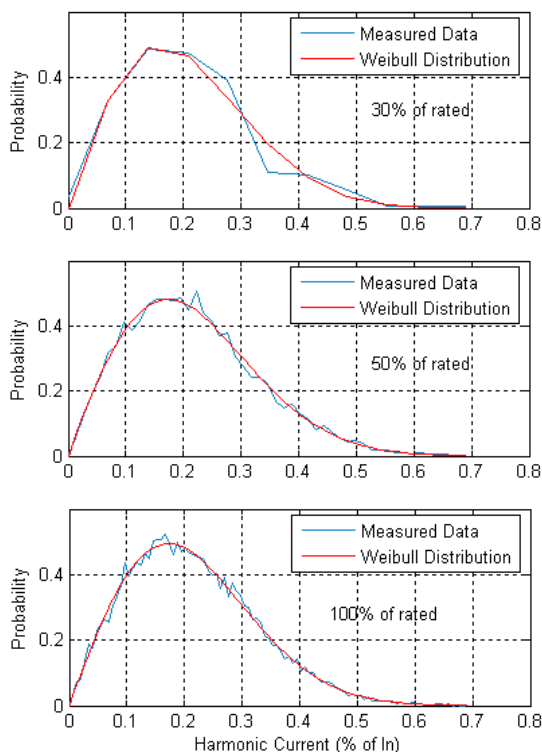
Σχήμα 4.4. Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της 5^{ης}, 10^{ης} και 50^{ης} τάξης, όταν η SG1 λειτουργεί κοντά στην ονομαστική ισχύ.

Συγκεκριμένα, ενώ οι αρμονικές 5^{ης} τάξης είναι σχεδόν κανονικά κατανομημένες γύρω από τη μέση τιμή ($k \approx 5$), στη 10^η τάξη η μορφή γίνεται τυπική Weibull ($k \approx 2.5$) και στην 50^η τάξη σχεδόν τέλεια κατανομή Rayleigh ($k \approx 2$). Η διακύμανση του συντελεστή μορφής k της Weibull σε σχέση με τη συχνότητα δίνεται στο Σχήμα 4.5, για τις Α/Γ SG1 and ADF1. Γενικά, για συχνότητες μεγαλύτερες από ~1 kHz, η προσέγγιση με την κατανομή Rayleigh ισχύει για το σύνολο των Α/Γ που εξετάστηκαν.

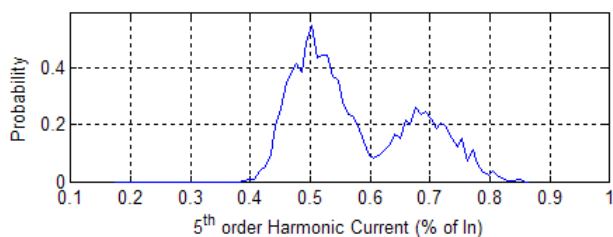


Σχήμα 4.5. Εκτιμώμενη τιμή του συντελεστή μορφής k της κατανομής Weibull ως συνάρτηση της αρμονικής συχνότητας για τις Α/Γ SG1 και ADF1.

Δεδομένου ότι η επίδραση του σημείου λειτουργίας των Α/Γ στο πλάτος των αρμονικών δεν είναι σημαντική, όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι πιθανοτικές κατανομές που υπολογίστηκαν σε ένα επίπεδο ισχύος δεν μεταβάλλονται δραστικά αν η Α/Γ λειτουργεί σε διαφορετική ισχύ. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι κατανομές των αρμονικών ρευμάτων 50^{ης} τάξης σε τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος για την Α/Γ SG1 (30, 50 και 100% της ονομαστικής ισχύος). Είναι φανερό ότι η κατανομή που περιγράφει το πλάτος των αρμονικών είναι ουσιαστικά η ίδια, ανεξάρτητα του σημείου λειτουργίας.



Σχήμα 4.6. Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τις αρμονικές ρεύματος 50^{ης} τάξης σε τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος εξόδου της Α/Γ SG1 (30%, 50% και 100% της ονομαστικής ισχύος).



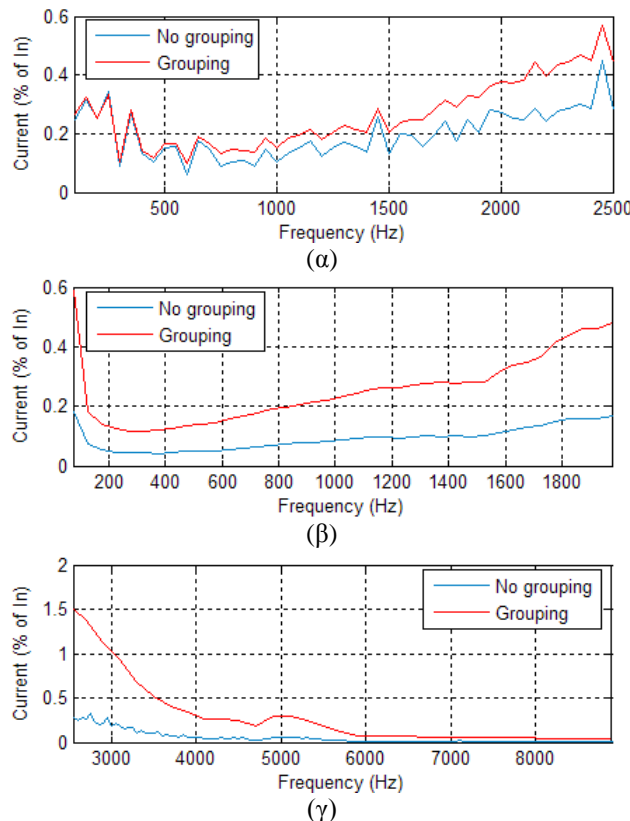
Σχήμα 4.7. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} τάξης της Α/Γ SG2 σε συνθήκες μέσης έως υψηλής παραγόμενης ισχύος.

Παρόλο που οι παραπάνω διαπιστώσεις ισχύουν γενικά για όλους τους τύπους Α/Γ, αρκετές εξαιρέσεις συναντώνται όσον αφορά στη μορφή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Στο Σχήμα 4.7, για παράδειγμα, δείχνεται η κατανομή των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} τάξης της Α/Γ SG2, όταν λειτουργεί σε μέσες έως υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι δύο διακριτές κορυφές που έχουν τη μορφή διακριτής κατανομής που προσεγγίζει την Κανονική αποδίδονται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη Α/Γ περιλαμβάνει τρεις πανομοιότυπους μετατροπείς, που συνδέονται παράλληλα, οι οποίοι λειτουργούν όλοι μαζί μόνο στα υψηλά επίπεδα ισχύος. Έτσι, η πρώτη και η δεύτερη κορυφή αντιστοιχούν σε λειτουργία με δύο και τρεις μετατροπείς αντίστοιχα σε λειτουργία. Το μέγιστο της δεύτερης κατανομής είναι λιγότερο από 50% από αυτό της πρώτης, λόγω του ότι η άθροιση των αρμονικών των παράλληλων μετατροπέων δεν είναι αλγεβρική αλλά διανυσματική.

4.3.4. Επίδραση της ομαδοποίησης (grouping)

Ένα σημαντικό ζήτημα που ανακύπτει από τη μεθοδολογία του προτύπου IEC 61000-4-7 είναι η επίδραση της ομαδοποίησης στα πρωτογενή αποτελέσματα μετρήσεων αρμονικών. Είναι αναμενόμενο ότι από τη στιγμή που με την ομαδοποίηση συγκεντρώνονται σε κάθε ακέραια αρμονική οι γειτονικές της ενδιάμεσες, οι προκύπτουσες «ομαδοποιημένες» τιμές θα είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αρμονικές που υπολογίζονται απευθείας από τον FFT χωρίς την ομαδοποίηση. Μάλιστα η διαφορά τους ενδέχεται σε κάποιες περιπτώσεις να είναι σημαντική, γεγονός κρίσιμο ειδικά για κάποιες τάξεις αρμονικών, όπου τα υφιστάμενα όρια είναι αυστηρά.

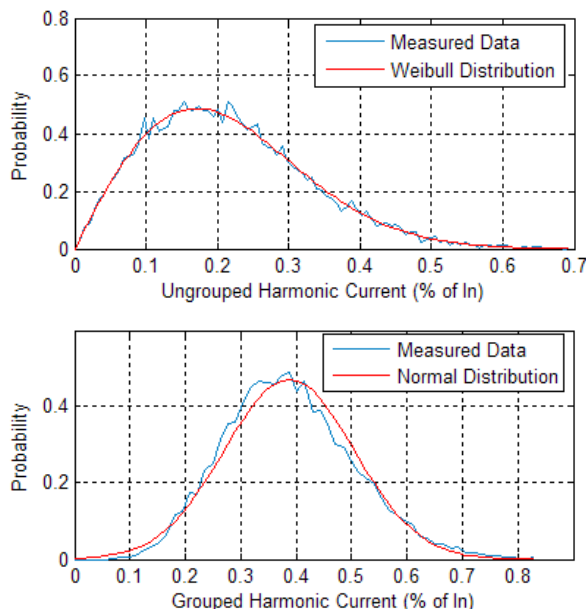
Η ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων επιβεβαιώνει την παραπάνω διαπίστωση. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η συνολική επίδραση της ομαδοποίησης στη μέση τιμή των υπολογιζόμενων αρμονικών για όλες τις ακέραιες, ενδιάμεσες και ανώτερες αρμονικές, για την Α/Γ SG1. Η επίδραση είναι πιο σημαντική στις υψηλές τάξεις (> 1000 Hz), όπου η φασματική διαρροή στις γειτονικές συχνότητες είναι πιο σημαντική. Ακόμη πιο σημαντική είναι η επίδραση στον υπολογισμό των ανώτερων αρμονικών (> 2 kHz) γιατί το εύρος φάσματος που λαμβάνεται υπόψη για την ομαδοποίηση εκτείνεται από -95 έως +100 Hz γύρω από τη συχνότητα ενδιαφέροντος (βλ. εξίσωση 3.17).



Σχήμα 4.8. Μέση τιμή των (α) ακέραιων, (β) ενδιάμεσων και (γ) ανώτερων αρμονικών πριν και μετά την εφαρμογή της ομαδοποίησης για την Α/Γ SG1.

Εκτός από την επίδραση στη μέση τιμή, σημαντική είναι και η μεταβολή στα στατιστικά χαρακτηριστικά των αρμονικών. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ των

ομαδοποιημένων και μη τιμών, θεωρώντας τις στατιστικές κατανομές τους για την Α/Γ SG1. Παρατηρείται ότι οι ομαδοποιημένες αρμονικές έχουν κανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, σε αντίθεση με τις τιμές χωρίς ομαδοποίηση, οι οποίες ακολουθούν την κατανομή Rayleigh στις υψηλές συχνότητες. Αυτό το συμπέρασμα είναι γενικό και ισχύει για όλους τους τύπους των Α/Γ που εξετάστηκαν, των οποίων οι ομαδοποιημένες αρμονικές είναι επίσης κανονικά κατανεμημένες, ανεξάρτητα από την τάξη της αρμονικής.

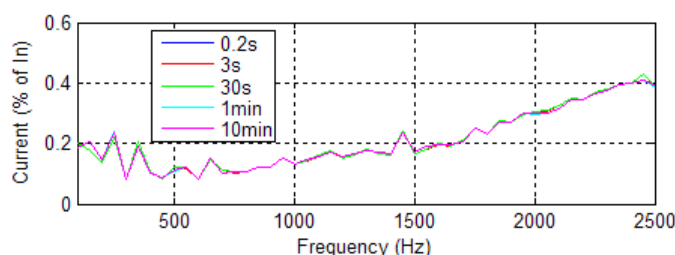


Σχήμα 4.9. Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τα αρμονικά ρεύματα 50^{ης} τάξης πριν και μετά την εφαρμογή ομαδοποίησης για την Α/Γ SG1.

4.3.5. Επίδραση του διαστήματος υπολογισμού της μέσης τιμής (averaging time)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σύμφωνα με το IEC 61400-21, τα αρμονικά ρεύματα των εμπορικών Α/Γ μετρώνται και δηλώνονται ως μέσες τιμές δεκαλέπτου. Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός των αρμονικών σύμφωνα με το IEC 61000-4-7 πραγματοποιείται με χρήση του FFT για χρονικά παράθυρα μήκους 10 κύκλων (0.2 s), τετραγωνικά και μη επικαλυπτόμενα. Επομένως ο υπολογισμός των μέσων τιμών για μεγαλύτερα χρονικά παράθυρα (π.χ. δεκάλεπτα) είναι εφικτός στη συνέχεια με τη εύρεση της μέσης τιμής διαδοχικών επιμέρους τιμών διάρκειας 0.2 s (3000 τιμές ανά δεκάλεπτο).

Η εφαρμογή της διαδικασίας εύρεσης της μέσης τιμής σε μία στατιστική διεργασία δεν επηρεάζει τη μέση τιμή του δείγματος, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.10, όπου καταγράφεται η μέση τιμή των αρμονικών ως προς την αντίστοιχη συχνότητα για την Α/Γ SG1 χρησιμοποιώντας διαφορετικά διαστήματα ολοκλήρωσης από τα 0.2 s έως τα 10 min.



Σχήμα 4.10. Μέση τιμή αρμονικών συνιστωσών για διάφορους χρόνους ολοκλήρωσης για την Α/Γ SG1.

Αντίθετα, με την επιλογή διαφορετικού διαστήματος υπολογισμού της μέσης τιμής μεταβάλλεται σημαντικά η διασπορά σε ποσοστό που εξαρτάται από το βαθμό αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών του εκάστοτε θεωρούμενου δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος των διασπορών των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε διαφορετικά διαστήματα υπολογισμού της μέσης τιμής αναμένεται να βρίσκεται μεταξύ των παρακάτω ορίων, [287]:

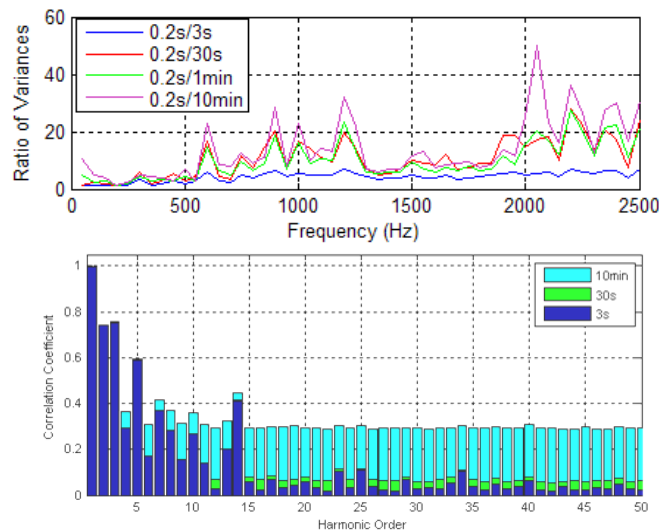
$$1 \leq \frac{\sigma_{T_{ave1}}^2}{\sigma_{T_{ave2}}^2} \leq \frac{T_{ave2}}{T_{ave1}} \quad (4.5)$$

όπου

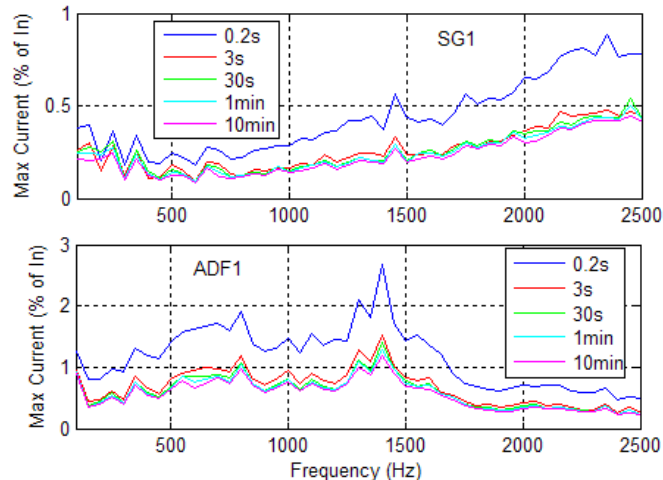
T_{ave1}, T_{ave2} χρόνοι ολοκλήρωσης σε s με $T_{ave2} > T_{ave1}$ (στη συγκεκριμένη περίπτωση $T_{ave2} = 600 s$)
 $\sigma_{T_{ave1}}^2, \sigma_{T_{ave2}}^2$ οι αντίστοιχες διασπορές των αρμονικών ρευμάτων για κάθε χρόνο ολοκλήρωσης

Η ανισότητα 4.5 δηλώνει ότι οι λόγοι των διασπορών κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών που ξεκινά από τη μονάδα (ίσες μεταξύ τους), όταν τα δείγματα αρμονικών ρευμάτων είναι πλήρως συσχετισμένα ($\rho_{i,j}=1$) και φθάνει έως τον εκάστοτε λόγο των διαστημάτων υπολογισμού της μέσης τιμής για πλήρως ασυσχέτιστα δείγματα ($\rho_{i,j}=0$). Στην τελευταία περίπτωση, από ένα δείγμα μέσω των τιμών 10λέπτου (600 s) η μέγιστη μεταβολή της διασποράς του αντίστοιχου δείγματος μέσω των τιμών 3 s θα είναι ίση με 200 (600 s / 3 s). Στη γενική περίπτωση που οι τιμές αρμονικών ρευμάτων παρουσιάζουν κάποιο βαθμό αλληλοσυσχέτισης, ο παραπάνω λόγος κυμαίνεται σε επίπεδα πιο κοντά προς τη μονάδα.

Η επίδραση του διαστήματος υπολογισμού της μέσης τιμής στη διασπορά των αρμονικών ρευμάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11, όπου σχεδιάζονται οι λόγοι των διασπορών των αρμονικών για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης (από 3 s έως 10 min) προς τη διασπορά του βασικού δείγματος διάρκειας 10 κύκλων (0.2 s) ως συνάρτηση της συχνότητας για την Α/Γ SG1. Αναλύοντας τα γραφήματα του Σχήματος, το συμπέρασμα επιβεβαιώνει τη θεωρητική προσέγγιση, καθώς στις χαμηλές τάξεις αρμονικών, όπου η αλληλοσυσχέτιση των αρμονικών ρευμάτων είναι ισχυρή, ο λόγος των διασπορών είναι κοντά στη μονάδα, διαπίστωση που δεν ισχύει για τις ανώτερες αρμονικές, όπου σταδιακά η συσχέτιση εξασθενεί.



Σχήμα 4.11. (α) Λόγος διασπορών για τις ακέραιες αρμονικές για διάφορα διαστήματα υπολογισμού μέσης τιμής για την Α/Γ SG1 και (β) Συντελεστές αλληλοσυσχέτισης αρμονικών ρευμάτων για διάφορα διαστήματα υπολογισμού για την ίδια Α/Γ.



Σχήμα 4.12. Μέγιστες τιμές των ακέραιες αρμονικών για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης για τις SG1 και ADF1.

Άμεση συνέπεια αυτής της παρατήρησης είναι ότι οι μέγιστες τιμές των μετρούμενων αρμονικών μειώνονται σημαντικά όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα διαστήματα υπολογισμού, καθώς η διαδικασία εύρεσης της μέσης τιμής λειτουργεί ως φίλτρο για τις ακρότατες τιμές διάρκειας 0.2 s. Τα αρμονικά ρεύματα των Α/Γ που δηλώνονται στα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος σύμφωνα με το IEC 61400-21, αντιστοιχούν στις μέγιστες μέσες τιμές δεκαλέπτου, που καταγράφονται σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες μέγιστες των 0.2 s. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των ακέραιων αρμονικών για τις Α/Γ SG1 και ADF1, για διάφορα διαστήματα υπολογισμού από 0.2 s έως 10 min. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, ουσιαστικά το φίλτράρισμα των ακρότατων τιμών γίνεται ήδη από το χρονικό διάστημα των 3 s, ενώ για μεγαλύτερους χρόνους η μείωση δεν είναι πλέον σημαντική. Το γενικό ωστόσο συμπέρασμα είναι ότι, όταν δηλώνονται οι μέγιστες τιμές των αρμονικών ρευμάτων των Α/Γ, η αναφορά σε συγκεκριμένο διάστημα υπολογισμού είναι απαραίτητη.

4.4 Ανάλυση φασικών γωνιών και συμμετρικών συνιστωσών

4.4.1 Διακύμανση της φασικής γωνίας

Σύμφωνα με το IEC 61400-21, η ανάλυση των αρμονικών ρευμάτων απαιτεί τον υπολογισμό μόνο του μέτρου τους. Η πληροφορία για τη φασική γωνία, παρόλο που είναι άμεσα διαθέσιμη από την εφαρμογή του FFT δεν λαμβάνεται υπόψη, παρά μόνο για τον υπολογισμό της rms τιμής της ενεργού και άεργου ισχύος. Ωστόσο, τα στατιστικά χαρακτηριστικά της φασικής γωνίας είναι εξίσου σημαντικά για διάφορες επιμέρους αναλύσεις, όπως για την εξέταση θεμάτων άθροισης αρμονικών από πολλαπλές πηγές, [16], [37]. Ενδεικτικά, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, το πρότυπο IEC 61000-3-6 προτείνει κανόνα άθροισης με χρήση εκθετικού συντελεστή α , η τιμή του οποίου κλιμακώνεται από ίσος με τη μονάδα για τις χαμηλές τάξεις αρμονικών ($h < 5$) έως την τιμή 2 για τις αρμονικές συχνότητες μεγαλύτερες των 500 Hz, υποθέτοντας ότι οι αρμονικές χαμηλής τάξης (και ειδικότερα οι περιττές) είναι γενικά συμφασικές (διαφορά φασικών γωνιών $< 90^\circ$), σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες συχνότητες όπου αυτό δεν ισχύει.

Αξιοποιώντας τις διαθέσιμες μετρήσεις, η παραπάνω υπόθεση, μπορεί να ελεγχθεί άμεσα για τις Α/Γ. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, για κάθε φάση θεωρήθηκε η φασική γωνία κάθε αρμονικής συνιστώσας, όπως υπολογίζεται από τον FFT, ανηγμένη στη φασική γωνία της θεμελιώδους συχνότητας (50 Hz) της αντίστοιχης φασικής τάσης, η οποία λαμβάνεται ως κοινή αναφορά προκειμένου να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\theta = h \cdot \theta_1 - \theta_h, h = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

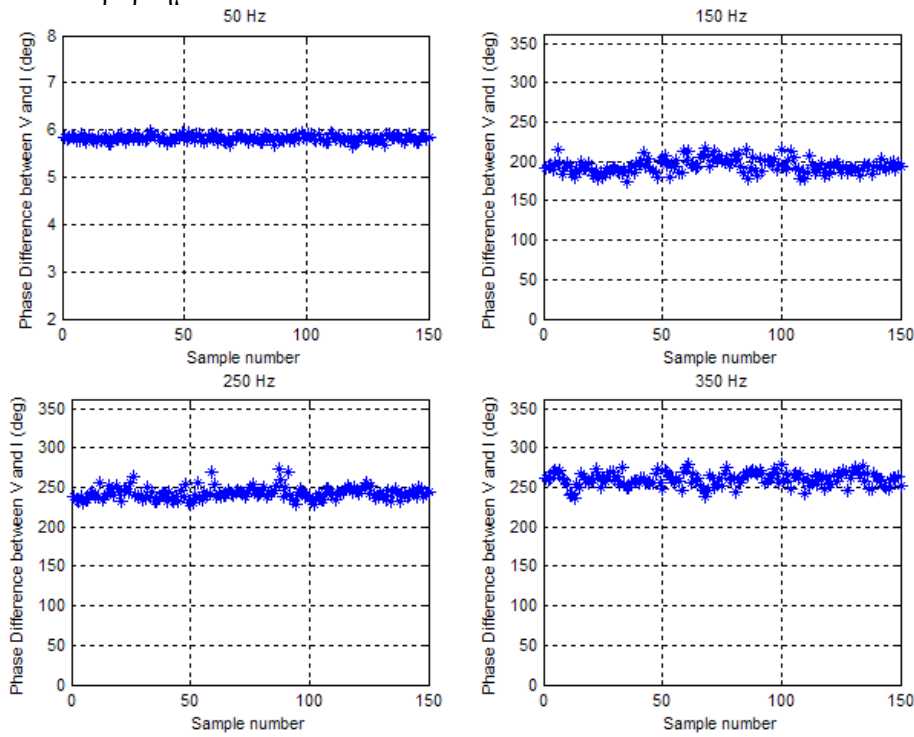
όπου

θ_1	Η φασική γωνία της θεμελιώδους συνιστώσας της θεωρούμενης φάσης της τάσης
θ_h	Η φασική γωνία της εξεταζόμενης αρμονικής ρεύματος
h	Η τάξη της εξεταζόμενης αρμονικής

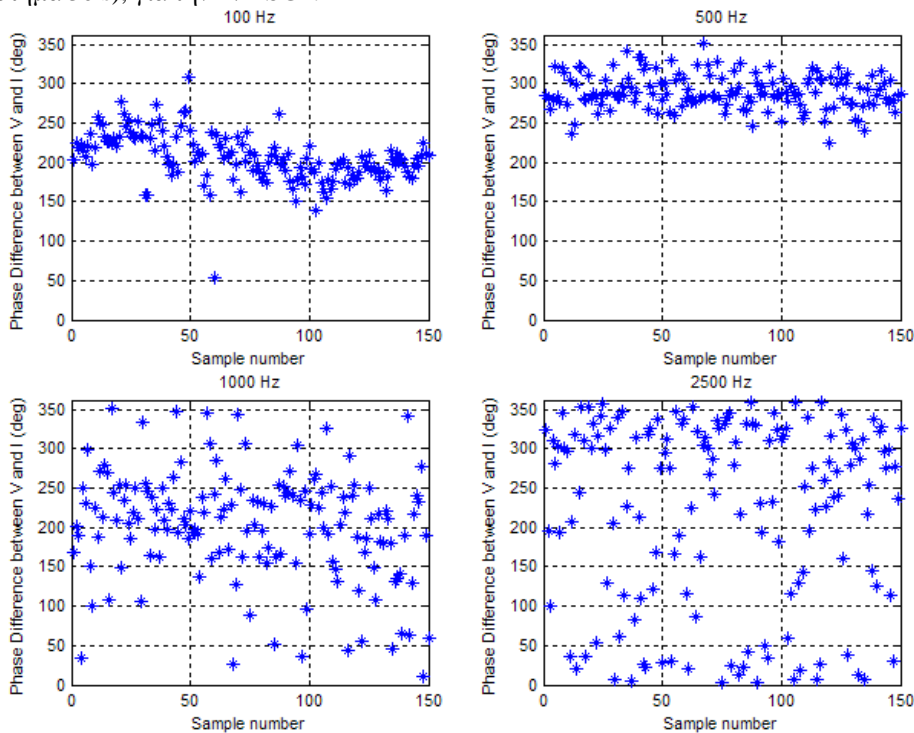
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της εξίσωσης 4.6 για επιλεγμένες αρμονικές συνιστώσες της Α/Γ SG1 παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.13 και 4.14. Στο Σχήμα 4.13, παρουσιάζεται η διακύμανση των φασικών γωνιών για τις αρμονικές περιττής τάξης 3^η, 5^η και 7^η και, για λόγους πληρότητας, η διακύμανση της φασικής γωνίας της θεμελιώδους συνιστώσας, η οποία πρακτικά αντιστοιχεί στη διακύμανση του συντελεστή ισχύος της Α/Γ. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι περιττές αρμονικές ($h < 5$) της Α/Γ είναι «κλειδωμένες» με την τάση του δικτύου, γεγονός που κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με την υπόθεση του IEC 61000-3-6 για τη σχέση μεταξύ των φασικών γωνιών αντίστοιχης τάξης για το σύνολο των Α/Γ ενός πάρκου²¹. Αξιοσημείωτη ωστόσο είναι η συμπεριφορά της 3^{ης} αρμονικής, η οποία είναι εξίσου συγχρονισμένη με την τάση του δικτύου, παρά τη διαφορετική υπόθεση του IEC 61000-3-6. Από την άλλη πλευρά, στο Σχήμα 4.14 διαπιστώνεται ότι τόσο για τις άρτιες αρμονικές χαμηλής τάξης, όσο και για τις συχνότητες από 500 Hz και πάνω, η εξάρτηση της φασικής γωνίας από την τάση του δικτύου αρχίζει να χάνεται και ουσιαστικά για τις συχνότητες άνω

²¹ Για την πλήρη επαλήθευση του κανόνα άθροισης αρμονικών από πολλαπλές πηγές του IEC 61000-3-6, απαιτείται η ταυτόχρονη μέτρηση αρμονικών σε τουλάχιστον δύο Α/Γ ενός Α/Π. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι οι φασικές γωνίες των εξεταζόμενων αρμονικών μίας Α/Γ «κλειδώνονται» με τη φασική γωνία της τάσης του δικτύου, υποδηλώνει ότι και στις υπόλοιπες Α/Γ που συνδέονται στο ίδιο σημείο του δικτύου οι φασικές γωνίες των αντίστοιχων αρμονικών θα διαμορφώνονται επίσης από την κοινή τάση του δικτύου.

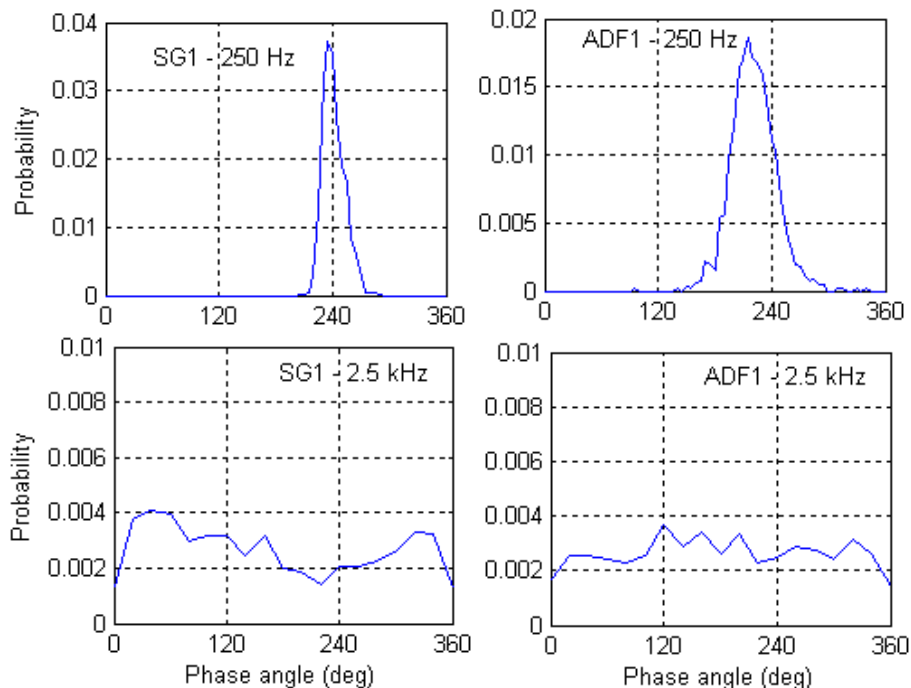
των 1000 Hz ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. Το χαρακτηριστικό αυτό επιβεβαιώνεται και από την μελέτη των φασικών γωνιών στις υπόλοιπες Α/Γ. Ενδεικτικά, και για λόγους σύγκρισης, στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι πιθανοτικές κατανομές των αρμονικών 5^{ης} και 50^{ης} τάξης για τις Α/Γ SG1 και ADF1. Οι διαπιστώσεις αυτές είναι σημαντικές για την αξιολόγηση του κανόνα άθροισης του IEC 61000-3-6 για τον υπολογισμό των αρμονικών του συνολικού ρεύματος του Α/Π, αντικείμενο που διερευνάται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.13. Διακύμανση της φασικής γωνίας των ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας και των κύριων αρμονικών περιττής τάξης 3^{ης}, 5^{ης} και 7^{ης} τάξης (150 δείγματα διάρκειας 0.2 s που αντιστοιχούν σε συνολικό χρονικό διάστημα 30 s), για την Α/Γ SG1.



Σχήμα 4.14. Διακύμανση της φασικής γωνίας των ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας της άρτιας αρμονικής 2^{ης} τάξης και αρμονικών μεγαλύτερων τάξεων από 500 Hz (150 δείγματα διάρκειας 0.2 s που αντιστοιχούν συνολικό χρονικό διάστημα 30 s), για την Α/Γ SG1.



Σχήμα 4.15. Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των φασικών γωνιών των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} και 50^{ης} τάξης για τις Α/Γ SG1 και ADF1.

4.4.2. Ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών

Προφανώς, τα χαρακτηριστικά των αρμονικών ρευμάτων των Α/Γ που συζητήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ισχύουν για καθεμιά από τις τρεις φάσεις. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις συνιστώσες θεμελιώδους συχνότητας, οι οποίες είναι σε μεγάλο βαθμό συμμετρικές συνιστώσες θετικής ακολουθίας, οι αρμονικές εμφανίζουν αξιοσημείωτα διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Εφαρμόζοντας τον FFT σε ένα δείγμα δεδομένων προκύπτουν τα διανύσματα των αρμονικών συνιστωσών των ρευμάτων για κάθε φάση. Στη συνέχεια μπορεί να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών για την εξαγωγή των ακολουθιακών συνιστωσών του ρεύματος για κάθε αρμονική τάξη:

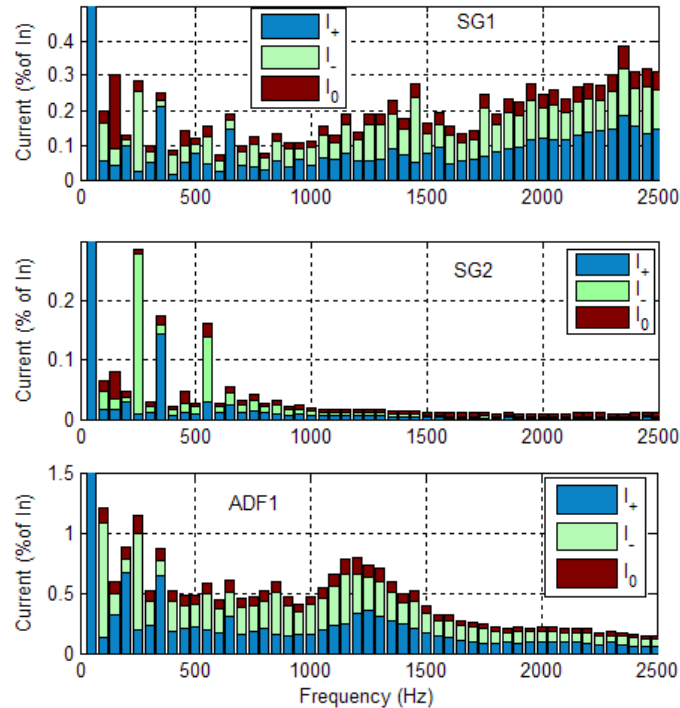
$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{I}_a \\ \tilde{I}_b \\ \tilde{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

όπου $a = e^{j120^\circ}$.

Η κατανόηση των ακολουθιακών χαρακτηριστικών των αρμονικών είναι σημαντική για τη διεξαγωγή αρμονικών αναλύσεων στο δίκτυο όπου συνδέεται μία Α/Γ. Καταρχήν, η διάδοση των αρμονικών μηδενικής ακολουθίας μπορεί να αναστέλλεται, ανάλογα με τη συνδεσμολογία των Μ/Σ (με πιο συνήθη τη συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου), συμπεριλαμβανομένου του Μ/Σ ανύψωσης της Α/Γ, εάν οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στους ακροδέκτες ΧΤ της μηχανής, [288]. Περαιτέρω, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας των στοιχείων του δικτύου είναι σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη θετικής ή αρνητικής ακολουθίας (με τις τελευταίες δύο να είναι ίσες μεταξύ τους σε δίκτυα που αποτελούνται από «παθητικά» στοιχεία).

Οι χαρακτηριστικές αρμονικές τάξεις $3k-1$, $3k$ και $3k+1$ (k ακέραιος) που συναντώνται στα ΣΗΕ, είναι τυπικά αρνητικής, μηδενικής και θετικής ακολουθίας αντίστοιχα, [46]. Ο κανόνας αυτός ισχύει στις χαμηλές συχνότητες και στην περίπτωση συμβατικών μετατροπέων μεταγωγής από το δίκτυο αλλά όχι απαραίτητα στην περίπτωση μετατροπέων PWM, που λειτουργούν σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες. Αυτό επιβεβαιώνεται από την ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι ακολουθιακές συνιστώσες για κάθε τάξη αρμονικής για τις Α/Γ SG1, SG2 και ADF1. Στις χαμηλές συχνότητες η ακολουθία των χαρακτηριστικών αρμονικών είναι σε μεγάλο βαθμό αναμενόμενη, εκτός από λίγες εξαιρέσεις (π.χ. οι αρμονικές 3^{ης} τάξης της Α/Γ ADF1 είναι κυρίως θετικής ακολουθίας). Στις υψηλότερες συχνότητες όμως, οι περισσότερες αρμονικές

έχουν την τάση να περιλαμβάνουν όλες τις συνιστώσες ακολουθίας, με τις συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας να είναι οι λιγότερο σημαντικές. Σημειώνεται επίσης ότι το μέγεθος κάθε συνιστώσας σε σχέση με το συνολικό αρμονικό ρεύμα της κάθε τάξης, παραμένει σχεδόν σταθερό. Παρόλο που τα διαγράμματα του Σχήματος 4.16 περιλαμβάνουν μόνο τις ακέραιες αρμονικές έως τα 2.5 kHz, παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τις ενδιάμεσες και ανώτερες αρμονικές, όλων των τύπων Α/Γ που εξετάστηκαν.



Σχήμα 4.16. Συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας των αρμονικών ρευμάτων των Α/Γ SG1, SG2 και ADF1 (τα ρεύματα εκφράζονται ως % του ονομαστικού).

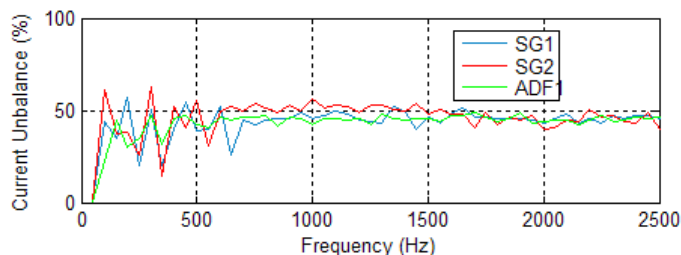
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ο κύριος εξοπλισμός ισχύος μιας Α/Γ (μετατροπείς δικτύου και στάτης των ΑΓΔΤ) δεν περιλαμβάνει ουδέτερο αγωγό ή γείωση και επομένως τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας δεν θα έπρεπε να εμφανίζονται. Οι μετρήσεις όμως των Α/Γ του Σχήματος 4.16 πραγματοποιήθηκαν στην πλευρά ΧΤ του μετασχηματιστή των Α/Γ, όπου είναι συνδεδεμένα επίσης μονοφασικά βοηθητικά φορτία. Επιπρόσθετα, εγκάρσια ρεύματα των καλωδίων και άλλες χωρητικότητες σκέδασης του συστήματος τροφοδοσίας και του εξοπλισμού ΧΤ είναι επίσης πιθανό να δημιουργούν μονοπάτι για την αγωγιμότητα ρεύματος μηδενικής ακολουθίας στις υψηλές συχνότητες. Τέλος, το επίπεδο ακρίβειας του μετρητικού συστήματος και η επιλεγείσα συχνότητα δειγματοληψίας αποτελούν πρόσθετες πιθανές πηγές σφαλμάτων.

Όσον αφορά την παρατηρούμενη ασυμμετρία, προφανώς σχετίζεται με την ασυμμετρία στο μέτρο και τη φασική γωνία των αρμονικών των ρευμάτων στις τρεις φάσεις. Οι ασυμμετρίες στο μέτρο των αρμονικών μπορούν να ποσοτικοποιηθούν χρησιμοποιώντας τον Συντελεστή Ασυμμετρίας Ρεύματος (Current Unbalance Factor - CUF), ο οποίος υπολογίζεται κατά αντίστοιχο τρόπο με τον Συντελεστή Ασυμμετρίας Τάσης (Voltage Unbalance Factor - VUF) που ορίζεται στο πρότυπο IEC 61800-3, [289]:

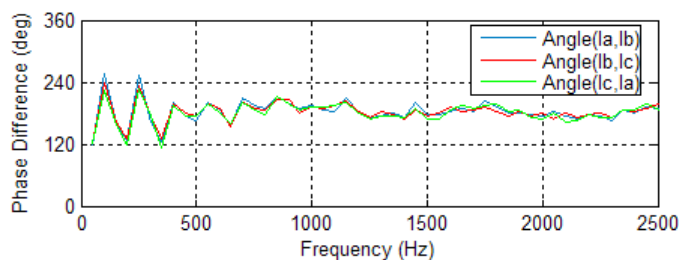
$$CUF = \frac{\max\{I_a - \bar{I}, I_b - \bar{I}, I_c - \bar{I}\}}{\bar{I}} \quad (4.8)$$

όπου: $\bar{I} = (I_a + I_b + I_c)/3$ είναι η μέση τιμή των αρμονικών ρευμάτων των τριών φάσεων για συγκεκριμένη τάξη.

Η μέση τιμή του CUF ως προς την τάξη της αρμονικής σχεδιάζεται στο Σχήμα 4.17 για τις Α/Γ SG1, SG2 and ADF1, ενώ στο σχήμα 4.18, απεικονίζεται η μέση τιμή της φασικής μετατόπισης των αρμονικών ρευμάτων των τριών φάσεων της Α/Γ SG1.



Σχήμα 4.17. Συντελεστής Ασυμμετρίας Ρεύματος (CUF) των αρμονικών ρευμάτων των τριών φάσεων ως συνάρτηση της συχνότητας, για τις Α/Γ SG1, SG2 και ADF1.



Σχήμα 4.18. Φασική μετατόπιση των αρμονικών ρευμάτων των τριών φάσεων ως συνάρτηση της συχνότητας, για την Α/Γ SG1.

Παρατηρείται ότι στις συχνότητες άνω του 1 kHz, τα αρμονικά ρεύματα εμφανίζουν πρακτικά σταθερή ασυμμετρία ίση με 50%, ενώ η φασική τους μετατόπιση είναι μόνιμα ίση με 180° . Το τελευταίο υποδηλώνει την ύπαρξη δύο ίσων αρμονικών ρευμάτων με αντίθετα πρόσημα στις δύο φάσεις με μηδενικό ρεύμα στην τρίτη φάση, διαπίστωση που παραπέμπει στη λογική διακοπτικής λειτουργίας των μετατροπέων ως την κύρια αιτία αυτής της συμπεριφοράς.

4.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη των αρμονικών εκπομπών ρεύματος διάφορων τύπων Α/Γ σύγχρονης τεχνολογίας, αξιοποιώντας τα δεδομένα και την εμπειρία που αποκτήθηκε από μία πολύ εκτεταμένη σειρά μετρήσεων πεδίου σε Α/Γ σε λειτουργία. Στόχος της εργασίας ήταν να συνεισφέρει στην κατανόηση των φασματικών χαρακτηριστικών των ρευμάτων των Α/Γ και των παραγόντων που τα επηρεάζουν, συμβάλλοντας στην πληρέστερη και αποτελεσματικότερη αξιολόγηση τους κατά τη διαδικασία σύνδεσης στο δίκτυο. Τα συμπεράσματα που εξάγονται συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Τα αρμονικά φάσματα εκτείνονται έως αρκετά kHz και είναι χαρακτηριστικά για τις μοντέρνες Α/Γ. Στις Α/Γ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος, οι οποίες είναι πιο πρόσφατης κατασκευής, η αρμονική παραμόρφωση στις χαμηλότερες συχνότητες (< 1 kHz) είναι εντονότερη, γεγονός που αποδίδεται στη χρήση αποτελεσματικών βαθυπερατών φίλτρων για την αποκοπή των συχνοτήτων που σχετίζονται με τις υψηλές διακοπτικές συχνότητες των μετατροπέων. Αυτό έχει ως συνέπεια, παρά τη χρήση μετατροπέων PWM, οι χαρακτηριστικές αρμονικές χαμηλής τάξης ($5^{η}$, $7^{η}$ κ.λπ) να παραμένουν σημαντικές. Εξίσου σημαντικές είναι και οι ενδιάμεσες αρμονικές ενώ η παρουσία ανώτερων αρμονικών συνιστωσών είναι μεν διακριτή αλλά όχι έντονη.
- Το σημείο λειτουργίας των Α/Γ έχει μικρή επίδραση στο επίπεδο της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος. Για τις επιμέρους τάξεις αρμονικών ρευμάτων ο κανόνας αυτός ισχύει για τις υψηλότερες συχνότητες (> 1 kHz), ενώ για τις χαμηλές τάξεις εντοπίζεται ελαφρώς εντονότερη εξάρτηση ανάλογα με τον τύπο της Α/Γ (και ενδεχομένως και τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο συνδέεται).
- Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης που εισάγεται από το πρότυπο IEC 61000-4-7, αυξάνει σημαντικά το μέτρο των αρμονικών, ιδιαίτερα στις υψηλές και ενδιάμεσες αρμονικές.
- Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μέτρου των αρμονικών ρευμάτων, όπως προκύπτουν απευθείας από την εφαρμογή του FFT, περιγράφονται από την κανονική κατανομή στις χαμηλές συχνότητες και από την κατανομή Rayleigh στις υψηλές συχνότητες. Όταν εφαρμόζεται όμως η ομαδοποίηση, όλες οι συχνότητες εμφανίζουν κανονική κατανομή.

- Το χρονικό διάστημα υπολογισμού της μέσης τιμής (time-averaging) των αρμονικών δεν έχει επίδραση στη μέση τιμή τους αλλά επηρεάζει σημαντικά τη διασπορά τους και επομένως την εκτιμώμενη μέγιστη τιμή τους.
- Οι αρμονικές των ρευμάτων έχουν την τάση να συγχρονίζονται με τη θεμελιώδη στις χαμηλές συχνότητες. Στις υψηλές συχνότητες, οι φασικές τους γωνίες παρουσιάζουν τυχαία διακύμανση (ομοιόμορφα κατανεμημένες τιμές μέσα στον κύκλο $[0, 2\pi)$).
- Οι αρμονικές συνιστώσες χαμηλής τάξης έχουν τα θεωρητικά αναμενόμενα ακολουθιακά χαρακτηριστικά. Στις ανώτερες συχνότητες, τα αρμονικά ρεύματα περιλαμβάνουν συνιστώσες θετικής και αρνητικής ακολουθίας ίδιου μεγέθους, ανεξάρτητα από την τάξη τους.

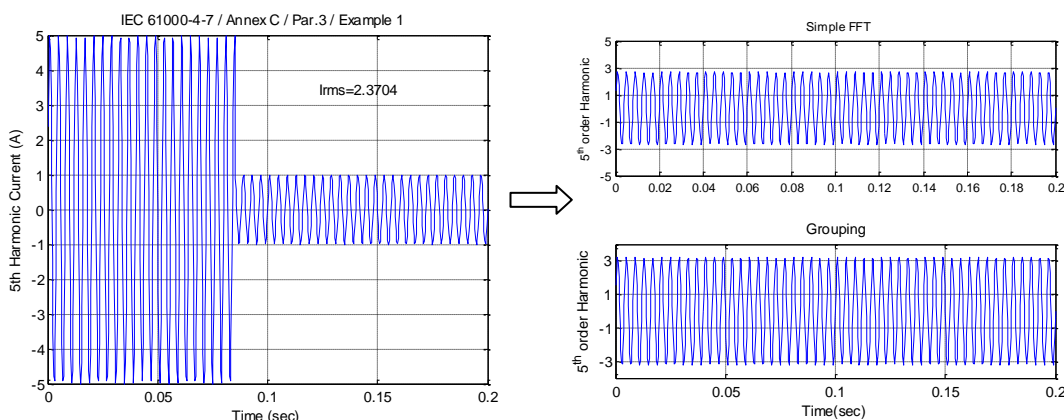
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

5.1. Αντικείμενα προς διερεύνηση

Η εφαρμογή του FFT και της μεθοδολογίας ομαδοποίησης κατά IEC 61000-4-7 στον υπολογισμό των αρμονικών ρευμάτων Α/Γ, έχουν ουσιαστική επίδραση στις υπολογιζόμενες συχνότητες και τα αντίστοιχα πλάτη που δηλώνονται στα πιστοποιητικά μετρήσεων. Η ανάγκη για αυξημένη ακρίβεια στους υπολογισμούς, προκειμένου να επιτυγχάνεται η ορθότερη δυνατή αξιολόγηση των αρμονικών εκπομπών των Α/Γ από τους διαχειριστές των δικτύων, οδήγησε στην περαιτέρω διερεύνηση ορισμένων ερωτημάτων που παραμένουν αναπάντητα από την υφιστάμενη διαδικασία.

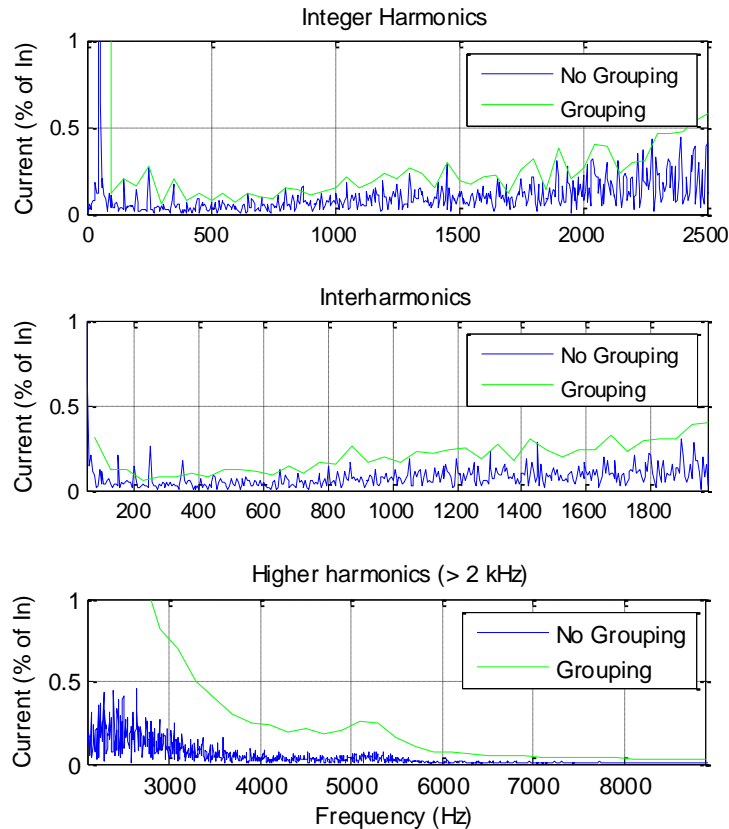
Ξεκινώντας από την τεκμηρίωση της μεθόδου του FFT και της ομαδοποίησης (FFTG), ως κριτήριο αποτελεσματικότητάς της, σύμφωνα με το IEC, θεωρείται το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής rms τιμής του εξεταζόμενου σήματος και της rms τιμής της υπολογιζόμενης αρμονικής. Η σχετικά επιτυχής προσέγγιση όμως της rms τιμής ενός μη στάσιμου σήματος δεν εξασφαλίζει ότι οι μέγιστες εμφανιζόμενες τιμές αρμονικών θα βρίσκονται συνεχώς εντός των υφιστάμενων ορίων για όλες τις συχνότητες ή ότι θα εντοπιστούν όλες οι συχνότητες που περιλαμβάνει ένα πραγματικό σήμα όταν αυτές βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Στο χαρακτηριστικό παράδειγμα του IEC 61000-4-7 (Σχήμα 5.1), η εφαρμογή του FFT για την ανάλυση βηματικής μεταβολής της 5^{ης} αρμονικής ρεύματος εντός τυπικού χρονικού παραθύρου μήκους 0.2 s, αποτυγχάνει να εντοπίσει τη διαταραχή αλλά και τις μέγιστες τιμές της αρμονικής. Αντί αυτού, το αποτέλεσμα του FFT υποδηλώνει την ύπαρξη αρμονικής σταθερής συχνότητας και πλάτους (στα 250 Hz και 2.7 A), το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της στο θεωρούμενο παράθυρο. Η πρόσθετη επεξεργασία μέσω της ομαδοποίησης αυξάνει το πλάτος της υπολογιζόμενης συνιστώσας στα 3.2 A, χωρίς ωστόσο να προσθέτει κάποια πληροφορία για τη χρονομεταβλητότητα του σήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μεθοδολογία του IEC 61000-4-7 θα ήταν πιο αποδοτική εάν είχε επιλεγεί χρονικό παράθυρο της τάξης των 0.1 s (5 κύκλων θεμελιώδους συχνότητας). Αυτό όμως θα επηρέαζε τη διακριτότητα συχνότητας του FFT (από 5 σε 10 Hz) με συνέπεια το ενδεχόμενο όφελος να ισοσκελίζεται από την αδυναμία εντοπισμού τυχόν ενδιάμεσων αρμονικών. Επιπρόσθετα, η αδυναμία εκτίμησης του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής κατά το χρονικό διάστημα έως τα 0.085 s (ίσο προς 5 A) θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση συμβατότητας με τα υφιστάμενα όρια και ενδεχόμενη πρόκληση αρμονικής παρενόχλησης στους υπόλοιπους χρήστες, ιδιαίτερα σε περίπτωση ασθενούς δικτύου.



Σχήμα 5.1. Αποτέλεσμα εφαρμογής «κλασικού» FFT και FFTG σε σήμα με μεταβολή της 5^{ης} αρμονικής.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας ομαδοποίησης, που ενδέχεται να επηρεάσει τη διαδικασία ελέγχου και αξιολόγησης των αρμονικών εκπομπών, είναι ότι οδηγεί στην αύξηση του πλάτους των αρμονικών συνιστωσών, άμεση συνέπεια του γεγονότος ότι η τελική τιμή κάθε ακέραιας αρμονικής προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη και τη συνεισφορά των γειτονικών της αρμονικών συχνοτήτων. Όπως διαπιστώθηκε από τη μελέτη του 4^{ου} Κεφαλαίου, η αύξηση του πλάτους μπορεί να

είναι σημαντική σε περιπτώσεις ύπαρξης ενδιάμεσων αρμονικών καθώς και στις ανώτερες συχνότητες. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2, όπου παρουσιάζεται το φάσμα του ρεύματος εξόδου A/Γ με μετατροπέα πλήρους ισχύος και έλεγχο ρεύματος υστέρησης, πριν και μετά την εφαρμογή της ομαδοποίησης για τις ακέραιες και ενδιάμεσες αρμονικές, αλλά και για τις ανώτερες συχνότητες, όπως ορίζονται από το IEC 61000-4-7 (> 2 kHz). Όπως είναι φανερό από το Σχήμα, οι τιμές των αρμονικών του φάσματος είναι αξιοσημείωτα μεγαλύτερες όταν εφαρμόζεται η ομαδοποίηση. Η επαλήθευση των τιμών αυτών και γενικότερα της μεθοδολογίας είναι πολύ σημαντική για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της τήρησης των υφιστάμενων ορίων.

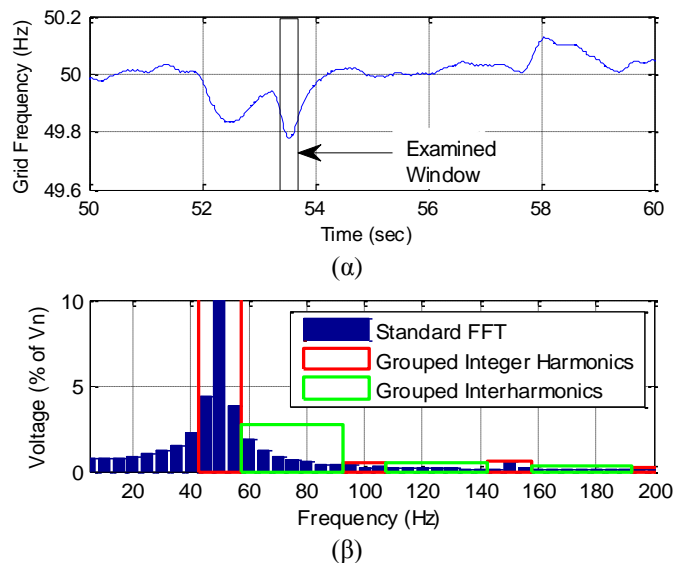


Σχήμα 5.2. Επίδραση της ομαδοποίησης στο φάσμα αρμονικών ρεύματος A/Γ με έλεγχο ρεύματος υστέρησης. Σύγκριση μεταξύ ομαδοποιημένων και μη τιμών για τις ακέραιες, ενδιάμεσες και ανώτερες αρμονικές συχνότητες.

Αντικείμενο προς συζήτηση αποτελεί και η δυνατότητα εντοπισμού διακυμάνσεων της συχνότητας του δικτύου. Η εφαρμογή της ομαδοποίησης για την αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής, υποθέτει ότι η θεμελιώδης συχνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή και ίση με 50 Hz. Η χρήση επομένως της μεθοδολογίας του IEC 61000-4-7 είναι αποδεκτή όταν η διακύμανση της θεμελιώδους συχνότητας είναι αμελητέα, όπως συμβαίνει στα ισχυρά δίκτυα. Αντίθετα, η διεξαγωγή μετρήσεων αρμονικών σε συστήματα με αξιοσημείωτες διακυμάνσεις της συχνότητας (μη διασυνδεδεμένα δίκτυα) απαιτεί τη χρήση εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης και υπολογισμού.

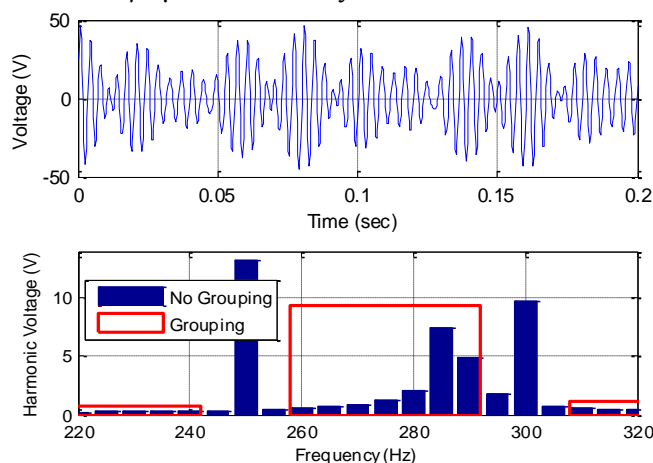
Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, στο Σχήμα 5.3 εικονίζεται η διακύμανση της συχνότητας ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος, που προέκυψε από μετρήσεις στην έξοδο A/Γ²². Με την εφαρμογή του FFT στην τάση εξόδου της A/Γ προκύπτει ως αποτέλεσμα μία κύρια συχνότητα ακριβώς στα 50 Hz και δύο πλευρικές αρμονικές (sidebands) στα 45 και 55 Hz (± 5 Hz), το πλάτος των οποίων είναι προϊόν φασματικής διαρροής. Εφαρμόζοντας την ομαδοποίηση, οι πλευρικές αρμονικές της θεμελιώδους συνιστώσας των 50 Hz συσσωρεύονται στην αντίστοιχη κύρια αρμονική, με άμεση συνέπεια την απώλεια της πληροφορίας σχετικά με την ακριβή τιμή αλλά και τη διακύμανση του πλάτους του φασματικού περιεχομένου της τάσης. Το ίδιο συμβαίνει και με τις χαρακτηριστικές αρμονικές της τάσης (3^η, 5^η κ.λπ.).

²² Η καταγραφή της συχνότητας είναι απαραίτητη κατά τη διενέργεια μετρήσεων ποιότητας ισχύος στις A/Γ, σύμφωνα με το IEC 61400-21



Σχήμα 5.3. (α) Διακυμάνσεις θεμελιώδους συχνότητας σε ασθενές αυτόνομο δίκτυο, (β) φάσμα αρμονικών έως 200 Hz πριν και μετά την ομαδοποίηση για το χρονικό παράθυρο που εικονίζεται στο (α). Το πλάτος της θεμελιώδους δεν εικονίζεται ολόκληρο προκειμένου να είναι «ορατές» οι υπόλοιπες συχνότητες.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί εκ νέου η αδυναμία του FFT στο διαχωρισμό διακριτών τόνων που απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από 5 Hz ή δεν συμπίπτουν με τα ακέραια πολλαπλάσια της βασικής διακριτότητας συχνότητας των 5 Hz. Η ύπαρξη τέτοιων συχνοτήτων σε πραγματικά σήματα Α/Γ, συνδέεται καταρχήν με τις στροφές λειτουργίας της ηλεκτρικής γεννήτριας (στην περίπτωση ΑΓΔΤ) αλλά μπορεί και να αποτελεί ένδειξη βλάβης κάποιας διάταξης στο ηλεκτρικό ή το μηχανικό μέρος μιας Α/Γ. Η αδυναμία του FFT στη διαχείριση τέτοιων περιπτώσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των FFT και FFTG σε σήμα αναφοράς του IEC 61000-4-7, που περιλαμβάνει σημαντική ενδιάμεση αρμονική στα 287 Hz (ίση με 9.8 V) ανάμεσα στην 5^η και 6^η ακέραια αρμονική, πλάτους 13.2 V και 10 V αντίστοιχα. Ο κλασικός FFT υποφέρει από την εμφάνιση σοβαρής φασματικής διαρροής, ενώ ο FFTG μετατοπίζει τον ενδιάμεσο αρμονικό τόνο από τα 287 στα 275 Hz, παρουσιάζοντας παράλληλα μειωμένη ακρίβεια στον υπολογισμό του πλάτους.



Σχήμα 5.4 (α) Σήμα αναφοράς του IEC 61000-4-7/Annex C/Par.4/Example 2 και (β) Αποτελέσματα εφαρμογής FFT and FFTG.

Με αφορμή τις παραπάνω διαπιστώσεις, το παρόν Κεφάλαιο έχει σαν στόχο να συμπληρώσει ορισμένα από τα «ανοιχτά» ζητήματα που αφήνει η μεθοδολογία του IEC 61000-4-7 στην εκτίμηση των αρμονικών εκπομπών Α/Γ, εφαρμόζοντας κάποιες από τις εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού που αναπτύχθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Ειδικότερα, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Wavelets και των μεθόδων Hilbert-Huang και Prony. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί στη συνέχεια περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Αξιοποίηση των συνθετικών σημάτων που χρησιμοποιεί το IEC 61000-4-7 στα πλαίσια της επαλήθευση της μεθόδου της ομαδοποίησης, για τη διερεύνηση αποτελεσματικότητας του μετασχηματισμού Wavelets (WT) και των μεθόδων Hilbert-Huang (HHT) και Prony.
- Εφαρμογή των μεθόδων σε συνθετικά σήματα με πιο σύνθετο φασματικό περιεχόμενο, που προσομοιάζει πραγματικές κυματομορφές Α/Γ. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB/Simulink ενός τυπικού 6-παλμικού αντιστροφέα με thyristors και ενός αντιστροφέα με IGBTs και έλεγχο SPWM.
- Εφαρμογή των Wavelets, Hilbert-Huang και Prony σε επιλεγμένες μετρήσεις ρευμάτων και τάσεων Α/Γ και σχολιασμός αποτελεσμάτων.

5.2. Αξιολόγηση των μεθόδων Wavelets, Hilbert-Huang και Prony με τη βοήθεια των σημάτων αναφοράς του IEC 61000-4-7

Η χρήση των σημάτων αναφοράς του προτύπου IEC 61000-4-7, τα οποία χρησιμοποιούνται από το πρότυπο για την τεκμηρίωση της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης, προσφέρει την ευκαιρία όχι μόνο της επαλήθευσης των εναλλακτικών μεθόδων αλλά και της άμεσης σύγκρισης τους με τη μεθοδολογία του IEC. Η θεώρηση των παραδειγμάτων του IEC 61000-4-7, συναντάται σε πολύ λίγες δημοσιεύσεις, όπως π.χ. η [108] η οποία αναφέρεται στη σύγκριση της αποτελεσματικότητας χρήσης τετραγωνικού παραθύρου για τον FFT, έναντι του παραθύρου *Hanning* και η [117], στην οποία χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της μεθοδολογίας του IEC με το μετασχηματισμό Wavelets.

Η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας ομαδοποίησης (grouping) στα σήματα αναφοράς του IEC 61000-4-7 συζητήθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Εφαρμόζοντας τις WT, HHT και Prony, προκύπτουν ορισμένα αξιοσημείωτα συμπεράσματα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

5.2.1. Εντοπισμός διακυμάνσεων αρμονικών συχνοτήτων

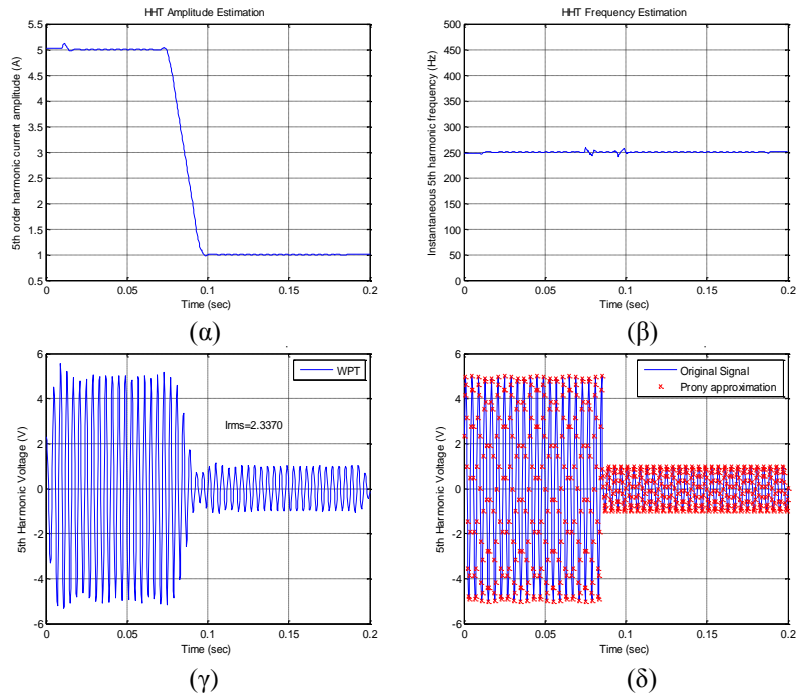
A. Παράδειγμα 1 (IEC 61000-4-7/Annex C§3-Example 1)

Στο Σχήμα 5.5 (α) αναλύεται, με τη μέθοδο HHT, το σήμα ρεύματος 5^{ης} αρμονικής του Σχήματος 3.12, το οποίο εμφανίζει βηματική μείωση πλάτους από 5 A σε 1 A. Για τη θεώρηση κοινής αναφοράς με το πρότυπο IEC 61000-4-7, επιλέχθηκε χρονικό παράθυρο ίσο με 10 κύκλους (0.2 s). Ο αλγόριθμος εφαρμογής της HHT ακολουθεί τις γενικές αρχές που περιγράφηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Η μέθοδος λειτουργεί πολύ αποδοτικά σε αυτή την απλή περίπτωση σήματος μοναδικής συχνότητας και υπολογίζει με σχεδόν απόλυτη ακρίβεια το πλάτος του ρεύματος πριν και μετά το σφάλμα καθώς και την αντίστοιχη συχνότητα, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 (β).

Η προστιθέμενη αξία της HHT σε σχέση με τον FFT και τον FFTG είναι η δυνατότητα υπολογισμού της στιγμιαίας συχνότητας και του αντίστοιχου πλάτους. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα, σε αντίθεση με τον FFT, ακριβέστερου εντοπισμού των διακυμάνσεων των αρμονικών που εκτέμονται προς το δίκτυο. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η HHT υποφέρει από γνωστές στη βιβλιογραφία αδυναμίες, όπως οι αποκλίσεις στα άκρα της κυματομορφής (end-effect) και οι ταλαντώσεις κατά τη στιγμή του μεταβατικού, οι οποίες, στη συγκεκριμένη περίπτωση, αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με τη χρήση φίλτρου κινούμενου μέσου όρου 64 σημείων.

Αντίστοιχη αποτελεσματικότητα με την HHT έχει και η εφαρμογή του μετασχηματισμού Wavelets, μέσω του WPT. Η επιλογή δέντρου 4 επιπέδων οδηγεί στον ικανοποιητικό εντοπισμό της διαταραχής (χρονική στιγμή και διακύμανση πλάτους), ενώ και η εκτιμώμενη rms τιμή του σήματος σε ολόκληρο το χρονικό διάστημα των 0.2 s βρίσκεται πολύ κοντά στην αντίστοιχη τιμή που εκτιμάται μέσω του FFTG (2.3370 A έναντι 2.3704 A), όπως εικονίζεται στο Σχήμα 5.5 (γ).

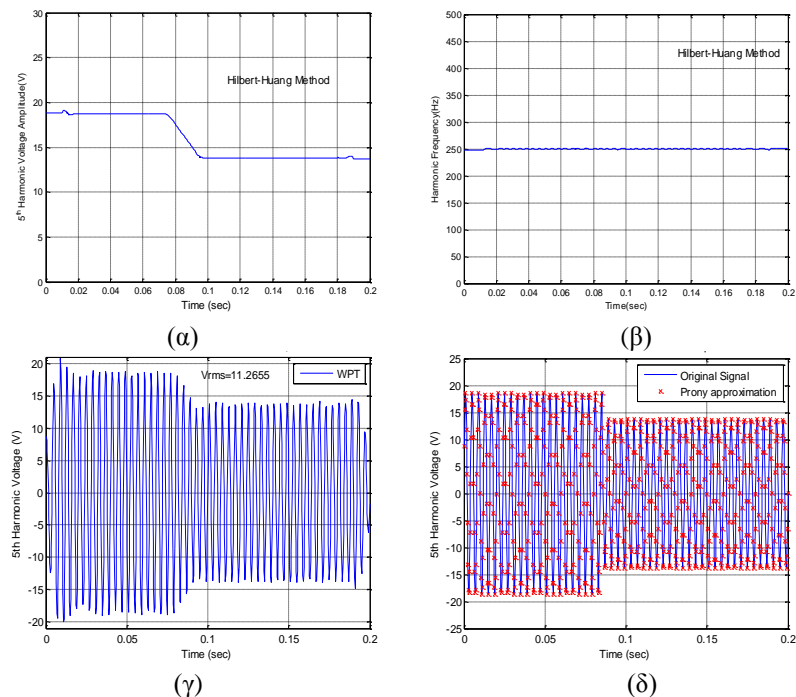
Τέλος, παρά το γεγονός ότι η Prony προϋποθέτει στασιμότητα του εξεταζόμενου σήματος, η πολύ καλή διακριτότητα συχνότητας ανεξάρτητα από το μήκος του παραθύρου, συμβάλει στην επίτευξη πολύ μεγάλης ακρίβειας στην εκτίμηση της εξεταζόμενης συχνότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5 (δ), διαχωρίζοντας το χρονικό παράθυρο των 0.2 s σε μικρότερα, υπολογίζεται με ακρίβεια η συχνότητα πριν και μετά τη διαταραχή ($I_{rms}(t < 0.085) = 5/\sqrt{2}A$ και $I_{rms}(t \geq 0.085) = 2/\sqrt{2}A$). Σημειώνεται ότι η εφαρμογή του κλασικού FFT σε χρονικό παράθυρο 0.085 s θα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικής φασματικής διαρροής λόγω της ατελούς διακριτότητας συχνότητας.



Σχήμα 5.5. Φασματική ανάλυση σήματος που περιλαμβάνει βηματική μείωση του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας ρεύματος (κατά IEC 61000-4-7/ Παράρτημα C3/1): (α) Εκτίμηση πλάτους με χρήση HHT, (β) Εκτίμηση συχνότητας με χρήση HHT, (γ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση WPT και (δ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση Prony και σύγκριση με το αρχικό σήμα.

B. Παράδειγμα 2 (IEC 61000-4-7/Annex C3-Example 2)

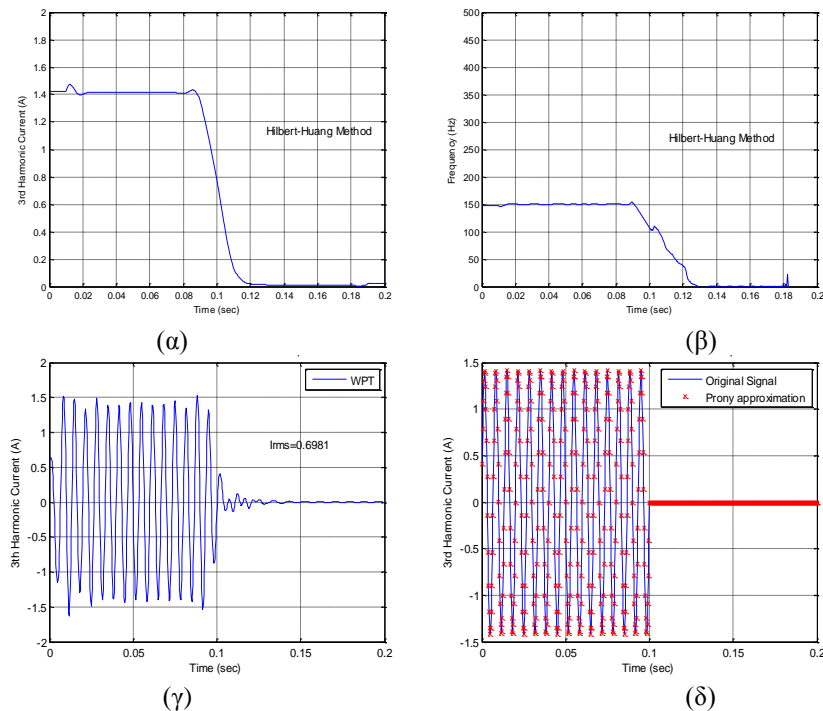
Το δεύτερο παράδειγμα, αναφέρεται σε διακύμανση της 5^{ης} αρμονικής τάσης (από 13.225 V σε 9.775 V). Τα αποτελέσματα εφαρμογής των HHT, WPT και Prony εικονίζονται στο Σχήμα 5.6. Και σε αυτή την περίπτωση, οι HHT και WPT εντοπίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη διαταραχή, ενώ η Prony είναι σε θέση να εκτιμήσει με απόλυτη ακρίβεια το πλάτος της αρμονικής πριν και μετά τη διαταραχή, θεωρώντας χρονικά παράθυρα μικρότερα των 0.2 s.



Σχήμα 5.6. Φασματική ανάλυση σήματος που περιλαμβάνει βηματική μείωση του πλάτους της 5^{ης} αρμονικής συνιστώσας τάσης (κατά IEC 61000-4-7/ Παρ. C3/2): (α) Εκτίμηση πλάτους με χρήση HHT, (β) Εκτίμηση συχνότητας με χρήση HHT, (γ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση WPT και (δ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση Prony.

Γ. Παράδειγμα 3 (IEC 61000-4-7/Annex C§3-Example 3)

Το παράδειγμα αυτό του προτύπου IEC, αναφέρεται σε διακοπόμενη εμφάνιση αρμονικής συνιστώσας ρεύματος. Και εδώ, τόσο η ΗΗΤ όσο και ο WPT επιτυγχάνουν να εντοπίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη διακύμανση του πλάτους, το μηδενισμό της συχνότητας αλλά και το χρονικό σημείο της διαταραχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Και σε αυτή την περίπτωση, οι μικρές ταλαντώσεις που διακρίνονται στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, αποδίδονται κυρίως σε αριθμητικού τύπου ασυνέχειες της ρουτίνας splines για την ΗΗΤ και στα χαρακτηριστικά της μητρικής συνάρτησης Wavelets (στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε η Daubechies 45 συντελεστών). Από την άλλη πλευρά, η Prony υπολογίζει και πάλι με ακρίβεια το πλάτος της αρμονικής πριν και μετά τη διαταραχή, με την προϋπόθεση της κατάλληλης επιλογής χρονικού παραθύρου.



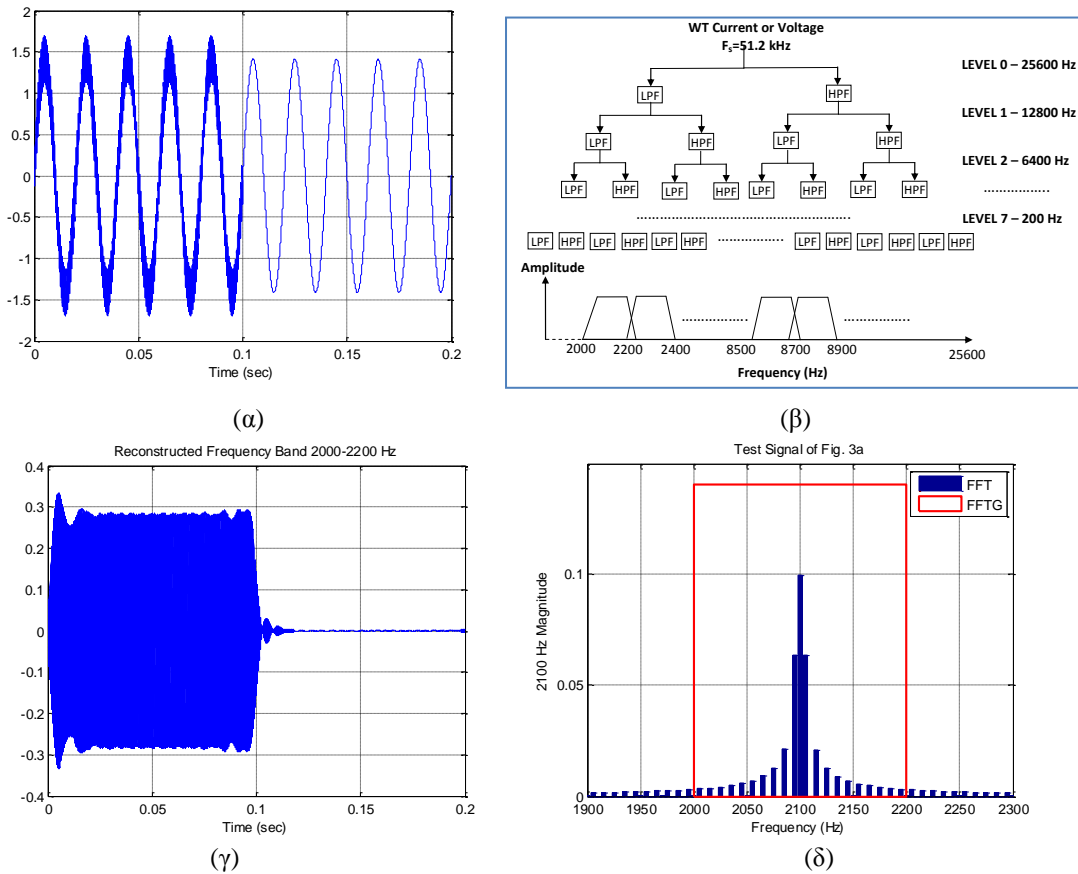
Σχήμα 5.7. Φασματική ανάλυση σήματος που περιλαμβάνει διακοπή της $3^{η}$ αρμονικής συνιστώσας ρεύματος (κατά IEC 61000-4-7/ Παρ. C3/3): (α) Εκτίμηση πλάτους με χρήση ΗΗΤ, (β) Εκτίμηση συχνότητας με χρήση ΗΗΤ, (γ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση WPT και (δ) Αναπαραγωγή σήματος με χρήση Prony.

Δ. Μεταβατική διαταραχή στην περιοχή των ανώτερων αρμονικών (> 2 kHz)

Εκτός από τα παραπάνω παραδείγματα του IEC 61000-4-7, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση της εφαρμογής ειδικά του WPT σε σήματα που περιλαμβάνουν ανώτερες αρμονικές, δεδομένου ότι η μεθοδολογία του προτύπου για αυτές τις συχνότητες (> 2 kHz) είναι συμβατή με τις ζώνες συχνοτήτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του WPT, εφόσον επιλεγεί δέντρο με τον κατάλληλο αριθμό επιπέδων. Για την ανάδειξη αυτής της δυνατότητας, επιλέγεται το συνθετικό σήμα του Σχήματος 5.8 (α), το οποίο περιλαμβάνει την θεμελιώδη συνιστώσα των 50 Hz με rms τιμή ίση με 1 α.μ., στην οποία υπερτίθεται διακριτός τόνος συχνότητας ίσης με 2100 Hz με rms τιμή ίση με το 20% της θεμελιώδους μέχρι τη χρονική στιγμή $t=0.1$ s και στη συνέχεια μηδενίζεται. Για τη διατήρηση της συμβατότητας με το IEC 61000-4-7 και την τρέχουσα πρακτική στις μετρήσεις αρμονικών Α/Γ, χρησιμοποιείται συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 51.2 kHz σε χρονικό παράθυρο ίσο με 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας. Η ανάλυση σε ομοιόμορφες ζώνες συχνοτήτων εύρους 200 Hz επιτυγχάνεται μέσω δέντρου 7 επιπέδων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο 2^ο Κεφάλαιο και απεικονίζεται στο 5.8 (β)²³, ενώ το αναπαραχθέν σήμα μετά την εφαρμογή του WPT εντός της ζώνης συχνότητας ενδιαφέροντος (2000-2200 Hz), παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8 (γ). Για λόγους σύγκρισης, στο Σχήμα 5.8 (δ) παρουσιάζονται οι αρμονικές συνιστώσες που εκτιμώνται από την εφαρμογή των FFT και FFTG, ενώ στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του WPT με

²³ Οι όροι LPF and HPF στο Σχήμα 5.8 (β) αντιστοιχούν σε Low-Pass και High-Pass Filter.

χρήση τριών επικρατέστερων μητρικών συναρτήσεων Wavelets για τα σήματα ποιότητας ισχύος (Meyer και Daubechies με 24 και 45 συντελεστές), παράλληλα με τα αποτελέσματα των FFT και FFTG. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο WPT παρουσιάζει πολύ μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση του πλάτους της συνιστώσας των 2100 Hz, καθώς και στον εντοπισμό της χρονικής στιγμής του μεταβατικού φαινομένου. Από την άλλη πλευρά, οι FFT and FFTG παρέχουν ένα μοναδικό πλάτος για ολόκληρο το διάστημα των 0.2 s, με το αποτέλεσμα του FFTG να συμβαδίζει απόλυτα με την rms τιμή του αναπαραχθέντος σήματος του WPT για το ίδιο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.8 (α) Σήμα αναφοράς που περιλαμβάνει θεμελιώδη συνιστώσα 50 Hz με rms τιμή ίση με 1 α.μ. και υπερτιθέμενο τόνο συχνότητας 2100 Hz (με rms τιμή ίση με 0.2 α.μ.) που μηδενίζεται τη χρονική στιγμή $t=0.1$ s. (β) Δέντρο WPT 7 επιπέδων που οδηγεί σε ζώνες συχνοτήτων εύρους 200 Hz, (c) Αναπαραγωγή του σήματος αναφοράς με χρήση του WPT στη ζώνης συχνοτήτων 2000-2200 Hz και (δ) Αποτελέσματα εφαρμογής FFT και FFTG.

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα αρμονικής ανάλυσης με τη χρήση FFT και WPT για το σήμα αναφοράς του Σχήματος 5.8 (α).

Frequency Band (Hz)	FFT	FFTG	Wavelet Packet Transform					
			Meyer		Daubechies (24 coeffs.)		Daubechies (45 coeffs.)	
			0-0.1s	0.1-0.2s	0-0.1s	0.1-0.2s	0-0.1s	0.1-0.2s
2000-2200	0.1000	0.1407	0.1976	0.0092	0.1969	0.0104	0.1987	0.0103
			0.1399		0.1394		0.1407	

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την εξέταση της παραπάνω ομάδας παραδειγμάτων που αναφέρονται στον εντοπισμό διακυμάνσεων αρμονικών συχνοτήτων, είναι ότι η μέθοδος Hilbert-Huang μπορεί να προσεγγίσει με πολύ καλή ακρίβεια τέτοιου τύπου διαταραχές στα ΣΗΕ. Επιπρόσθετα, ο μετασχηματισμός Wavelets είναι ανταγωνιστικός του FFTG στην αρμονική ανάλυση σημάτων με διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών αρμονικών συχνοτήτων. Επίσης, παρά το γεγονός ότι

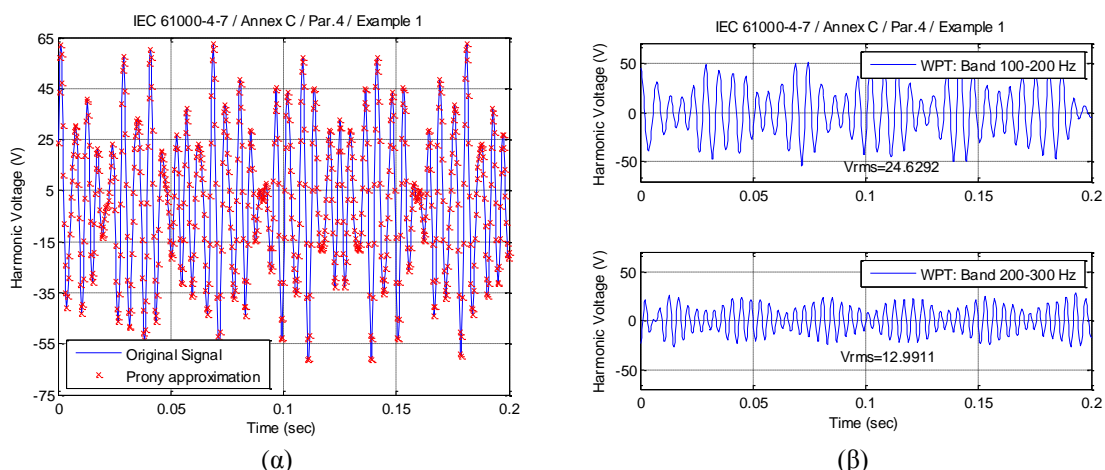
η εφαρμογή της μεθόδου Prony προϋποθέτει στασιμότητα του εξεταζόμενου σήματος, χάρη στην πολύ καλή διακριτότητα συχνότητας ανεξάρτητα από το μήκος του χρονικού παραθύρου, υπολογίζει με απόλυτη ακρίβεια τα πλάτη των αρμονικών πριν και μετά τη διαταραχή. Προφανώς, η επιλογή του κατάλληλου χρονικού παραθύρου για την εφαρμογή της Prony δεν είναι προφανής σε πραγματικά σήματα, όπου δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων τυχόν διαταραχές. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα επιλογής μικρότερου χρονικού παραθύρου (π.χ. μήκους 0.1s) ή ακόμη και μεταβλητού μήκους σε περιπτώσεις όπου υπάρχει υπόνοια για εμφάνιση μεταβατικών καταστάσεων, την καθιστά πλεονεκτικότερη έναντι του FFT, του οποίου η διακριτότητα συχνότητας μειώνεται (π.χ. αντίστοιχα στα 10 Hz), οδηγώντας σε αδυναμία ορθού υπολογισμού της ενδιάμεσης συνιστώσας.

5.2.2. Εντοπισμός ενδιάμεσων αρμονικών συνιστωσών

Η θεώρηση συνθετικών σημάτων που περιλαμβάνουν συγκεκριμένες χαρακτηριστικές αρμονικές χαμηλής τάξης, δεν παρέχει ολοκληρωμένη εικόνα για την αξιολόγηση των μεθόδων. Όπως αναπτύχθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, τόσο η HHT όσο και ο WPT παρουσιάζουν σημαντική δυσκολία ή και πλήρη αδυναμία στην ανάλυση σημάτων που περιλαμβάνουν μη ακέραιες και κοντινές συνιστώσες συχνότητας. Για τη διερεύνηση αυτών των περιπτώσεων, η εξέταση συνθετικών σημάτων επεκτείνεται πέρα από τις μεταβατικές διαταραχές μοναδικών συχνοτήτων, στην παρουσία σημαντικών ενδιάμεσων αρμονικών συχνοτήτων, οι οποίες αποτελούν τυπικό χαρακτηριστικό των αρμονικών εκπομπών Α/Γ. Οι περιπτώσεις αυτές καλύπτονται από τη δεύτερη ομάδα παραδειγμάτων του IEC 61000-4-7, όπου και πάλι εξετάζονται οι τρεις μέθοδοι (HHT, WPT και Prony).

A. Παράδειγμα 4 (IEC 61000-4-7/Annex C §4-Example 1)

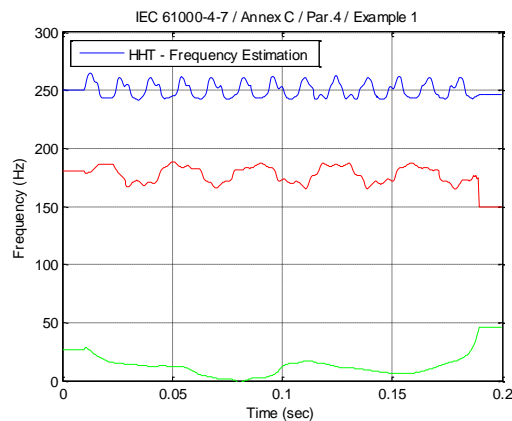
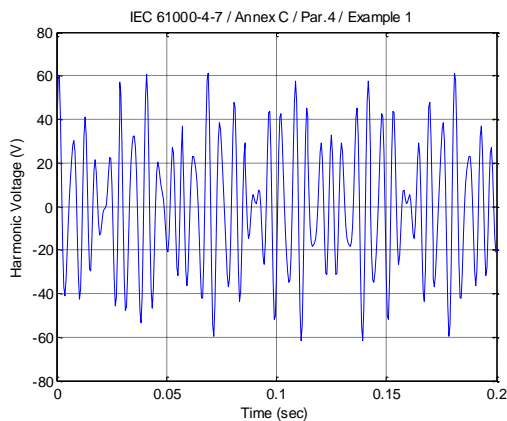
Στο Σχήμα 5.9 εικονίζεται το αποτέλεσμα εφαρμογής των μεθόδων Prony και WPT σε σήμα τάσης που περιλαμβάνει 3^η και 5^η αρμονική συνιστώσα, ανάμεσα στις οποίες παρεμβάλλεται διακριτός τόνος συχνότητας 178 Hz και πλάτους διπλάσιου από τις δύο ακέραιες αρμονικές. Η μέθοδος Prony υπολογίζει με απόλυτη ακρίβεια τις αρμονικές συχνότητες του εξεταζόμενου σήματος, όπως φαίνεται τόσο στο Σχήμα 5.9 (α), όπου απεικονίζονται το σήμα αναφοράς και η προσέγγιση του σήματος με την Prony (πλήρης ταύτιση), όσο και στον Πίνακα 5.2, όπου αναδεικνύεται η δυνατότητα της Prony έναντι του FFTG να εντοπίσει με ακρίβεια τον ενδιάμεσο αρμονικό τόνο χωρίς να υποφέρει από φασματική διαρροή. Από την άλλη πλευρά, το παράδειγμα αυτό αναδεικνύει την αδυναμία του WPT να διαχειριστεί σήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλές συχνότητες όταν βρίσκονται εντός της ίδιας ζώνης συχνότητας εύρους 100 Hz (χρησιμοποιείται συχνότητα δειγματοληψίας 3200 Hz και δέντρο 4 επιπέδων). Όσον αφορά την HHT, δεν είναι σε θέση να διαχειριστεί με επιτυχία σήματα με κοντινές αρμονικές, ειδικά όταν τα πλάτη τους είναι συγκρίσιμα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10, ακόμη και με τη χρήση τεχνικών *masking signal* (όπως περιγράφονται στο 2^ο Κεφάλαιο).



Σχήμα 5.9. Φασματική ανάλυση σήματος τάσης που περιλαμβάνει 3^η και 5^η αρμονική rms τιμής ίσης με 11.5 V και σημαντική μη ακέραια αρμονική 178 Hz με rms τιμή 23 V (κατά IEC 61000-4-7/ Παρ. C4/1) με εφαρμογή: (α) μεθόδου Prony και (β) WPT.

Πίνακας 5.2. Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων Prony, FFTG και WPT στο σήμα αναφοράς του IEC 61000-4-7 / Annex C / Par. 4 / Example 1.

Σήμα Εισόδου		Αποτέλεσμα Prony		Αποτέλεσμα FFTG		Αποτέλεσμα WPT	
Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)
150	11.50	150	11.50	150	11.38	100-200	24.63
178	23.00	178	23.00	175	22.37		
250	11.50	250	11.50	250	11.70	200-300	12.99



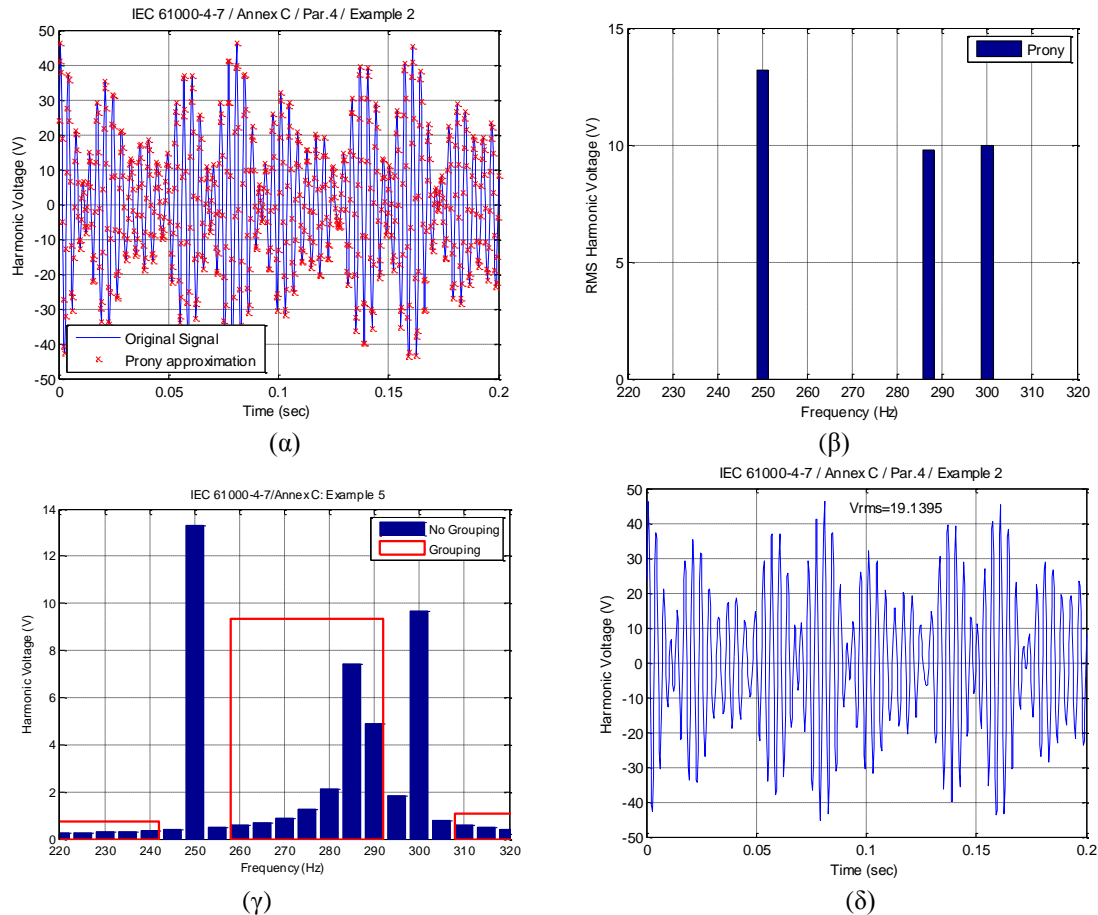
Σχήμα 5.10. Ανεπιτυχής εφαρμογή της HHT στην ανάλυση του σήματος αναφοράς του IEC 61000-4-7 / Annex C §4 / Example 1, το οποίο περιλαμβάνει έναν ενδιάμεσο αρμονικό τόνο στα 178 Hz μεταξύ 3^{15} και 5^{15} αρμονικής συνιστώσας.

B. Παράδειγμα 5 (IEC 61000-4-7/Annex C §4-Example 2)

Κατά αντίστοιχο τρόπο, το παράδειγμα του Σχήματος 5.11 εξετάζει την περίπτωση εμφάνισης ενδιάμεσης αρμονικής (με rms τιμή 9.8 V στα 287 Hz) μεταξύ δύο γειτονικών ακέραιων αρμονικών τάσης (με rms τιμή 13.2 V στα 250 Hz και 10 V στα 300 Hz). Και σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή της ανάλυσης Prony οδηγεί σε τέλεια προσαρμογή του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου στο πραγματικό σήμα (Σχήμα 5.11 (α)), ενώ ο υπολογισμός του διακριτού τόνου συχνότητας γίνεται με απόλυτη ακρίβεια (Σχήμα 5.11 (β)). Αντίθετα, η εφαρμογή του FFTG, αποτυγχάνει να εντοπίσει την ακριβή θέση της αρμονικής συνιστώσας στο φάσμα, μετατοπίζοντάς την στα 275 Hz, γεγονός που έχει επίπτωση και στην ακρίβεια του υπολογιζόμενου πλάτους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο «κλασικός» FFT προσεγγίζει καλύτερα τη συχνότητα της αρμονικής συνιστώσας (στα 285 Hz), υποφέρει όμως, από έντονη φασματική διαρροή, όπως είναι αναμενόμενο λόγω του ότι η διακριτότητα συχνότητας των 5 Hz δεν επαρκεί για τον ακριβή εντοπισμό της. Η επίδραση του «κλασικού» FFT και του FFTG στο προκύπτον φάσμα του εξεταζόμενου σήματος, απεικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 5.11 (γ). Η εικόνα του φάσματος του FFT υποδηλώνει μεν την ύπαρξη διακριτού τόνου στην περιοχή συχνοτήτων από 280 έως 300 Hz, χωρίς όμως να προσφέρεται για ακριβέστερα συμπεράσματα. Όσον αφορά στον WPT, το αποτέλεσμά του εκφράζει το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο της ζώνης 200 – 300 Hz και δεν παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού της ενδιάμεσης αρμονικής συνιστώσας, ενώ και πάλι η HHT αποτυγχάνει να διαχωρίσει τις κοντινές συχνότητες (Σχήμα 5.11 (δ)).

Πίνακας 5.3. Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων Prony, FFTG και WPT στο σήμα αναφοράς του IEC 61000-4-7 / Annex C / Par. 4 / Example 2.

Σήμα Εισόδου		Αποτέλεσμα Prony		Αποτέλεσμα FFTG		Αποτέλεσμα WPT	
Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)
250	13.2	250	13.20	250	13.34	200 – 300	19.1395
287	9.8	287	9.80	275	9.35		
300	10.0	300	9.99	300	9.90		

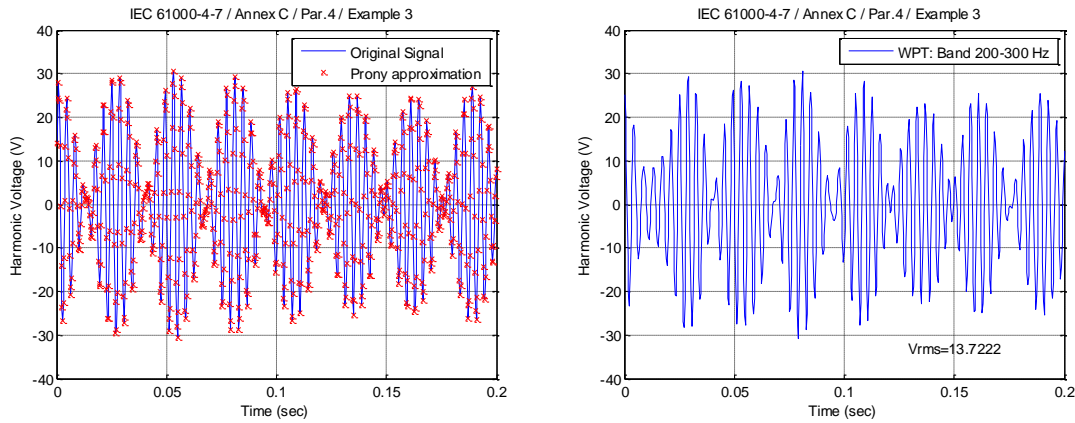


Σχήμα 5.11. Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης σήματος τάσης που περιλαμβάνει μη ακέραια αρμονική 287 Hz με rms τιμή 9.8 V μεταξύ 5^{ης} και 6^{ης} αρμονικής τάσης με rms τιμές ίσες με 13.2 V και 10 V αντίστοιχα (Σήμα αναφοράς IEC 61000-4-7/Annex C/Παρ.4/2): (α) Αναπαράγωγή σήματος με τη μέθοδο Prony, (β) Αποτέλεσμα Prony (γ) Αποτελέσματα FFT και FFTG και (δ) Αναπαράγωγή σήματος με τον WPT.

Γ. Παράδειγμα 6 (IEC 61000-4-7/Annex C §4-Example 3)

Η διερεύνηση των σημάτων αναφοράς του IEC 61000-4-7 ολοκληρώνεται με την εξέταση σήματος τάσης 5^{ης} αρμονικής, το πλάτος της οποίας ταλαντώνεται σε εύρος 20% (peak to peak) με συχνότητα 5 Hz, με ταυτόχρονη ύπαρξη του διακριτού τόνου των 287 Hz του προηγούμενου παραδείγματος. Από τη θεωρητική ανάλυση του συγκεκριμένου σήματος, το οποίο έχει τη μορφή διακροτήματος, αναμένεται η εμφάνιση δύο διανυσμάτων πλευρικών αρμονικών γύρω από την κύρια συχνότητα των 250 Hz, οι οποίες θα ισαπέχουν από την κύρια συχνότητα κατά 5 Hz, όση είναι και η συχνότητα διακύμανσης της κύριας αρμονικής. Η rms τιμή των αρμονικών αυτών παραμένει σταθερή και ίση με το 10% της rms της κύριας αρμονικής (10 ± 1 V), ενώ η ουσιαστική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα δύο διανύσματα έχουν αντίθετη φορά. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4, η μέθοδος Prony εντοπίζει με επιτυχία τις εμφανιζόμενες συχνότητες του σήματος, ενώ ο FFTG συγκεντρώνει το αποτέλεσμα στα 250 και 275 Hz, που δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Η εφαρμογή του «κλασικού» FFT εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες των 245 και 255 Hz με εμφανή όμως την επίπτωση της φασματικής διαρροής στην ακρίβεια των αντίστοιχων πλατών. Όσον αφορά τον WPT (Σχήμα 5.12 (β)) και την HHT, αμφότερες αποτυγχάνουν να εντοπίσουν τους διακριτούς τόνους του εξεταζόμενου σήματος.

Το συνολικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη δεύτερη σειρά παραδειγμάτων του IEC 61000-4-7, τα οποία επικεντρώνουν στον εντοπισμό ενδιάμεσων αρμονικών, είναι ότι η μέθοδος Prony λειτουργεί πολύ αποδοτικά και ανεξάρτητα από τη επιλογή του χρονικού παραθύρου. Αντίθετα η εφαρμογή των WPT και HHT δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική και συνεπώς οι δύο αυτές μέθοδοι δεν κρίνονται κατάλληλες για την αρμονική ανάλυση σημάτων που περιλαμβάνουν κοντινές αρμονικές χαμηλής τάξης.



Σχήμα 5.12. Αναγνώριση μη ακέραιας αρμονικής 287 Hz με rms τιμή 9.8 V σε ένα σήμα με ακέραια αρμονική συνιστώσα 5^{ης} τάξης, το πλάτος της οποίας εμφανίζει ταλάντωση εύρους 20% με συχνότητα 5 Hz, με χρήση μεθόδων Prony και FFT.

$$y = 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t) + 20\% \cdot 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t)$$

Πίνακας 5.4. Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων Prony, και FFT στο σήμα αναφοράς του IEC 61000-4-7 / Annex C / Par. 4 / Example 3

Σήμα Εισόδου		Αποτέλεσμα Prony		Αποτέλεσμα FFT	
Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)
245	1.0	245	1.00	245	1.37
250	10.0	250	10.01	250	10.12
255	1.0	255	1.00	255	0.54
287	9.8	287	9.80	285	7.44
				290	4.91

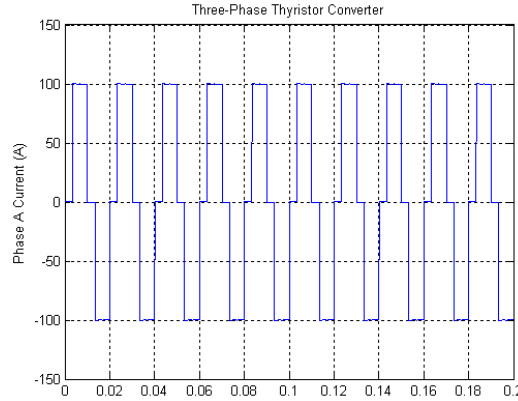
5.3. Ανάλυση αρμονικών τριφασικού μετατροπέα με χρήση των μεθόδων Wavelets, Hilbert-Huang και Prony

Η διερεύνηση της προηγούμενης παραγράφου, επιβεβαιώνει καταρχήν τα συμπεράσματα του 2^{ου} Κεφαλαίου, σύμφωνα με τα οποία η μέθοδος Prony εμφανίζει πολύ ενδιαφέρουσα συμπεριφορά στην ανάλυση σημάτων με κοντινούς διακριτούς τόνους, ενώ η Hilbert-Huang και ο μετασχηματισμός Wavelets, είναι μεν σε θέση να εντοπίζουν διακυμάνσεις επιμέρους αρμονικών, αλλά αντιμετωπίζουν σημαντικές δυσκολίες στο διαχωρισμό κοντινών συχνοτήτων, ιδιαίτερα όταν το πλάτος τους είναι συγκρίσιμο. Ωστόσο, τα απλά συνθετικά σήματα που εξετάστηκαν, δεν αντιπροσωπεύουν τα τυπικά χαρακτηριστικά των σημάτων των Α/Γ (ρεύματος ή τάξης), τα οποία διαμορφώνονται σε σημαντικό βαθμό από τον τύπο των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων και τον τρόπο ελέγχου τους. Από την άλλη πλευρά, δεδομένου ότι τα πραγματικά σήματα των μετρήσεων παρουσιάζουν κάποια φασματικά χαρακτηριστικά που δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων, είναι σκόπιμο οι προτεινόμενες μέθοδοι να επαληθευτούν πρώτα σε σήματα που αποτελούν προϊόν προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν πρακτικά να συγκριθούν τα αποτελέσματα της αρμονικής ανάλυσης με τα θεωρητικά αναμενόμενα, χωρίς να εισάγονται αβεβαιότητες από την ύπαρξη θορύβου ή διακριτών συχνοτήτων άγνωστης προέλευσης, όπως συνήθως συμβαίνει σε πραγματικές συνθήκες.

Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε η προσομοίωση σε περιβάλλον Matlab/Simulink δύο χαρακτηριστικών περιπτώσεων: (α) ενός τυπικού 6-παλμικού αντιστροφέα με thyristors και (β) αντιστροφέα με διακοπτικά στοιχεία IGBTs που ελέγχεται με τεχνική SPWM. Η πρώτη περίπτωση αποσκοπεί στην εξέταση χαρακτηριστικών αρμονικών χαμηλής συχνότητας, ενώ η δεύτερη υψίσυχνων τόνων, όπως αυτοί που παράγουν οι μετατροπείς δικτύου των Α/Γ.

5.3.1 Τριφασικός Μετατροπέας με Thyristor

Η υλοποίηση ενός τυπικού 6-παλμικού αντιστροφέα που αποτελείται από thyristors πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB/Simulink, θεωρώντας τυπικές τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου. Η DC πλευρά του μετατροπέα παριστάνεται από μία ιδανική πηγή ελεγχόμενης έντασης, ενώ για τα διακοπτικά στοιχεία θεωρείται σταθερή γωνία έναυσης. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που προκύπτει από τη λειτουργία του μετατροπέα εικονίζεται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13. Ρεύμα φάσης A 6-παλμικού αντιστροφέα με thyristors εντός χρονικού παραθύρου 0.2 s.

Από τη βασική θεωρία των ηλεκτρονικών ισχύος, η κυματομορφή του ρεύματος I_a (φάση A) είναι τετραγωνική με πλάτος I_d (ίσο προς 100 A στη συγκεκριμένη περίπτωση) και μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα συνιστωσών Fourier σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} I_a(\omega t) = & \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sin(\omega t - a) - \sqrt{2} \cdot I_5 \cdot \sin[5(\omega t - a)] - \sqrt{2} \cdot I_7 \cdot \sin[7(\omega t - a)] \\ & + \sqrt{2} \cdot I_{11} \cdot \sin[11(\omega t - a)] + \sqrt{2} \cdot I_{13} \cdot \sin[13(\omega t - a)] \\ & - \sqrt{2} \cdot I_{17} \cdot \sin[17(\omega t - a)] - \sqrt{2} \cdot I_{19} \cdot \sin[19(\omega t - a)] \dots \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου a η γωνία έναυσης των thyristor.

Στην εξίσωση 5.1 είναι παρούσες μόνο οι περιττές αρμονικές h που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια του 3 και ισχύει:

$$h = 6 \cdot n \pm 1, n = 1, 2, \dots \quad (5.2)$$

Η rms τιμή της συνιστώσας θεμελιώδους συχνότητας ισούται με:

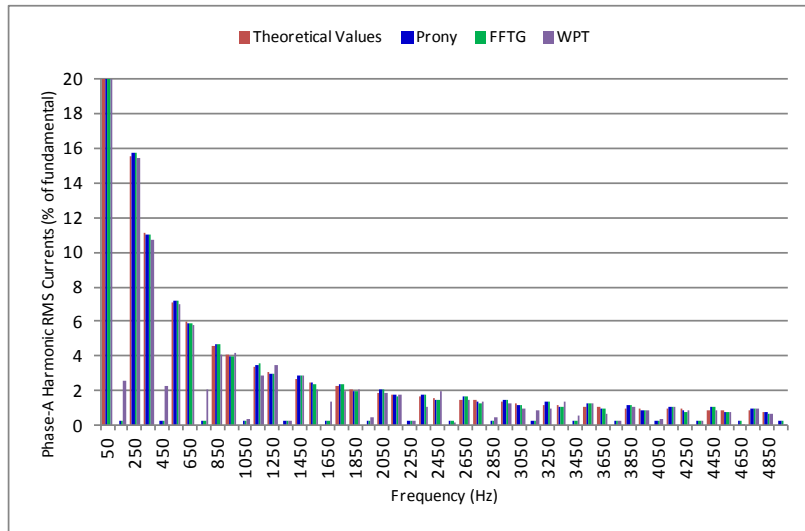
$$I_1 = 0.78 \cdot I_d = 0.78 \cdot 100 = 78A \quad (5.3)$$

ενώ οι rms τιμές των αρμονικών συνιστωσών είναι αντιστρόφως ανάλογες της τάξης τους, δηλαδή:

$$I_h = \frac{I_1}{h}, h = 6n \pm 1 \quad (5.4)$$

Το προκύπτον σήμα ρεύματος προσφέρει ιδανική ευκαιρία για την εφαρμογή των μεθόδων αρμονικής ανάλυσης της προηγούμενης παραγράφου, δεδομένου ότι περιλαμβάνει αποκλειστικά τις χαρακτηριστικές αρμονικές χωρίς την παρεμβολή άλλων συχνοτήτων ή ανεπιθύμητου θορύβου, που είναι αναπόφευκτα στις πραγματικές μετρήσεις. Η εφαρμογή των μεθόδων Prony και WPT δείχνει ότι η μέθοδος Prony αποτελεί και σε αυτή την περίπτωση άριστη εναλλακτική του FFTG. Στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 5.14 εικονίζεται το θεωρητικό φάσμα του ρεύματος του μετατροπέα μαζί με τα αποτελέσματα της Prony, του FFTG και του WPT. Τα αποτελέσματα της Prony και του FFTG πρακτικά ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ οι πολύ μικρές διαφορές που εμφανίζουν σε σχέση με τα θεωρητικά αναμενόμενα, αποδίδονται στο γεγονός ότι τα στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης δεν είναι απολύτως ιδανικά. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα του WPT, καθώς οι προκύπτουσες περιττές αρμονικές βρίσκονται στο κέντρο των ζωνών συχνοτήτων εύρους 100 Hz. Οι μικρές διαφορές που εντοπίζονται σε ορισμένες συχνότητες, αποδίδονται στην επίδραση της μητρικής συνάρτησης Wavelet που επιλέχθηκε (Daubechies 45 συντελεστών). Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα αποτελέσματα του «κλασικού» FFT και του FFTG συμπίπτουν για τις ακέραιες και ενδιάμεσες αρμονικές έως 2 kHz, αφού οι υφιστάμενες αρμονικές είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και επομένως δεν εμφανίζεται φασματική διαρροή. Για τις ανώτερες όμως συχνότητες (> 2 kHz), είναι σαφής η αδυναμία του FFTG στον εντοπισμό διακριτών τόνων καθώς η μεθοδολογία της ομαδοποίησης συγκεντρώνει όλες τις συχνότητες στα ακέραια πολλαπλάσια

των 100 Hz ((2·k+1)·100 Hz, k ακέραιος και ≥ 10). Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της ΗΗΤ απαιτεί σημαντικά πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία χωρίς να είναι σε θέση να διαχωρίσει όλες τις συχνότητες του σήματος. Λεπτομέρεια των αποτελεσμάτων του Σχήματος 5.14, για τις αρμονικές με το μεγαλύτερο πλάτος, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5.



Σχήμα 5.14. Αρμονική ανάλυση ρεύματος εξόδου μετατροπέα με thyristor με χρήση των μεθόδων Prony, FFTG και WPT.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5. Αποτελέσματα μεθόδων FFT, FFTG και PRONY στην αρμονική ανάλυση του ρεύματος φάσης a μετατροπέα με thyristor.

Θεωρητικά αναμενόμενες τιμές		Αποτέλεσμα FFT		Αποτέλεσμα FFTG		Αποτέλεσμα Prony		Αποτέλεσμα WPT	
Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)
250	15.60	250	15.73	250	15.73	250	15.71	200-300	15.47
350	11.14	350	11.04	350	11.04	350	11.06	300-400	10.77
550	7.09	550	7.24	550	7.24	550	7.22	400-500	7.02
650	6.00	650	5.89	650	5.89	650	5.91	600-700	5.84
850	4.59	850	4.74	850	4.74	850	4.72	800-900	4.12
950	4.11	950	3.99	950	3.99	950	4.01	900-1000	4.18

5.3.2 Τριφασικός Μετατροπέας με IGBTs και έλεγχος SPWM

Ο τύπος μετατροπέα που θεωρήθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα δεν χρησιμοποιείται στις νέες Α/Γ, λόγω των υψηλών αρμονικών χαμηλής τάξης, αλλά και της ανάγκης απορρόφησης άεργου ισχύος από το δίκτυο. Οι μετατροπείς των Α/Γ είναι γενικά τύπου πηγής τάσης με διακοπτικά στοιχεία IGBTs, και ελέγχονται με διάφορες παραλλαγές της τεχνικής PWM. Ένας τέτοιος μετατροπέας με έλεγχο ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Simulink.

Το φασματικό περιεχόμενο της τάσης στην πλευρά AC του μετατροπέα είναι εκ των προτέρων γνωστό από τη βασική θεωρία της τεχνικής SPWM, [44], [45], [58], προσφέροντας μία πολύ καλή ευκαιρία για συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων αρμονικής ανάλυσης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Επιπλέον, το αρμονικό περιεχόμενο της προκύπτουσας τάσης είναι αντιπροσωπευτικό του φάσματος των Α/Γ μοντέρνας τεχνολογίας, χωρίς την ύπαρξη θορύβου και άλλων αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν την ακρίβεια και αποτελεσματικότητα των μεθόδων αρμονικής ανάλυσης, όταν χρησιμοποιούνται πραγματικές μετρήσεις.

Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρητική ανάλυση, οι αρμονικές συχνότητες της πολικής τάσης στην έξοδο του μετατροπέα (ενδεικτικά επιλέγεται η τάση μεταξύ των φάσεων a και b) ακολουθούν τον παρακάτω κανόνα:

$$F_h = (j \cdot m_f \pm k) \cdot f_1, j + k = \text{περιττός} \quad (5.5)$$

όπου $m_f = f_c / f_1$, f_c η διακοπτική συχνότητα που ισούται με τη συχνότητα του φέροντος σήματος (carrier frequency) και f_1 η συχνότητα του σήματος ελέγχου που θεωρείται η θεμελιώδης (50 Hz).

Το πλάτος κάθε τάξης αρμονικής που προκύπτει από την εξίσωση 5.5, εξαρτάται επίσης και από το λόγο διαμόρφωσης πλάτους m_a και μάλιστα με συστηματικό τρόπο, όπως παρουσιάζεται στην αναφορά [58], όπου δίνεται ο πλήρης πίνακας πλατών των αρμονικών συνιστωσών τριφασικού μετατροπέα με διαμόρφωση PWM και για λόγους πληρότητας παρατίθεται στον Πίνακα 5.6.

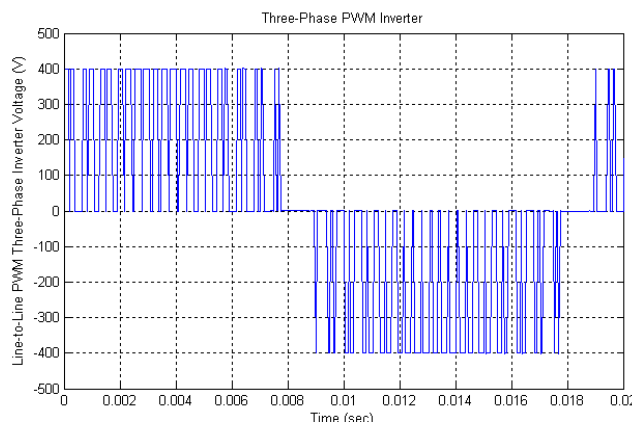
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6. Αναμενόμενες τιμές λόγου αρμονικών πολικής τάσης προς την τάση DC (V_{LL}/V_d) τριφασικού μετατροπέα PWM, [58]. Ισχύει για μεγάλες περιττές τιμές του m_f και πολλαπλάσιες του 3.					
$\frac{m_a}{h}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.122	0.245	0.367	0.490*	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$				0.005	0.011
$2m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$				0.008	0.020
$3m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$		0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$			0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$				0.010	0.03

* με έντονο μπλε χρώμα τονίζονται οι τιμές που συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προσομοίωσης του Πίνακα 5.5

Η διακοπτική συχνότητα επιλέχθηκε να είναι περιττό ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους και πολλαπλάσιο του 3 ώστε να διασφαλίζεται η ύπαρξη μόνο περιττών αρμονικών στην κυματομορφή της τάσης. Συνολικά οι παράμετροι που θεωρήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7. Παράμετροι ελέγχου του μετατροπέα PWM που εξετάζεται			
Διακοπτική Συχνότητα f_c (Hz)	Λόγος διαμόρφωσης συχνότητας m_f	Λόγος διαμόρφωσης πλάτους m_a	Τάση DC πλευράς μετατροπέα, V_d (V)
1650	33	0.8	400

Η προκύπτουσα πολική τάση στην πλευρά AC του μετατροπέα εικονίζεται στο Σχήμα 5.15 και έχει την αναμενόμενη τετραγωνική μορφή, το πλάτος της οποίας εξαρτάται από την επιβαλλόμενη DC τάση, ενώ το φασματικό της περιεχόμενο διαμορφώνεται από την επιλογή της συχνότητας του φέροντος σήματος.



Σχήμα 5.15. Τάση μεταξύ φάσεων A και B τριφασικού μετατροπέα SPWM.

Εφαρμόζοντας τις μεθόδους FFT και Prony, διαπιστώνουμε ότι τα αποτελέσματα ταυτίζονται μεταξύ τους (με ακρίβεια 6^{ov} δεκαδικού ψηφίου) αλλά και σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα θεωρητικά του Πίνακα 5.6. Παρόμοια αποτελέσματα δίνει και η εφαρμογή του WPT, παρόλο που παρατηρούνται κάποιες διαφορές σε ορισμένες συχνότητες, οι οποίες αποδίδονται στο γεγονός ότι το αποτέλεσμα του WPT αντιστοιχεί σε ζώνες 100 Hz και όχι σε μεμονωμένες συχνότητες και επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μητρικής συνάρτησης Wavelets που χρησιμοποιήθηκε (Daubechies 45 συντελεστών). Αντίθετα, η HHT αρκείται σε χονδροειδή εκτίμηση των αρμονικών χαμηλής τάξης (και μάλιστα μετά από χρήση βαθυπερατού φίλτρου) και αποτυγχάνει να εκτιμήσει τις ανώτερες

συχνότητες, οι οποίες είναι ωστόσο χαρακτηριστικές για το συγκεκριμένο τύπο μετατροπέα, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι δεν είναι κατάλληλη για την ανάλυση ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων που χαρακτηρίζονται από συχνότητες που απέχουν μεταξύ τους πολύ λιγότερο από μία οκτάβα και έχουν συγκρίσιμο πλάτος. Επίσης, η εφαρμογή της ομαδοποίησης δεν έχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα του FFT αφού οι ζητούμενες συχνότητες είναι όλες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας και δεν εμφανίζεται το πρόβλημα της φασματικής διαρροής. Από την άλλη πλευρά, και σε αυτή την περίπτωση είναι χαρακτηριστική η επίπτωση της ομαδοποίησης στη μετατόπιση των πραγματικών διακριτών συχνοτήτων σε πλασματικές συχνότητες $((2 \cdot k + 1) \cdot 100 \text{ Hz}, k \text{ ακέραιος και } \geq 10)$ στην περιοχή άνω των 2 kHz.

Συνολικά τα αποτελέσματα εφαρμογής των μεθόδων για τις συχνότητες με το μεγαλύτερο πλάτος παρατίθενται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ FFT, PRONY και Wavelets με την εφαρμογή τους στο σήμα τάσης τους Σχήματος 5.15.					
Αναμενόμενη αρμονική τάξη ($m_f=33$)	Συχνότητα (Hz)	Θεωρητικές τιμές (V_{RMS})	FFT (No Grouping) (V_{RMS})	Prony (V_{RMS})	Wavelets (V_{RMS})
1	50	196.0	194.60	194.60	194.93
$m_f - 2$	1550	54.0	58.21	58.21	48.08
$m_f + 2$	1750	54.0	55.24	55.24	55.32
$2m_f - 1$	3250	76.8	76.84	76.84	76.31
$2m_f + 1$	3350	76.8	75.50	75.50	72.54

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τη διερεύνηση της παρούσας παραγράφου, διαπιστώνεται ότι η μέθοδος Prony εμφανίζεται ως ανταγωνιστική του FFT για την αρμονική ανάλυση σημάτων A/Γ, καθώς λειτουργεί αποδοτικά σε σήματα όχι μόνο με χαμηλές αλλά και με ανώτερες συχνότητες, που χαρακτηρίζουν την πλειοψηφία των σημάτων ρεύματος και τάσης A/Γ. Επιπρόσθετα, η ανάλυση συνθετικών σημάτων την καθιστά επίσης ανταγωνιστική του FFT και σε υπολογιστική ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά, ο WPT είναι μεν κατάλληλος για την ανάλυση σημάτων με μεμονωμένες ακέραιες αρμονικές αλλά η διακριτότητα συχνότητας δεν επιτρέπει την ανάλυση σημάτων με κοντινές αρμονικές. Τέλος, η HHT παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης διακυμάνσεων πλάτους και συχνότητας σε κάθε χρονική στιγμή, περιορίζεται όμως στην εκτίμηση της θεμελιώδους και αρμονικών χαμηλής τάξης, εφόσον έχουν σημαντικό πλάτος.

Η μέχρι στιγμής εμπειρία που αποκτήθηκε από την εφαρμογή των μεθόδων θα αξιοποιηθεί στην επόμενη παράγραφο, όπου πλέον οι προτεινόμενες μέθοδοι δοκιμάζονται σε πραγματικά σήματα ρεύματος και τάσης στην έξοδο A/Γ.

5.4. Ανάλυση μετρήσεων αρμονικών ανεμογεννητριών με τις μεθόδους Prony, Hilbert-Huang και Wavelets

5.4.1 Χαρακτηριστικά μετρήσεων πεδίου A/Γ

Η εμπειρία από την ανάλυση μετρήσεων A/Γ σε πραγματικές συνθήκες έχει δείξει ότι τα λαμβανόμενα σήματα, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, οι οποίες προσθέτουν περαιτέρω πολυπλοκότητα και αβεβαιότητα. Πιο συγκεκριμένα:

- ο αριθμός των αρμονικών συνιστωσών και οι ακριβείς τιμές συχνότητας σε ένα πραγματικό σήμα τάσης ή ρεύματος δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων.
- η χρήση αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων δεν αποτυπώνει με ακρίβεια το πραγματικό αρμονικό περιεχόμενο των σημάτων A/Γ, το οποίο εμφανίζει στοχαστική διακύμανση, ιδιαίτερα στις ανώτερες συχνότητες, όπως δείχθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο.
- ακόμη και με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης μεγάλης λεπτομέρειας, οι πηγές πληροφόρησης για τις παραμέτρους σχεδίασης των εμπορικών A/Γ είναι πολύ περιορισμένες. Οι απαιτούμενες παραδοχές και συμψηφισμοί, οδηγούν τελικά σε αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, διακριτοί τόνοι που οφείλονται σε δευτερεύοντα εξοπλισμό ή και σε τυχαίες βλάβες δεν είναι δυνατό να περιγραφούν από υπολογιστικά μοντέλα.
- η εφαρμογή της ομαδοποίησης των αρμονικών συνιστωσών για την αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής στις μετρήσεις αρμονικών A/Γ έχει ως άμεση συνέπεια, η θεμελιώδης συχνότητα των

κυματομορφών να θεωρείται σταθερή και ίση με 50 Hz με αποτέλεσμα οποιαδήποτε πληροφορία ενδεχόμενης διακύμανσης της βασικής συχνότητας αλλά και των αρμονικών συνιστωσών να χάνεται.

- Τέλος, όσο επιμελής και αν είναι η εγκατάσταση ενός συστήματος μέτρησης, είναι αναπόφευκτο τα μετρούμενα σήματα να περιέχουν και συνιστώσες θορύβου που μπορεί να προέρχονται από διάφορες αιτίες, όπως ατέλειες στη γείωση των επιμέρους οργάνων, σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από τα ηλεκτρονικά ισχύος των Α/Γ, υγρασία περιβάλλοντος, μόνωση κ.λπ.

Συνεπώς, η εφαρμογή των εναλλακτικών μεθόδων σε μετρήσεις πραγματικών Α/Γ αποτελεί εκ των πραγμάτων δύσκολο εγχείρημα, που μπορεί όμως να αναδείξει ορισμένες σημαντικές λεπτομέρειες των αρμονικών εκπομπών τους που δεν φωτίζονται από τον FFT και τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης, συνεισφέροντας στην πληρέστερη αξιολόγηση και έλεγχο κατά τη διαδικασία σύνδεσης των Α/Π στα δίκτυα.

Η ανάλυση που ακολουθεί διαχωρίζεται σε δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος αφορά την εξέταση των αρμονικών χαμηλής τάξης σημάτων τάσης και ρεύματος στην έξοδο διαφόρων τύπων Α/Γ. Θέματα που τίγονται είναι ο υπολογισμός συχνότητας και πλάτους ενδιάμεσων αρμονικών και η φασματική ανάλυση σημάτων Α/Γ όταν η θεμελιώδης συχνότητα παρουσιάζει διακυμάνσεις. Ο δεύτερος άξονας επικεντρώνεται στις ανώτερες αρμονικές, όπως ορίζονται από το IEC 61000-4-7. Η εφαρμογή του FFT σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων είναι επιρρεπής στην εμφάνιση φασματικής διαρροής, λόγω του ότι οι αντίστοιχες συχνότητες δεν είναι συγχρονισμένες με τη θεμελιώδη συχνότητα του δικτύου και επομένως δεν συμπίπτουν κατ'ανάγκη με ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή της ομαδοποίησης των ανώτερων αρμονικών κατά IEC, συσσωρεύει όλες τις αρμονικές συνιστώσες εύρους 200 Hz (από τα 2 kHz και άνω) στα αντίστοιχα ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους (2100, 2300, ..., 8900 Hz). Η εφαρμογή των εναλλακτικών μεθόδων στοχεύει στην ανάδειξη χαρακτηριστικών ανώτερων συχνοτήτων, οι οποίες δεν είναι προφανείς από το αποτέλεσμα του FFT καθώς και στο σχολιασμό της αποτελεσματικότητας της ομαδοποίησης σε επιλεγμένες περιπτώσεις.

5.4.2 Υλοποίηση Prony, Hilbert-Huang και WPT

Η εφαρμογή των μεθόδων HHT και Prony σε πραγματικές μετρήσεις Α/Γ απαιτεί την πρόσθετη επεξεργασία των σημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της κάθε μεθόδου όπως αναλύθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων πεδίου που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι ο άγνωστος αριθμός των συνιστωσών συχνότητας και η ύπαρξη υψίσυχνου θορύβου που υπερτίθεται στα σήματα.

Ξεκινώντας από τη μέθοδο Hilbert-Huang, βασική παράμετρο εφαρμογής αποτελεί η κατάλληλη επιλογή του *masking signal*, η οποία βασίζεται στην εκτίμηση της τιμής και του πλάτους των κύριων αρμονικών συνιστωσών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη μία αρχική εκτίμηση, η οποία προφανώς μπορεί να ληφθεί μέσω του FFT. Στη συνέχεια υλοποιείται κατά κύριο λόγο η μέθοδος RHHT, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 2.6 του 2^{ου} Κεφαλαίου. Η μέθοδος IHHT (Πίνακας 2.5) απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο χωρίς να συμβάλει στην αύξηση της ακρίβειας της μεθόδου στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Prony δεν απαιτεί τη γνώση των συχνοτήτων και των αντίστοιχων πλατών τους, όπως η Hilbert-Huang, αλλά μία αρχική εκτίμηση για τον αριθμό αρμονικών συνιστωσών στο εξεταζόμενο σήμα. Η εκτίμηση αυτή δεν μπορεί να προκύψει από τον FFT, λόγω της εμφάνισης «ψευδών» συχνοτήτων, ως αποτέλεσμα φασματικής διαρροής. Στην πράξη, η εφαρμογή της μεθόδου Prony σε ένα πραγματικό σήμα προϋποθέτει την υλοποίηση ενός επαναληπτικού αλγορίθμου, αντίστοιχου με αυτού που περιγράφεται στην αναφορά [129], ο οποίος τερματίζεται όταν το μέσο τετραγωνικό σχετικό σφάλμα μεταξύ της προσέγγισης Prony και του πραγματικού σήματος (ε_p^2) είναι χαμηλότερο από μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου (ε_{thr}^2).

Ως μέσο τετραγωνικό σχετικό σφάλμα ορίζεται στην αναφορά [129], το μέγεθος:

$$\varepsilon_p^2(j) = \frac{1}{L} \cdot \sum_{n=1}^L \frac{|\hat{x}(t_n) - x(t_n)|^2}{x(t_n)^2} \quad (5.6)$$

όπου $t_n = n \cdot T_s$ ($n=1,2,3,\dots,L$), $T_s=1/f_s$ και f_s η συχνότητα δειγματοληψίας, ενώ $\hat{x}(t_n)$ είναι η προσέγγιση του σήματος από τη μέθοδο Prony (εξίσωση 2.70).

Αναλυτικά, ο αλγόριθμος υλοποίησης της μεθόδου Prony, όπως εφαρμόστηκε στην ανάλυση των πραγματικών μετρήσεων Α/Γ παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9. Η υλοποίηση του πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab.

Πίνακας 5.9. Αλγόριθμος υλοποίησης μεθόδου Prony σε πραγματικά σήματα Α/Γ**Βήμα 1: Επιλογή του χρονικού παραθύρου T_w**

Για τη διατήρηση της συμβατότητας με το IEC 61000-4-7, το μήκος του θεωρείται ίσο με 10 κύκλους θεμελιώδους συχνότητας (~ 0.2 s), χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η επιλογή διαφορετικού μήκους (π.χ. 0.1 s). Στην αναφορά [142] υποδεικνύεται μήκος τουλάχιστον 1,5 φορές το μήκος του κύκλου της χαμηλότερης συχνότητας που περιέχεται στο σήμα. Εναλλακτικά, στην αναφορά [129] προτείνεται επαναληπτική μέθοδος για τη θεώρηση του βέλτιστου χρονικού παραθύρου με κριτήριο την ικανοποιητική σύγκλιση της Prony. Το συμπέρασμα ωστόσο από τα πραγματικά σήματα δείχνει ότι η επιλογή των 10 κύκλων είναι ικανοποιητική στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

Βήμα 2: Επιλογή συχνότητας δειγματοληψίας F_s

Η επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας εξαρτάται από τη μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος στο εξεταζόμενο σήμα. Σύμφωνα με την αναφορά [142] απαιτείται συχνότητα τουλάχιστον 2,5-3 φορές τη μεγαλύτερη συχνότητα του σήματος. Η ανάλυση των πραγματικών σημάτων επιβεβαιώνει την ευαισθησία της Prony σε υψηλές συχνότητες δειγματοληψίας, όπως σημειώνεται στην [142]. Για το λόγο αυτό, ανάλογα με το εκάστοτε αναζητούμενο εύρος συχνοτήτων, σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζεται η τεχνική resampling²⁴ για τον υποβιβασμό της συχνότητας δειγματοληψίας των εξεταζόμενων σημάτων. Ειδικά για τον αλγόριθμο της Prony που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η μέγιστη υπολογιζόμενη συχνότητα ισούται με το $\frac{1}{4}$ της εκάστοτε συχνότητας δειγματοληψίας.

Βήμα 3. Θεώρηση μιας αρχικής τιμής εκκίνησης για την παράμετρο εισόδου P_i του μοντέλου Prony

Η τιμή αυτή μπορεί να βασίζεται είτε στα αποτελέσματα του FFT (χονδροειδής εκτίμηση) ή στην εφαρμογή προηγμένων μεθόδων αναγνώρισης παραμέτρων, με προτεινόμενο στη βιβλιογραφία το κριτήριο MDL (minimum description length), [129], [290]. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή σε σήματα Α/Γ έδειξε ότι, ακόμη και με τη χρήση του MDL, η προτεινόμενη τιμή ενδέχεται να μην οδηγεί σε ικανοποιητική προσέγγιση. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η εφαρμογή επαναληπτικής διεργασίας, ανάλογης με αυτή της αναφοράς [129], η οποία περιγράφεται στα επόμενα βήματα.

Βήμα 4: Εφαρμογή της Prony

Με την επιλογή του χρονικού παραθύρου και της αρχικής παραμέτρου P , υλοποιείται ο αλγόριθμος της Prony για την εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου (πλάτη, συχνότητες, συντελεστές απόσβεσης και φασικές γωνίες) και την προσέγγιση του εξεταζόμενου σήματος.

Βήμα 5. Υπολογισμός του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ϵ_P^2 **Βήμα 6. Σύγκριση του ϵ_P^2 με μία τιμή κατωφλίου ϵ_{thr}^2**

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Εάν $\epsilon_P^2 > \epsilon_{thr}^2$, επιστροφή στο Βήμα 2 και επιλογή τιμής $P_{i+1} = P_i + 1$, όπου i το βήμα του αλγορίθμου ($i=1$ στην εκκίνηση)
- Εάν $\epsilon_P^2 \leq \epsilon_{thr}^2$, τερματισμός της υλοποίησης του αλγορίθμου και αποθήκευση των παραμέτρων του μοντέλου (συχνότητες, πλάτη, φασικές γωνίες και συντελεστές απόσβεσης)

Βήμα 7. Απόρριψη ψευδο-αρμονικών και οριστικοποίηση αποτελεσμάτων

Το τελικό αποτέλεσμα της Prony συνήθως περιλαμβάνει και μία σειρά «ψευδών» συχνοτήτων, οι οποίες απομακρύνονται σχετικά εύκολα, καθώς χαρακτηρίζονται είτε από μηδενικά πλάτη ή από πολύ μεγάλες αποσβέσεις.

Τέλος, όσον αφορά τον WPT, η υλοποίηση του πραγματοποιήθηκε επίσης σε περιβάλλον Matlab και βασίζεται στην επιλογή του κατάλληλου αριθμού επιπέδων j , ώστε να προκύπτουν ζώνες εύρους 100 Hz για τις αρμονικές χαμηλής τάξης και 200 Hz για τις ανώτερες αρμονικές συχνότητες με βάση τη συχνότητα δειγματοληψίας του εξεταζόμενου σήματος, όπως εξηγήθηκε με λεπτομέρεια στο 2^ο Κεφάλαιο:

$$f_{Band} = \frac{f_s}{2^{j+1}} \quad , j = 0, 1, \dots \quad (5.7)$$

Οι επόμενες ενότητες περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της υλοποίησης των μεθόδων Prony, HHT και WPT σε σήματα τάσης και ρεύματος Α/Γ με βασικό στόχο όχι την επανάληψη της λεπτομερούς μελέτης αρμονικών Α/Γ που διενεργήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο αλλά την αξιοποίηση του μεγάλου όγκου διαθέσιμων μετρήσεων για τον εντοπισμό και σχολιασμό επιλεγμένων περιπτώσεων, όπου οι εναλλακτικές μέθοδοι αναδεικνύουν κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία δεν είναι προφανή με τη χρήση του FFT.

²⁴ Η διαδικασία resampling περιλαμβάνει την εφαρμογή βαθυπερατού FIR φίλτρου anti-aliasing στο εξεταζόμενο σήμα με ταυτόχρονη διόρθωση της καθυστέρησης που εισάγεται. Χρησιμοποιείται η συνάρτηση resample της Matlab.

5.4.3 Ανεμογεννήτριες που εξετάστηκαν

Για τις ανάγκες της διερεύνησης, επιλέχθηκαν τέσσερις από τις Α/Γ που εξετάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο, καθεμιά από τις οποίες αντιπροσωπεύει διαφορετικό μοντέλο και τεχνολογία, ενώ παράλληλα συμπεριλήφθηκαν και δύο πρόσθετοι τύποι Α/Γ, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10. Τύποι Α/Γ που λήφθηκαν υπόψη στη μελέτη του παρόντος Κεφαλαίου		
α/α	Συμβολισμός	Τύπος
1	Α/Γ 1	Σύγχρονη γεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος
2	Α/Γ 2	Σύγχρονη γεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος
3	Α/Γ 3	Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης
4	Α/Γ 4	Ασύγχρονη γεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος
5	Α/Γ 5 & 6	Ασύγχρονες γεννήτριες, σταθερών στροφών

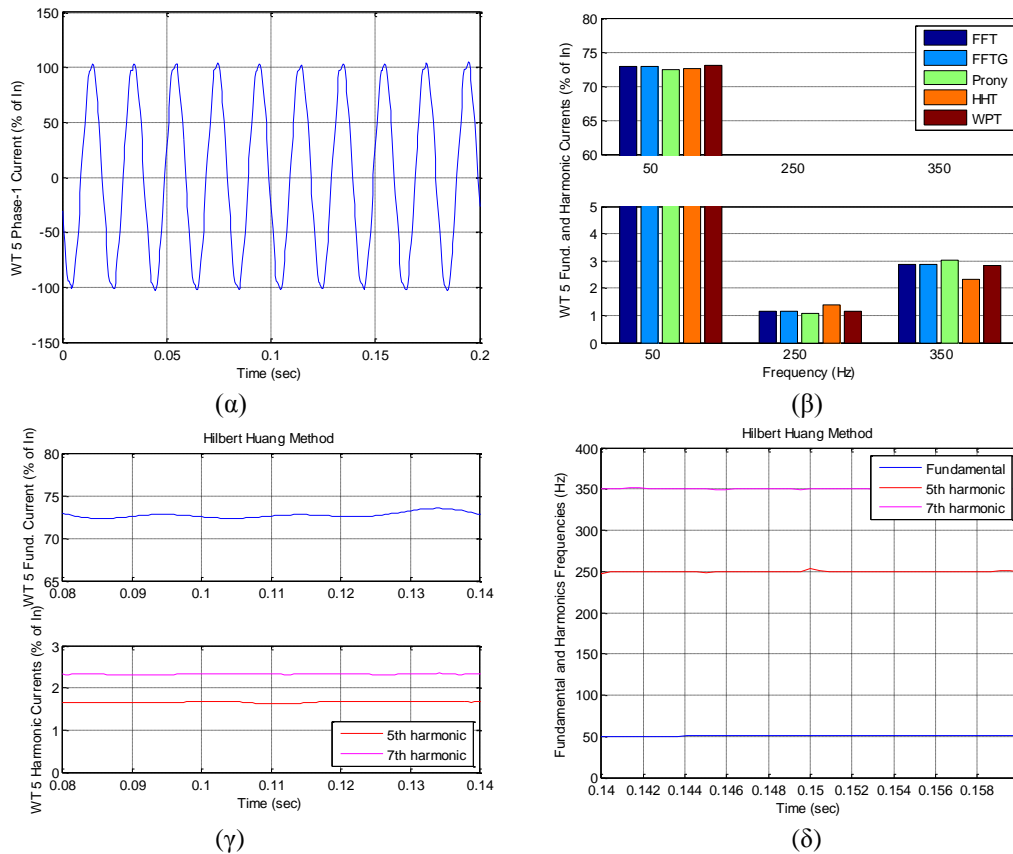
Ειδικότερα, εξετάζονται τέσσερις Α/Γ μεταβλητών στροφών και δύο σταθερών στροφών, των οποίων οι ονομαστικές ισχύεις κυμαίνονται από την περιοχή κάτω του 1 MW έως και αρκετά MW²⁵. Οι πρώτες δύο περιλαμβάνουν πολυπολικές σύγχρονες γεννήτριες τυλιγμένου δρομέα που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ac/dc/ac πλήρους ισχύος. Η Α/Γ 3 περιλαμβάνει μία ΑΓΔΤ με μετατροπείς στο δρομέα, ενώ η Α/Γ 4 είναι πρωτότυπη και περιλαμβάνει ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού και μετατροπέα ac/dc/ac πλήρους ισχύος. Οι Α/Γ σταθερών στροφών, περιλαμβάνουν ασύγχρονες γεννήτριες με δρομέα τύπου κλωβού, απευθείας συνδεδεμένες με το δίκτυο. Οι αρμονικές τους ρεύματος εξόδου των μηχανών αυτών προέρχονται κυρίως από την υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου. Η θεώρηση τους στην παρούσα μελέτη γίνεται για την ανάλυση πραγματικών σημάτων Α/Γ με χαρακτηριστικές αρμονικές χαμηλής τάξης και για το λόγο ότι μία από αυτές λειτουργεί σε αυτόνομο ασθενές δίκτυο με αξιοσημείωτες διακυμάνσεις της θεμελιώδους συχνότητας. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων στους ακροδέκτες των Α/Γ πραγματοποιούνται σύμφωνα με το IEC 61400-21 και οι περίοδοι μέτρησης εκτείνονται γενικά από μερικές ώρες έως αρκετές εβδομάδες. Για λόγους οικονομίας χώρου, οι επόμενες παραγράφους δεν στοχεύουν στην εξαντλητική παρουσίαση του συνολικού όγκου των μετρήσεων, αλλά στην παρουσίαση επιλεγμένων αποτελεσμάτων για την ανάδειξη των πιο σημαντικών συμπερασμάτων.

5.4.4 Εκτίμηση αρμονικών χαμηλής τάξης

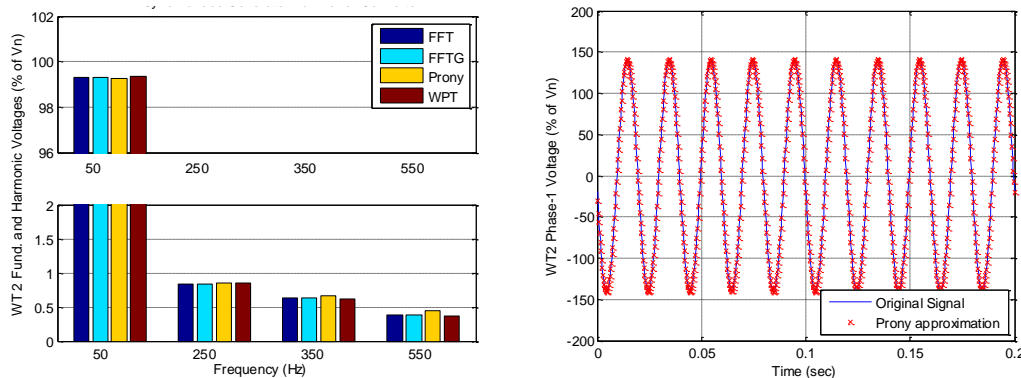
Η διερεύνηση ξεκινά με την ανάλυση των αρμονικών χαμηλής τάξης του ρεύματος της Α/Γ 5. Αυτή η απλή περίπτωση επιλέγεται σκόπιμα, προκειμένου να αναδείξει τη δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων σε πραγματικά σήματα. Με δεδομένη την απουσία ηλεκτρονικών ισχύος, οι κυρίαρχες φασματικές συνιστώσες περιορίζονται στις χαρακτηριστικές ακέραιες συχνότητες (κυρίως 5^η και 7^η τάξης), που αποδίδονται στην υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου και, δευτερευόντως, στο βοηθητικό εξοπλισμό για τη λειτουργία της Α/Γ (π.χ. τροφοδοτικά, διάταξη προσανατολισμού της ατράκτου κ.λπ.). Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή και των πέντε μεθόδων (FFT, FFTG, Prony, HHT και WPT) σε σήμα ρεύματος της Α/Γ 5 για χρονικό παράθυρο 0.2 s. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της HHT παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.16 (γ) και (δ), όπου διαπιστώνεται η αποδοτικότητα της μεθόδου στη συγκεκριμένη περίπτωση, στην εκτίμηση του πλάτους και της συχνότητας των αρμονικών συνιστωσών, αλλά και στην παρακολούθηση των διακυμάνσεων κατά μήκος του χρονικού παραθύρου.

Ως δεύτερο σήμα αναφοράς θεωρήθηκε η τάση ακροδεκτών της Α/Γ 2. Τα αποτελέσματα εφαρμογής των μεθόδων στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων δίνονται στο Σχήμα 5.17. Σε αυτή την περίπτωση, η HHT αποτυγχάνει να εντοπίσει τους υπάρχοντες διακριτούς τόνους, λόγω της αδυναμίας της μεθόδου να διακρίνει κοντινές αρμονικές συγκρίσιμου πλάτους. Από την άλλη πλευρά, η Prony και ο WPT δίνουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά των FFT και FFTG και στα δύο παραδείγματα.

²⁵ Δεν αναφέρονται οι ονομαστικές ισχύεις για την αποφυγή συσχέτισης με συγκεκριμένα εμπορικά μοντέλα Α/Γ.



Σχήμα 5.16. Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων FFT, FFTG, Prony, WPT και HHT σε χρονοσειρά ρεύματος της Α/Γ 5: (α) Εξεταζόμενη χρονοσειρά, (β) Συγκριτικά αποτελέσματα για τη θεμελιώδη, την 5^η και την 7^η αρμονική, (γ) Εκτίμηση πλάτους θεμελιώδους και αρμονικών συχνοτήτων με χρήση HHT και (δ) Εκτίμηση συχνότητας θεμελιώδους και αρμονικών συνιστωσών με χρήση HHT.

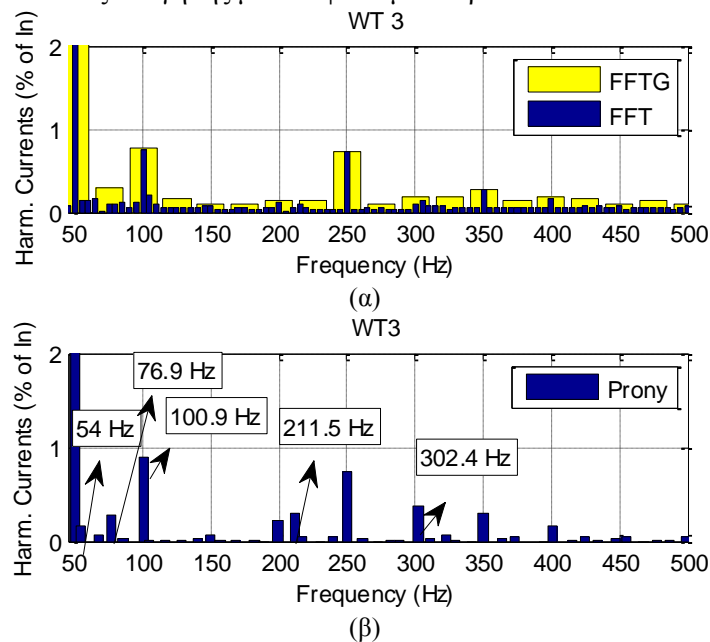


Σχήμα 5.17 (α) Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων FFT, FFTG, Prony και WPT στην κυματομορφή της τάσης ακροδεκτών της Α/Γ 2, (β) Προσέγγιση του σήματος με τη μέθοδο Prony.

Στη συνέχεια, η ανάλυση επεκτείνεται σε πιο σύνθετα σήματα, που περιλαμβάνουν μη χαρακτηριστικές αρμονικές, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στις ΑΓΔΤ. Το φασματικό περιεχόμενο του ρεύματος εξόδου μίας ΑΓΔΤ, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, εξαρτάται από την ολίσθηση του δρομέα, με συνέπεια την εμφάνιση ενδιάμεσων αρμονικών αξιοσημείωτου πλάτους, των οποίων η συχνότητα δεν είναι σταθερή. Οι αρμονικές αυτές δεν εντοπίζονται από τον κλασικό FFT ή τον FFTG, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.18, όπου παρουσιάζονται οι αρμονικές του ρεύματος εξόδου της Α/Γ 3, υπολογισμένες με τις μεθόδους FFT, FFTG και Prony.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν αξιόλογα συμπεράσματα. Η παρουσία σημαντικών διακριτών τόνων σε συχνότητες μη ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, λόγω της ολίσθησης της μηχανής εντός του θεωρούμενου χρονικού παραθύρου, έχει ως συνέπεια την εμφάνιση σημαντικής φασματικής διαρροής με την εφαρμογή του FFT, που επεκτείνεται σε περισσότερες από

δύο πλευρικές αρμονικές, οι οποίες όμως δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των ομαδοποιημένων ακέραιων αρμονικών σύμφωνα με τον αντίστοιχο ορισμό του IEC 61000-4-7 (βλ. εξίσωση 3.14), οδηγώντας σε υποεκτίμηση των αποτελεσμάτων του FFTG για τις ακέραιες αρμονικές και υπερεκτίμηση των ενδιάμεσων αρμονικών. Για παράδειγμα, η ύπαρξη διακριτών τόνων στα 100.9 Hz και στα 302.4 Hz, έχει ως συνέπεια η εκτιμώμενες 2^η και 6^η αρμονική από την εφαρμογή του FFTG να έχουν υποβαθμισμένο πλάτος (καθώς η φασματική διαρροή λόγω του FFT διαχέεται και πέρα από τα γειτονικά πολλαπλάσια ± 5 Hz), ενώ αντίθετα οι ομαδοποιημένες ενδιάμεσες αρμονικές στα 225 Hz, 275 Hz και 325 Hz εμφανίζονται σημαντικά ενισχυμένες, χωρίς ωστόσο το αποτέλεσμα αυτό να απεικονίζει ποιοτικά το πραγματικό φάσμα του ρεύματος της Α/Γ 3. Το ίδιο συμπέρασμα αναδεικνύεται πιο έντονα στην εκτίμηση της ενδιάμεσης αρμονικής στα 225 Hz, λόγω της παρουσίας συχνότητας σημαντικού πλάτους στα 211.5 Hz. Η εφαρμογή του FFTG οδηγεί στην απώλεια της πληροφορίας σχετικά με την ύπαρξη του συγκεκριμένου διακριτού τόνου καθώς η αντίστοιχη ενδιάμεση αρμονική τοποθετείται στα 225 Hz και με σημαντικά μεγαλύτερο πλάτος. Αντίστοιχες διαπιστώσεις ισχύουν και για τις υπόλοιπες ενδιάμεσες αρμονικές, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία αξιολόγησης με τα υφιστάμενα όρια.

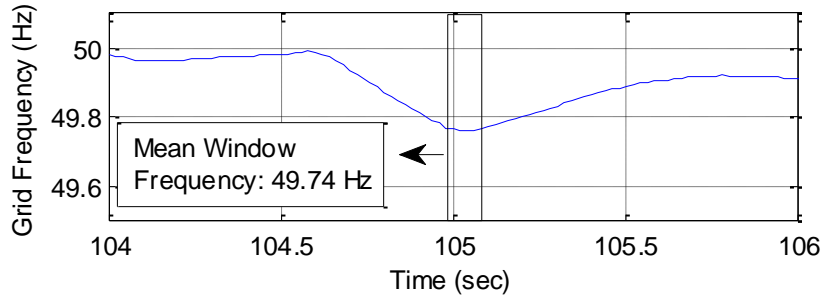


Σχήμα 5.18. Αποτελέσματα αρμονικής ανάλυσης του ρεύματος εξόδου Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης με χρήση των μεθόδων (Α/Γ 3): (α) FFT και FFTG και (β) Prony.

Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα είναι και τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Prony σε σήμα τάσης μετρημένο στους ακροδέκτες Α/Γ, η οποία είναι εγκατεστημένη σε ασθενές αυτόνομο δίκτυο. Το κύριο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μέτρησης είναι η αξιοσημείωτη διακύμανση της θεμελιώδους συχνότητας, γεγονός που επηρεάζει τη συμπεριφορά του FFT. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 3200 Hz, ενώ για τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του σήματος, στη συγκεκριμένη μέτρηση δεν χρησιμοποιήθηκε διάταξη PLL. Στο Σχήμα 5.19 εικονίζεται η διακύμανση της συχνότητας του δικτύου για χρονικό διάστημα 2 s, όπως υπολογίζεται από τη χρονοσειρά της τάσης με την εφαρμογή ανιχνευτή *zero-crossing*, υλοποιημένο σε Matlab. Για τη διενέργεια της σύγκρισης επιλέγεται χρονικό παράθυρο διάρκειας 0.2 s τη στιγμή κατά την οποία η συχνότητα έχει την ελάχιστη τιμή περί τα 49.74 Hz, όπως σημειώνεται στο Σχήμα.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των μεθόδων FFT και Prony παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.11. Όπως είναι αναμενόμενο, ο FFT συγκεντρώνει τις υπολογιζόμενες συχνότητες στα ακέραια πολλαπλάσια της επιλεγθείσας διακριτότητας ($k \cdot 5$ Hz, k ακέραιος) με αποτέλεσμα να αδυνατεί να εντοπίσει τη συγκεκριμένη διακύμανση. Το ίδιο συμβαίνει και με όλες τις χαρακτηριστικές αρμονικές, οι οποίες τοποθετούνται στα ακριβή ακέραια πολλαπλάσια των 50 Hz, με ταυτόχρονη σημαντική εμφάνιση φασματικής διαρροής στις πλευρικές συχνότητες. Αντίθετα, η Prony υπολογίζει με ακρίβεια την τιμή της συχνότητας εντός του θεωρούμενου χρονικού παραθύρου των 10 κύκλων, καθώς και τις αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες είναι μεν ακέραια πολλαπλάσια της

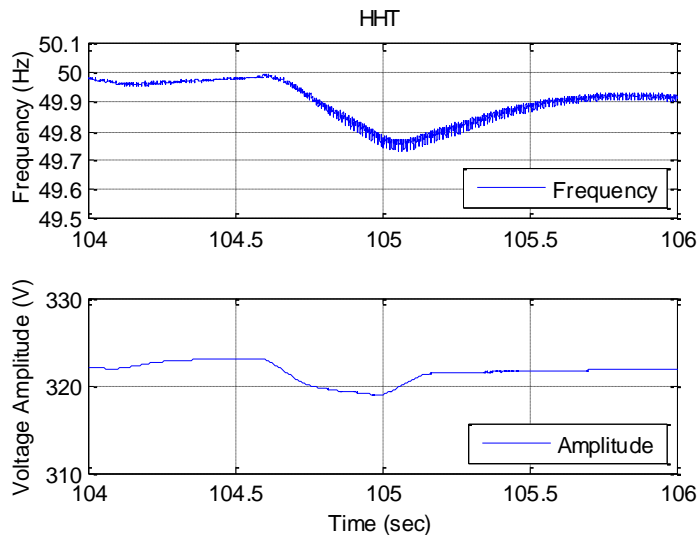
θεμελιώδους, όχι όμως ακριβώς των 50 Hz. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.11, η 3^η αρμονική αντιστοιχεί στα 148.86 Hz (~3x49.7 Hz), η 5^η στα 248.76 (~5x49.7 Hz) κ.οκ.



Σχήμα 5.19 Διακύμανση συχνότητας μετρημένες στους ακροδέκτες της Α/Γ 6 που λειτουργεί σε αυτόνομο ασθενές δίκτυο. Για την εφαρμογή των μεθόδων FFT και Prony επιλέγεται το χρονικό παράθυρο $T_{w,i}$ κατά το οποίο παρατηρείται η ελάχιστη τιμή της συχνότητας ίση 49.74 Hz.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11. Αποτελέσματα μεθόδων FFT, FFTG και PRONY στην αρμονική ανάλυση της τάσης V_1 στους ακροδέκτες της Α/Γ 6, που λειτουργεί σε αυτόνομο ασθενές σύστημα με διακύμανση συχνότητας				
Frequency (Hz)	FFT	FFTG	PRONY	
	RMS (V)	RMS (V)	Frequency (Hz)	RMS (V)
50.00	225.1	225.8	49.7	225.3
150.00	1.3	1.8	148.9	1.9
250.00	3.5	3.8	248.4	5.8
350.00	2.0	2.5	347.7	2.6
450.00	0.3	0.7	447.1	0.8

Ένα άλλο, εξίσου σημαντικό συμπέρασμα που επιβεβαιώνεται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ότι τα πλάτη των συχνοτήτων εκατέρωθεν της θεμελιώδους και των ακέραιων πολλαπλασίων αυτής που προκύπτουν από τον κλασικό FFT δεν είναι πραγματικά, αλλά αποτελούν προϊόν φασματικής διαρροής. Με την εφαρμογή βέβαια της ομαδοποίησης, πράγματι οι συχνότητες συγκεντρώνονται στα ακέραια πολλαπλάσια και το φαινόμενο της διαρροής αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διαρροή επεκτείνεται και πέρα από τις πιο κοντινές γειτονικές αρμονικές, φαινόμενο το οποίο μόνο με την εφαρμογή της Prony μπορεί να αντιμετωπιστεί στη συγκεκριμένη περίπτωση.



Σχήμα 5.20. Υπολογισμός διακύμανσης της θεμελιώδους συχνότητας και του πλάτους της τάσης ασθενούς αυτόνομου δικτύου του Σχήματος 5.19, με χρήση της HHT.

Όσον αφορά τη μέθοδο Hilbert-Huang, στο Σχήμα 5.20 αναδεικνύεται η δυνατότητα της μεθόδου να παρακολουθεί τις στιγμιαίες διακυμάνσεις συχνότητας και πλάτους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την πληροφορία για το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης του Πίνακα 5.11 για την κατασκευή του *masking signal*, εφαρμόζεται η μέθοδος RHHT στη χρονοσειρά τάσης V_a στους ακροδέκτες της Α/Γ 6 και υπολογίζεται η στιγμιαία διακύμανση της θεμελιώδους συχνότητας τάσης για χρονικό διάστημα 2 s. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20, η μέθοδος εντοπίζει άμεσα και με

ικανοποιητική ακρίβεια τη χρονική στιγμή της μεταβολής, το προφίλ της συχνότητας, τη βύθιση αλλά και τη μεταβολή στο πλάτος της μετρούμενης τάσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν προκύπτουν απευθείας από τις άλλες μεθόδους (FFT και Prony), παρά μόνο με την εφαρμογή τους σε διαδοχικά χρονικά παράθυρα των 0.2 s και, ειδικά στην περίπτωση του FFT, μόνο για το πλάτος. Από την άλλη πλευρά, ο HHT δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει άμεσα και με ικανοποιητική ακρίβεια τις υπόλοιπες αρμονικές συνιστώσες, ενώ στα μειονεκτήματα του συμπεριλαμβάνονται η εμφάνιση ψευδο-ταλαντώσεων και του φαινομένου *end-effect* που έχουν αναλυθεί στο 2^ο Κεφάλαιο.

Τέλος, η εφαρμογή του WPT δεν συνιστάται για τον ακριβή υπολογισμό των αρμονικών χαμηλής τάξης σε περιπτώσεις σύνθετων σημάτων καθώς είναι σαφής η αδυναμία του στον εντοπισμό κοντινών συχνοτήτων.

5.4.5 Εκτίμηση ανώτερων αρμονικών

Η εκτίμηση των αρμονικών χαμηλής τάξης είναι σημαντική λόγω της πιθανότητας διέγερσης αρμονικών συντονισμών των δικτύων στα οποία συνδέονται. Ταυτόχρονα όμως, είναι δεδομένη η τακτική των κατασκευαστών Α/Γ να επιλέγουν διακοπτικές συχνότητες των μετατροπέων σε υψηλές τιμές (> 1 kHz), προκειμένου να αποφεύγονται τέτοια φαινόμενα, αλλά και να φιλτράρονται πιο εύκολα με χρήση φίλτρων μικρότερων διαστάσεων.

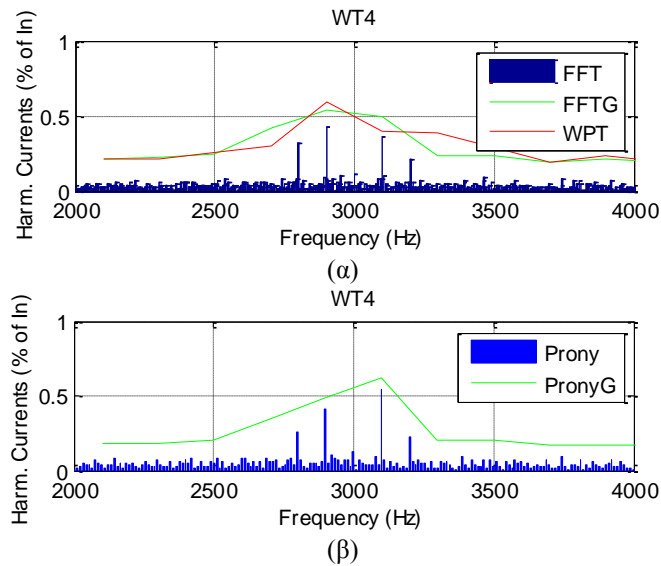
Από τα συμπεράσματα των προηγούμενων παραγράφων οι μέθοδοι Prony και WPT εμφανίζονται ως πιο κατάλληλες για εφαρμογή στην περιοχή συχνοτήτων άνω των 2 kHz, ως εναλλακτικές του FFT, με την Prony να υπερτερεί στον εντοπισμό διακριτών τόνων. Στα Σχήματα 5.21 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της Prony στο ρεύμα εξόδου της Α/Γ 4, σε αντιπαραβολή με τις FFT και FFTG. Η συγκεκριμένη Α/Γ χρησιμοποιεί τεχνική PWM βασισμένη σε φέρον σήμα για τον έλεγχο του μετατροπέα (SPWM), γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση συγκεκριμένων διακριτών αρμονικών συχνοτήτων σημαντικού πλάτους στα 2800, 2900, 3100 και 3200 Hz, δεδομένης της διακοπτικής συχνότητας $f_s=3$ kHz, σύμφωνα με τη σχέση 5.5. Τόσο ο κλασικός FFT όσο και η Prony, εντοπίζουν με επιτυχία τους διακριτούς τόνους. Σε ορισμένες συχνότητες, η Prony εκτιμά ελαφρώς υψηλότερα πλάτη αρμονικών, γεγονός που αποδίδεται στην απουσία φασματικής διαρροής.

Για την εξασφάλιση της συμβατότητας με το IEC 61000-4-7 στην περιοχή συχνοτήτων άνω των 2 kHz, σε κάθε γράφημα περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης, παρέχοντας κοινή αναφορά για τη σύγκριση των μεθόδων, συμπεριλαμβανομένου και του WPT. Ιδιαίτερα για την Prony, της οποίας η διακριτότητα συχνότητας δεν είναι σταθερή, εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

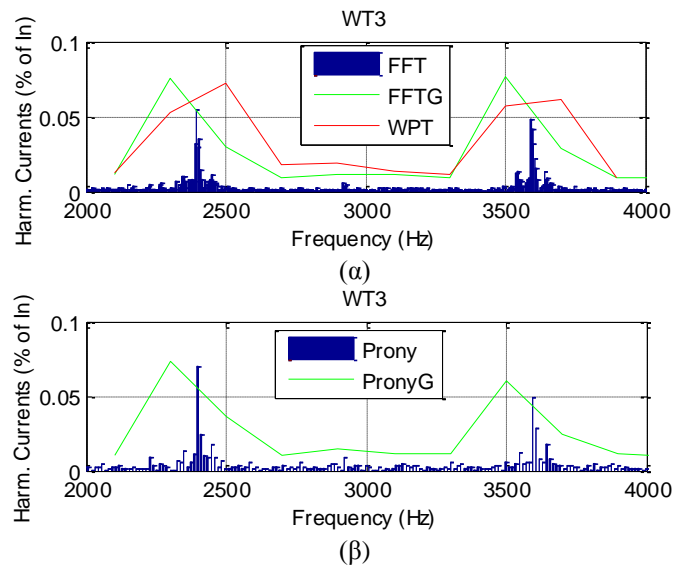
$$G_{n,Prony}^2 = \sum_{f_i \in [f_n - 95, f_n + 100] \text{ Hz}} C_{f_i}^2 \quad (5.8)$$

Τα αποτελέσματα των FFTG, Prony μετά την ομαδοποίηση (PronyG) και WPT στα Σχήματα 5.21 (α) και (β) είναι γενικά παραπλήσια, παρόλο που υπάρχουν ορισμένες διαφορές σε συγκεκριμένα πλάτη. Αντίστοιχες διαπιστώσεις ισχύουν και για τα Σχήματα 5.22 (α) και (β) που περιλαμβάνουν το φασματικό περιεχόμενο του ρεύματος εξόδου της Α/Γ 3 (ΑΓΔΤ), η οποία χρησιμοποιεί επίσης τεχνική PWM βασισμένη σε φέρον σήμα. Επιπρόσθετα, σε όλα τα διαγράμματα είναι εμφανής η απώλεια της πληροφορίας σχετικά με τις ακριβείς αρμονικές συχνότητες μετά την εφαρμογή της ομαδοποίησης, καθώς οι αρμονικές μετατοπίζονται στις κεντρικές συχνότητες κάθε υποομάδας συνιστωσών εύρους 200 Hz (στα 2100, 2300, ..., 8900 Hz).

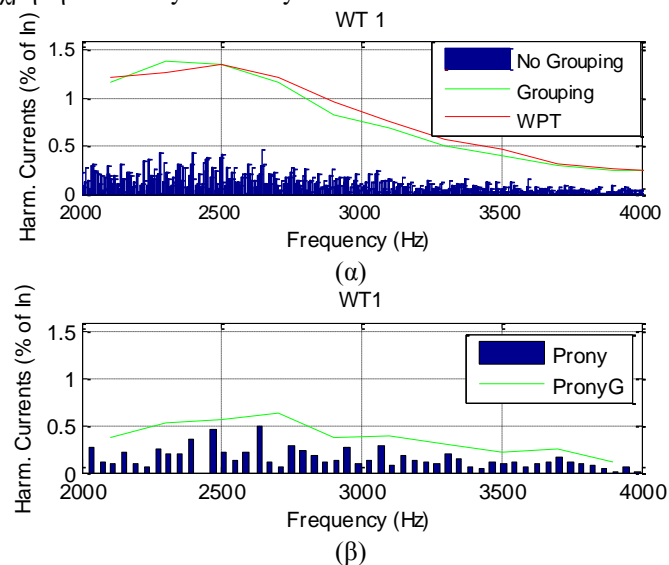
Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση συνεχούς φάσματος, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις εφαρμογής ελέγχου ρεύματος υστέρησης, η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων δεν δίνει ευανάγνωστα αποτελέσματα. Αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.23, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης του ρεύματος της Α/Γ 1, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος φάσματος. Τόσο ο FFT όσο και η Prony εξάγουν παρόμοια φάσματα, παρόλο που η σύγκριση μεταξύ συγκεκριμένων τόνων δεν έχει πλέον ιδιαίτερο φυσικό νόημα. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της ομαδοποίησης στα αποτελέσματα της Prony οδηγεί σε σημαντικά χαμηλότερα πλάτη αρμονικών σε σχέση με τον FFTG, γεγονός που αποδίδεται στο ότι ο αλγόριθμος υλοποίησης της Prony δεν διατηρεί τη συνολική ενέργεια των σημάτων με συνεχές αρμονικό φάσμα. Όσον αφορά τον WPT, παρέχει αποτελέσματα συγκρίσιμα με τον FFTG.



Σχήμα 5.21. Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων FFT, FFTG, WPT, Prony και PronyG στην κυματομορφή ρεύματος εξόδου της Α/Γ 4.



Σχήμα 5.22. Ανώτερες αρμονικές ρεύματος εξόδου της Α/Γ 3, υπολογισμένες: (α) με χρήση των μεθόδων FFT, FFTG, WPT και (β) με χρήση των Prony και PronyG.



Σχήμα 5.23. Ανώτερες αρμονικές ρεύματος εξόδου της Α/Γ 1, υπολογισμένες: (α) με χρήση των μεθόδων FFT, FFTG, WPT και (β) με χρήση των Prony και PronyG.

5.5. Συμπεράσματα

Από τη μελέτη του παρόντος Κεφαλαίου εξάγονται ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Κατ' αρχήν, η μεθοδολογία της ομαδοποίησης, όπως εισάγεται από το πρότυπο IEC 61000-4-7, πράγματι επιτυγχάνει να μειώσει το σφάλμα του FFT λόγω φασματικής διαρροής. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπερεκτίμηση των αρμονικών πλατών σε περιπτώσεις παρουσίας ενδιάμεσων αρμονικών συχνοτήτων, όπως συμβαίνει στις ΑΓΔΤ, καθώς και στην περιοχή των ανώτερων συχνοτήτων. Παράλληλα, οδηγεί σε απώλεια της πληροφορίας για την ακριβή τιμή της συχνότητας των υφιστάμενων αρμονικών. Όσον αφορά το ενδεχόμενο εφαρμογής μεθόδων αρμονικής ανάλυσης εναλλακτικών του FFT για τη βελτίωση της ακρίβειας στην ανάλυση αρμονικών των Α/Γ, το γενικό συμπέρασμα είναι ότι καμία από τις μεθόδους που εξετάστηκαν (WPT, HHT και Prony) δεν υπερέχει σε σημαντικό βαθμό έναντι των υπολοίπων, ώστε να καθιερωθεί για γενικευμένη χρήση στη θέση του FFT. Ωστόσο, οι εναλλακτικές μέθοδοι παρουσιάζουν επιμέρους πλεονεκτήματα και μπορούν να εφαρμοστούν ως εργαλεία συμπληρωματικά της βασικής μεθοδολογίας του FFT. Πιο συγκεκριμένα:

Η Prony συνιστάται για την ανάλυση των αρμονικών ρεύματος χαμηλής τάξης των ΑΓΔΤ, που χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών που σχετίζονται με την ολίσθηση του δρομέα. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η συνεισφορά της στην ανάλυση σημάτων με υψηλές συχνότητες που περιλαμβάνουν διακριτές αρμονικές συνιστώσες, όπως συμβαίνει με τις Α/Γ που εφαρμόζουν τεχνικές έλεγχου PWM με χρήση φέροντων σημάτων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Prony απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο υλοποίησης για την ανάλυση σημάτων με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας και δεν είναι αποδοτική στην περίπτωση συνεχούς φάσματος, όπως συμβαίνει στις Α/Γ που εφαρμόζουν έλεγχο ρεύματος υστέρησης.

Η μέθοδος Hilbert-Huang είναι κατάλληλη για την ανάλυση σημάτων με σημαντικές διακυμάνσεις της θεμελιώδους συχνότητας ή των αρμονικών χαμηλής τάξης, ενώ δεν συνιστάται για εφαρμογή σε σύνθετα σήματα με κοντινές αρμονικές συνιστώσες.

Ο μετασχηματισμός Wavelets είναι κατάλληλος για την εκτίμηση του πλάτους των αρμονικών χαμηλής τάξης, μόνο στην περίπτωση απλών σημάτων χωρίς την παρουσία ενδιάμεσων συχνοτήτων. Επιπρόσθετα, είναι συμβατός με τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης του IEC 61000-4-7 για τις ανώτερες αρμονικές (> 2 kHz), παρέχοντας αποτελέσματα αντίστοιχα με αυτά του FFT. Επομένως, όπως προτείνεται και από το IEC 61000-4-7, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική του FFT, χωρίς ωστόσο να αναγνωρίζονται σημαντικά πλεονεκτήματα, εκτός από τη δυνατότητα εντοπισμού διακυμάνσεων του πλάτους των αρμονικών σε περιπτώσεις σημάτων με απλό φασματικό περιεχόμενο.

Τα συμπεράσματα από τη μελέτη των μεθόδων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12. Συμπεράσματα από τη χρήση του μετασχηματισμού Wavelets και των μεθόδων Hilbert-Huang και Prony σε σήματα Α/Γ.		
<i>Μέθοδος</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
<i>Wavelets</i>	+ Δυνατότητα παρακολούθησης διακυμάνσεων στο πλάτος των αρμονικών + Συμβατότητα με τη μεθοδολογία του IEC 61000-4-7 για τις ανώτερες αρμονικές συχνότητας (> 2 kHz)	- Δεν είναι σε θέση να διαχωρίσει κοντινές συχνότητες
<i>Hilbert-Huang</i>	+ Δυνατότητα παρακολούθησης της διακύμανσης της θεμελιώδους συχνότητας και της τάσης ασθενών δικτύων	- Η αποτελεσματικότητα υπολογισμού αρμονικών συνιστωσών είναι γενικά αβέβαιη και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εξεταζόμενου σήματος (κυρίως τα σχετικά πλάτη και την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών συχνοτήτων)
<i>Prony</i>	+ Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού ακέραιων και ενδιάμεσων αρμονικών χαμηλής τάξης (έως 1kHz) + Ικανοποιητική ακρίβεια στον εντοπισμό διακριτών συχνοτήτων ανώτερης τάξης + Δεν έχει προβλήματα φασματικής διαρροής + Μικρός υπολογιστικός χρόνος σε συχνότητες δειγματοληψίας κάτω των 20 kHz	- Δυσκολία στη διαχείριση σημάτων με ευρύ φάσμα ανώτερων συχνοτήτων (Α/Γ με έλεγχο ρεύματος υστέρησης) - Σημαντικός υπολογιστικός χρόνος για συχνότητες δειγματοληψίας άνω των 20 kHz - Ευαισθησία στον υφιστάμενο θόρυβο των πραγματικών σημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

6.1. Ανακεφαλαίωση

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να συμβάλει στην ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης των αρμονικών εκπομπών των Α/Γ, εξετάζοντας ζητήματα όπως η ακρίβεια των υφιστάμενων μεθόδων υπολογισμού, η εξάρτηση των αρμονικών από τις συνθήκες λειτουργίας της Α/Γ και η επίδραση των υπολογιστικών παραμέτρων στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων.

Η εργασία κινήθηκε σε τρεις βασικούς άξονες: (α) τη διεξαγωγή, μελέτη και συγκριτική αξιολόγηση μετρήσεων αρμονικών σε Α/Γ, (β) την υλοποίηση και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας σήματος για την εκτίμηση των αρμονικών των Α/Γ και (γ) τη μέτρηση και ανάλυση των αρμονικών εκπομπών αιολικών πάρκων.

Ο πρώτος άξονας περιλαμβάνει κατ' αρχήν την αναλυτική περιγραφή της υφιστάμενης μεθοδολογίας μετρήσεων και υπολογισμού των αρμονικών, όπως καθορίζεται στα σχετικά πρότυπα και εφαρμόζεται για την έκδοση του πιστοποιητικού των εμπορικών Α/Γ. Ξεκινά με το θεωρητικό υπόβαθρο του FFT στο 2^ο Κεφάλαιο, όπου σχολιάζονται οι αδυναμίες και τα σφάλματα που υπεισέρχονται στην ανάλυση μετρήσεων Α/Γ σε συνθήκες πεδίου. Στη συνέχεια, στο 3^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθείται από τα πρότυπα IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7 για τη μέτρηση των αρμονικών των Α/Γ, ενώ γίνεται και αναφορά στη διαδικασία αξιολόγησης των μετρήσεων αυτών, όπως καθορίζεται σε σχετικά πρότυπα της σειράς 61000 της IEC. Τέλος, στο 4^ο Κεφάλαιο, η μεθοδολογία εκτίμησης αρμονικών εφαρμόζεται σε Α/Γ μεταβλητών στροφών διαφόρων τύπων.

Ο δεύτερος άξονας στοχεύει στην διαμόρφωση προτάσεων για τη χρήση μεθόδων εκτίμησης αρμονικών, εναλλακτικών του FFT, και περιλαμβάνει κατ' αρχήν εκτενή διερεύνηση μεθόδων που προτείνονται στη βιβλιογραφία και αξιολόγηση τους με γνώμονα τη δυνατότητα εφαρμογής στα σήματα Α/Γ, η οποία παρουσιάζεται στο 2^ο Κεφάλαιο. Εξετάζεται σειρά μεθόδων που κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες υπο-ομάδες: τις μη παραμετρικές (FFT, Wavelets, S-Transform, Hilbert-Huang) και τις παραμετρικές (Prony, ESPRIT, MUSIC, ARMA, Φίλτρα Kalman, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα). Οι μέθοδοι αυτές θεωρούνται οι επικρατέστερες εναλλακτικές του FFT στη βιβλιογραφία για εφαρμογή στην ανάλυση αρμονικών τάσης και ρεύματος στα ΣΗΕ. Δεδομένου ωστόσο ότι τα σήματα Α/Γ παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα τυπικά φορτία των δικτύων, από τις παραπάνω μεθόδους επιλέγονται τελικά οι Wavelets, Hilbert-Huang και Prony για περαιτέρω διερεύνηση. Η επαλήθευση της αποτελεσματικότητας των Wavelets, Hilbert-Huang και Prony περιλαμβάνεται στο 5^ο Κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται αποτελέσματα εφαρμογής τους σε επιλεγμένα συνθετικά σήματα και σε μετρήσεις Α/Γ και σχολιάζονται πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τον μετασχηματισμό Fourier.

Τέλος, ο τρίτος άξονας ασχολείται με την επέκταση της μεθοδολογίας εκτίμησης αρμονικών σε πραγματικές μετρήσεις του συνολικού ρεύματος Α/Π. Η εργασία αυτή παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη διαμόρφωση των αρμονικών χαρακτηριστικών του ρεύματος εξόδου ενός Α/Π που αποτελείται από Α/Γ μεταβλητών στροφών.

6.2. Τελικά συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας εστιάζονται σε τέσσερις κατευθύνσεις: (α) στην αξιολόγηση της υφιστάμενης μεθοδολογίας μέτρησης και εκτίμησης αρμονικών Α/Γ, όπως ορίζεται στα πρότυπα IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7, (β) στη δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών μεθόδων για την εκτίμηση των εκπομπών αρμονικών των Α/Γ, (γ) στην ποιοτική αξιολόγηση των φασματικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων Α/Γ ανάλογα με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους μέρους και το σημείο λειτουργίας και (δ) στην ποιοτική αξιολόγηση του αρμονικού περιεχομένου του ρεύματος εξόδου Α/Π.

6.2.1. Αξιολόγηση της υφιστάμενης μεθοδολογίας μέτρησης και εκτίμησης αρμονικών ανεμογεννητριών

Η ισχύουσα μεθοδολογία μέτρησης και εκτίμησης αρμονικών για τις Α/Γ καθορίζεται από τα πρότυπα IEC 61000-4-7 και IEC 61400-21, με βάση τα οποία συμπληρώνεται το σχετικό πιστοποιητικό δοκιμών. Η μεθοδολογία αυτή μελετήθηκε επισταμένως και προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μεθοδολογία της ομαδοποίησης (grouping) των αρμονικών συνιστωσών, παρ' ότι εισάγεται για να διορθώσει το σφάλμα υπολογισμού του FFT λόγω φασματικής διαρροής, μπορεί να προσδώσει διαφορετικά χαρακτηριστικά στις τελικά υπολογιζόμενες τιμές, τα οποία θα πρέπει να συνεκτιμώνται κατά τη διαδικασία ελέγχου της τήρησης των ορίων που επιβάλλουν οι κανονισμοί για τη σύνδεση στο δίκτυο. Δεδομένου ότι η μεθοδολογία της ομαδοποίησης συγκεντρώνει σε κάθε ακέραια ή ενδιάμεση αρμονική το ενεργειακό περιεχόμενο γειτονικών μη ακέραιων συνιστωσών, οι υπολογιζόμενες ομαδοποιημένες (grouped) τιμές είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πρωτογενείς αρμονικές που προκύπτουν από την εφαρμογή του «κλασικού» FFT. Μάλιστα, η αύξηση του πλάτους μπορεί να είναι σημαντική σε περιπτώσεις ύπαρξης ενδιάμεσων αρμονικών, κατάσταση τυπική για Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, καθώς και στις ανώτερες συχνότητες, όπου οι εμφανιζόμενοι τόνοι διαμορφώνονται από τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα ισχύος και μπορεί να είναι ασυσχέτιστοι με τη θεμελιώδη συχνότητα των 50 Hz. Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις ύπαρξης κοντινών ενδιάμεσων συχνοτήτων, η ομαδοποίηση προκαλεί και μετατόπιση της πραγματικής ενδιάμεσης συχνότητας στην τιμή της συμβατικής ενδιάμεσης συχνότητας $(n+0.5) \cdot 50$ Hz, (π.χ. από τα 210 Hz στα 225 Hz). Με αφορμή την παρατήρηση αυτή, τίθεται προς συζήτηση η λογική θέσπισης ορίων αρμονικών, προκειμένου να μην αναφέρονται σε συγκεκριμένες συχνότητες αλλά σε περιοχές συχνοτήτων, ιδιαίτερα όσον αφορά στις μη χαρακτηριστικές αρμονικές και τις ανώτερες αρμονικές (> 2 kHz), καθώς η «ενεργειακή» προσέγγιση του IEC 61000-4-7 στην εκτίμηση των αρμονικών πλατών δεν συμβαδίζει απόλυτα με την επιβολή ορίων σε διακριτές συχνότητες.
- Σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των εκπομπών αρμονικών δεν παίζουν μόνο οι τιμές 10λέπτου που δηλώνονται στα πιστοποιητικά μετρήσεων των Α/Γ, κατ' απαίτηση του IEC 61400-21, αλλά και οι σύντομες διακυμάνσεις διάρκειας 3 s ή μικρότερης. Με βάση τη θεμελιώδη απαίτηση του IEC 61000-4-7 για χρήση μη επικαλυπτόμενου χρονικού παραθύρου μήκους 10 κύκλων, οι πρωτογενείς διαθέσιμες τιμές των υπολογιζόμενων αρμονικών αναφέρονται σε ελάχιστη διάρκεια 0.2 s (σύνολο 3000 τιμών ανά δεκάλεπτο). Από τη στατιστική μελέτη του πρωτογενούς δείγματος των αρμονικών 0.2 s προέκυψε ότι η θεώρηση αρμονικών διάρκειας μικρότερης του 10λέπτου μπορεί να μην επηρεάζει τη μέση τιμή του συγκεκριμένου δείγματος, αλλάζει όμως σημαντικά τη διασπορά και κατ' επέκταση την τιμή της αρμονικής που αντιστοιχεί σε πιθανότητα μη υπέρβασης 95%, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των εκπομπών αρμονικών των Α/Γ. Δεδομένου ότι τα εργαστήρια που διενεργούν τις μετρήσεις σε εμπορικές μηχανές και κατ' επέκταση οι κατασκευαστές έχουν στη διάθεση τους μετρήσεις αρμονικών ελάχιστης διάρκειας ενός κύκλου (20 ms), κρίνεται σκόπιμο στα πιστοποιητικά μετρήσεων να δηλώνονται, μαζί με τα 10λεπτα, οι αντίστοιχες μέγιστες εμφανιζόμενες τιμές μικρότερης διάρκειας (π.χ. αρμονικές 3 s). Εναλλακτικά, κατά τη διαδικασία αξιολόγησης θα πρέπει να ανάγονται οι τιμές 10λέπτου στην επιθυμητή μικρότερη διάρκεια, λαμβάνοντας υπόψη κάποιες βασικές υποθέσεις για την αντίστοιχη αύξηση της διασποράς, όπως διαπιστώθηκαν στην παρούσα εργασία. Ενδεικτικά για την αναγωγή από τα 10 min στα 3 s, φαίνεται ότι ο παράγοντας k_{hvs} που εισάγεται στο πρότυπο IEC 61000-3-6 είναι μάλλον συντηρητικός για τις Α/Γ, ιδιαίτερα στις ανώτερες συχνότητες (> 2 kHz) όπου τα δείγματα αρμονικών παρουσιάζουν πολύ μικρή συσχέτιση μεταξύ τους, οπότε μπορεί να παίρνει τιμές αρκετά μεγαλύτερες του 2.
- Για την εκτίμηση των αρμονικών του συνολικού ρεύματος ενός Α/Π από τις μετρήσεις στις επιμέρους Α/Γ, τα πρότυπα IEC 61000-3-6 και IEC 61400-21 υιοθετούν συγκεκριμένη μεθοδολογία άθροισης, αξιοποιώντας τα μέτρα των αρμονικών που παρουσιάζονται στα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος των Α/Γ και πραγματοποιώντας ορισμένες υποθέσεις για τις φασικές τους γωνίες. Η μελέτη των αρμονικών ρευμάτων που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έδειξε ότι οι φασικές γωνίες των αρμονικών των Α/Γ τείνουν να είναι «κλειδωμένες» με την τάση του δικτύου στις χαμηλές και περιττές τάξεις αρμονικών, ενώ οι υπόλοιπες προσεγγίζουν την Ομοιόμορφη κατανομή, προχωρώντας προς τις ανώτερες τάξεις. Με βάση την παρατήρηση αυτή και με την εφαρμογή κατάλληλης

μεθοδολογίας διαπιστώνεται το συνολικό αρμονικό ρεύμα ενός Α/Π αναμένεται να είναι κατά $\sqrt{3}$ φορές αυξημένο σε σχέση με την τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή του κανόνα άθροισης που προτείνεται στα πρότυπα για τις αρμονικές που είναι ανώτερες της 10^{th} τάξης (με χρήση εκθετικού συντελεστή $\alpha=2$) καθιστώντας ευμενέστερη τη σύγκριση με τα υφιστάμενα όρια για αυτές τις αρμονικές τάξεις. Παράλληλα, για τη διευκόλυνση του έργου του Διαχειριστή, προτείνεται να συμπεριλαμβάνεται στις εκθέσεις δοκιμών η πληροφορία για τις φασικές γωνίες όλων των αρμονικών τάξεων, δεδομένου ότι είναι ούτως ή άλλως διαθέσιμη στα μετρητικά εργαστήρια (και ενδεχομένως και στον κατασκευαστή). Για την εξασφάλιση συμβατότητας με τα μέτρα των αρμονικών συνιστωσών θα πρέπει να αναφέρεται στο ίδιο διάστημα των 10 min, είτε ως μέση τιμή (επιτρέποντας χονδροειδή εκτίμηση) ή ως μέση τιμή και διασπορά. Προφανώς, τα ψηφιακά αποτελέσματα της ανάλυσης, θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για πλήρη μελέτη, εάν αυτό κρίνεται αναγκαίο.

- Η υφιστάμενη παραμόρφωση της τάσης του δικτύου ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά την έγχυση αρμονικών ρευμάτων από τις επιμέρους πηγές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εμφάνισης συντονισμών. Η διαδικασία μετρήσεων ποιότητας ισχύος του προτύπου IEC 61400-21 περιορίζεται στην απαίτηση για δειγματοληπτική καταγραφή της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THD) πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων, με την Α/Γ εκτός λειτουργίας. Για την πληρέστερη αποτύπωση του προφίλ της υφιστάμενης παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου και της επίδρασής της στη διαμόρφωση των αρμονικών ρευμάτων της εξεταζόμενης Α/Γ, προτείνεται η συμπλήρωση της διαδικασίας με την απαίτηση για διενέργεια συστηματικότερης σειράς μετρήσεων τάσης με την Α/Γ (και τις γειτονικές της, εφόσον βρίσκεται εντός Α/Π) εκτός λειτουργίας.

- Από την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης, προέκυψε ως γενική διαπίστωση ότι η διενέργεια μετρήσεων στην πλευρά ΧΤ του μετασχηματιστή της Α/Γ δεν αποτυπώνει πάντα με ακρίβεια την πραγματική εικόνα, καθώς εμφανίζονται συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας, λόγω και των μονοφασικών βοηθητικών φορτίων της Α/Γ, οι οποίες δεν εμφανίζονται στην πλευρά ΜΤ.

6.2.2. Δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών μεθόδων εκτίμησης των αρμονικών εκπομπών των ανεμογεννητριών

Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης γύρω από αυτό το αντικείμενο είναι τα παρακάτω:

- Η μέθοδος Prony μπορεί να χρησιμοποιείται ως συμπληρωματική του FFT, για την περαιτέρω αρμονική ανάλυση σημάτων ρεύματος ή τάσης, σε περιπτώσεις όπου το αποτέλεσμα του FFT αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο παραβίασης κάποιων ορίων αρμονικών ή αν οι προκύπτουσες αρμονικές συνιστώσες παρουσιάζονται ασυνήθιστα υψηλές. Με χρήση της Prony είναι δυνατό να εντοπιστούν διακριτοί τόνοι σε μη ακέραιες συχνότητες, αλλά και συχνότητες που δεν συμπίπτουν με τη συμβατική διακριτότητα των 5 Hz, που προκύπτει από το χρονικό παράθυρο των 0.2 s κατά την εφαρμογή του FFT κατά IEC 61000-4-7. Ιδιαίτερα, η χρήση της Prony συνιστάται ως αποδοτικότερη έναντι του FFT στην ανάλυση αρμονικών χαμηλής τάξης (έως 1 kHz) Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, όπου αναμένεται εμφάνιση ενδιάμεσων αρμονικών λόγω της επίδρασης της ολίσθησης. Για τις ανώτερες αρμονικές, η εφαρμογή της Prony μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του FFT, κυρίως για τις Α/Γ με μετατροπείς PWM που βασίζονται σε φέρον σήμα. Για Α/Γ με μετατροπείς που διαθέτουν έλεγχο υστέρησης η αποτελεσματικότητα της δεν είναι δεδομένη, λόγω της διασποράς του φάσματος, η οποία δυσχεραίνει την επιτυχή σύγκλιση της μεθόδου. Ως αντιστάθμισμα, προτείνεται να εξεταστεί το ενδεχόμενο επιλογής μεγαλύτερων συχνοτήτων δειγματοληψίας από την τυπική των 51.2 kHz που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής κατά κόρον από τα μετρητικά εργαστήρια κατά τη διεξαγωγή αυτού του είδους μετρήσεων. Οι υψηλότερες συχνότητες, σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων, θα αύξαναν την πληροφορία και συνεπώς την ακρίβεια υπολογισμού των ανώτερων αρμονικών, με αντίστοιχο περιορισμό της επίδρασης του θορύβου στους υπολογισμούς.

- Η μέθοδος Hilbert-Huang μπορεί να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των διακυμάνσεων της θεμελιώδους συχνότητας και, υπό συνθήκες, των κυρίαρχων χαρακτηριστικών αρμονικών τάσης ή ρεύματος Α/Γ, ανεξάρτητα από το θεωρούμενο διάστημα ανάλυσης. Η ικανοποιητική ακρίβεια παρακολούθησης (tracking) της συχνότητας του δικτύου την καθιστά κατάλληλη για την επεξεργασία μετρήσεων που έχουν ληφθεί χωρίς τη χρήση PLL, ιδιαίτερα σε αυτόνομα ασθενή δίκτυα, όπου η αναμενόμενη φασματική διαρροή από τον FFT είναι σημαντική. Ταυτόχρονα, λόγω της, έστω και

περιορισμένης, δυνατότητας παρακολούθησης των διακυμάνσεων των χαρακτηριστικών αρμονικών χαμηλής τάξης (π.χ. 5^{ης} και 7^{ης}) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παράλληλα με τον FFT, όταν υπάρχει υπόνοια για αξιοσημείωτες διακυμάνσεις του πλάτους των συγκεκριμένων συχνοτήτων, η οποία θα μπορούσε να θέσει υπό αμφισβήτηση τη συμβατότητα με τα υφιστάμενα όρια.

- Ο μετασχηματισμός Wavelet ορθώς προτείνεται από το IEC 61000-4-7 ως εναλλακτικός του FFT στην προτεινόμενη μεθοδολογία αρμονικής ανάλυσης, με την αποτελεσματικότητά του να είναι καλύτερη κυρίως στις ανώτερες αρμονικές τάξεις, όπου το ενδιαφέρον μετατοπίζεται από τα πλάτη συγκεκριμένων αρμονικών τόνων σε πλάτη ζωνών συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η λογική του μετασχηματισμού είναι συμβατή με την «ενεργειακή» προσέγγιση στον υπολογισμό των αρμονικών που υποδεικνύεται από το πρότυπο, αλλά δεν μπορεί να διαχειριστεί κοντινές αρμονικές χαμηλών τάξεων.

6.2.3. Αξιολόγηση των εκπομπών αρμονικών διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών με μετατροπείς ισχύος

Σημαντικό μέρος της εργασίας επικεντρώθηκε στη συστηματική μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων Α/Γ μεταβλητών στροφών, η οποία βασίστηκε στην ανάλυση μετρήσεων που προήλθαν, ως επί το πλείστον, από εμπορικά μοντέλα. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Τα αρμονικά φάσματα των μοντέρνων Α/Γ μπορεί να εκτείνονται πέρα από τα 3 kHz, ανάλογα με τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε Α/Γ διαφορετικής σχεδιαστικής ηλικίας υποδηλώνουν την ολοένα αυξανόμενη προσοχή των κατασκευαστών στη σχεδίαση των μετατροπέων ισχύος και του ελέγχου τους και στην εγκατάσταση αποδοτικότερων φίλτρων για τον περιορισμό των κρίσιμων αρμονικών συχνοτήτων. Είναι ωστόσο εμφανές ότι, παρόλο που οι ανώτερες αρμονικές αποκόπτονται αποτελεσματικά λόγω της λειτουργίας των βαθυπερατών φίλτρων, δεν ισχύει το ίδιο για τις αρμονικές χαμηλής τάξης, οι οποίες εξακολουθούν να κυριαρχούν στο φάσμα ακόμη και των νεώτερων Α/Γ μεγάλης ισχύος και πρέπει να αποτελούν αντικείμενο εξέτασης.
- Η συσχέτιση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος με το σημείο λειτουργίας των Α/Γ είναι μικρή. Για τις επιμέρους τάξεις αρμονικών ρευμάτων, ο κανόνας αυτός ισχύει κυρίως για τις ανώτερες συχνότητες, οι οποίες διαμορφώνονται από τον τρόπο λειτουργίας των μετατροπέων, ενώ για τις χαμηλές τάξεις εντοπίζεται ελαφρώς εντονότερη συσχέτιση ανάλογα με τον τύπο της Α/Γ και ενδεχομένως και τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο συνδέεται.
- Η ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης έδειξε ότι η αλληλουχία των ακολουθιακών συνιστωσών είναι σύμφωνη με τα θεωρητικά αναμενόμενα στις χαμηλές τάξεις αρμονικών, όχι όμως και στις ανώτερες όταν χρησιμοποιούνται μετατροπείς PWM.

6.2.4. Αξιολόγηση των εκπομπών αρμονικών από αιολικά πάρκα

Από την εξέταση των αρμονικών Α/Π που παρουσιάζεται στο Παράρτημα εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, ως συνέχεια των παρατηρήσεων για τις μεμονωμένες Α/Γ, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

- Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του συνολικού ρεύματος εξόδου του Α/Π που μετρήθηκε συμφωνούν με τη θεωρητική αναγωγή από το ρεύμα της μίας Α/Γ, που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια διαδοχικών προσομοιώσεων Monte Carlo. Συγκεκριμένα, τα αρμονικά ρεύματα του Α/Π ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, όπως υπολογίστηκε και θεωρητικά. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και για τη συμπεριφορά των φασικών γωνιών. Παρ' όλα αυτά, το ενδεχόμενο ο κανόνας άθροισης του IEC 61000-3-6 για τις ανώτερες αρμονικές να υποεκτιμά το συνολικό αρμονικό ρεύμα, δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί στην πράξη, καθώς απαιτεί τη διενέργεια ταυτοχρονισμένων μετρήσεων στην έξοδο του Α/Π και σε επιμέρους Α/Γ, γεγονός που δεν κατέστη εφικτό κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής. Συνάγεται ωστόσο ότι η θέσπιση διαδικασίας μέτρησης των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος εξόδου των Α/Π ενδείκνυται να συμπεριληφθεί στο θεσμικό πλαίσιο αδειοδότησης των Α/Π, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις Α/Π, των οποίων οι Α/Γ απέχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, οπότε μεσολαβούν σημαντικά μήκη καλωδίων, οι χωρητικότητες των οποίων μπορεί να επηρεάσουν τη συνολική αρμονική απόκριση του πάρκου.

- Το ζήτημα του επιμερισμού ευθύνης για την αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου στους επιμέρους χρήστες δεν έχει τεθεί προς το παρόν στη χώρα μας, εφαρμόζεται όμως ήδη σε κάποιες χώρες, όπου επιβάλλονται κυρώσεις σε περίπτωση που κάποια πηγή αρμονικών υπερβαίνει τα επιβαλλόμενα όρια. Από τις μεθοδολογίες απόδοσης ευθύνης που προτείνονται στη βιβλιογραφία και εξετάστηκαν, αξιοποιώντας στοιχεία από τις διαθέσιμες μετρήσεις, δεν προτείνεται κάποια ως περισσότερο αξιόπιστη. Πιο συχνά συναντάται η μέθοδος της κατεύθυνσης της ενεργού ισχύος για κάθε αρμονική συνιστώσα. Δεδομένου πάντως ότι η αρμονική συμπεριφορά της εκάστοτε Α/Γ επηρεάζεται σημαντικά από την υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση του συγκεκριμένου δικτύου στο οποίο συνδέεται, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της σκοπιμότητας και δυνατότητας ενσωμάτωσης κάποιας από τις διαδικασίες που ελέγχθηκαν στο συνολικό πλαίσιο αξιολόγησης των αρμονικών εκπομπών.

6.3. Πρωτοτυπία και προαγωγή της επιστήμης

Οι κύριοι άξονες πρωτοτυπίας της διατριβής αφορούν τη συνεισφορά της παρούσας εργασίας στο πεδίο της ανάλυσης αρμονικών εκπομπών Α/Γ και είναι οι ακόλουθοι:

- Πραγματοποιείται συστηματική μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών και ποιοτική αξιολόγηση των αρμονικών Α/Γ διαφόρων τεχνολογιών που είναι διαθέσιμες στην αγορά. Πολλά από τα θέματα που διερευνήθηκαν και περιλήφθηκαν σε σχετική δημοσίευση, όπως η εξάρτηση των αρμονικών κάθε τάξης από την ισχύ εξόδου των Α/Γ, ο υπολογισμός των φασικών γωνιών και η ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών, έχουν αποτελέσει αναφορά για πολλές μεταγενέστερες σχετικές δημοσιεύσεις.
- Παρουσιάζεται διερεύνηση μεθόδων φασματικής ανάλυσης σημάτων Α/Γ, εναλλακτικών του FFT, η οποία είναι ευρύτερη και συστηματικότερη σε σχέση με την πλειονότητα των διαθέσιμων δημοσιεύσεων. Επίσης, πραγματοποιείται για πρώτη φορά εφαρμογή των μεθόδων Wavelets, Prony και Hilbert-Huang σε πραγματικές μετρήσεις Α/Γ.
- Η ανάλυση μετρήσεων στην έξοδο πραγματικού Α/Π με χρήση παρόμοιας μεθοδολογίας όπως για τις μεμονωμένες Α/Γ αποτελεί επίσης σημείο καινοτομίας της εργασίας, το οποίο έδωσε το έναυσμα για μεταγενέστερες δημοσιεύσεις πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τα συμπεράσματα της διατριβής διαφωτίζουν σε σημαντικό βαθμό την αποτελεσματικότητα και τις αδυναμίες του FFT στην ανάλυση μη στάσιμων σημάτων, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθοδολογίας εκτίμησης αρμονικών που προτείνεται στο πρότυπο IEC 61000-4-7 και υιοθετείται στις μετρήσεις αρμονικών των Α/Γ, προτείνοντας συγκεκριμένες βελτιώσεις σε επιμέρους σημεία. Επιπρόσθετα, η παρούσα διατριβή προσφέρει μια ολοκληρωμένη μελέτη των πιο σημαντικών μεθόδων επεξεργασίας σήματος που εφαρμόζονται στα ΣΗΕ, συνδυασμένη με την υλοποίηση κατάλληλων αλγορίθμων, προσαρμοσμένων στις ανάγκες σημάτων Α/Γ, που μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

6.4. Προεκτάσεις

6.4.1. Χρήση παραμετρικών μεθόδων για την ανάλυση αρμονικών

Η σταδιακή μεταβολή των αρμονικών χαρακτηριστικών του εξοπλισμού που συνδέεται στα δίκτυα τα τελευταία χρόνια έχει αναδείξει σημαντικές αδυναμίες του FFT, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κόρον μέχρι στιγμής στα ΣΗΕ. Θέματα που δεν αντιμετωπίζονται αποδοτικά είναι οι συνεχείς διακυμάνσεις των αρμονικών σε πλάτος και σε συχνότητα, η εμφάνιση ενδιάμεσων αρμονικών σημαντικού πλάτους καθώς και η μετατόπιση του ενδιαφέροντος στις ανώτερες συχνότητες (> 2 kHz). Από την παρούσα εργασία προέκυψε ότι η χρήση παραμετρικών μεθόδων, όπως η Prony, μπορεί να προσφέρει περισσότερα εργαλεία στους μελετητές, όσον αφορά την παρακολούθηση μεταβατικών διαταραχών των αρμονικών, τον ακριβή εντοπισμό ενδιάμεσων αρμονικών και το διαχωρισμό πολύ κοντινών συχνοτήτων. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι η εμπειρία από τη χρήση τους είναι αρκετά περιορισμένη, εμφανίζεται εκτεταμένο πεδίο περαιτέρω έρευνας σε αρκετά θέματα, όπως ενδεικτικά:

- Βελτιστοποίηση της μεθόδου Prony

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν εξετάστηκαν θέματα όπως η βελτιστοποίηση της ταχύτητας της μεθόδου, η αντιμετώπιση του θορύβου, η επιλογή κατάλληλου μήκους χρονικού παραθύρου, η επίδραση της συχνότητας δειγματοληψίας κ.ά., τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελέτης, καθώς

εκτιμάται ότι μπορούν να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο την αποτελεσματικότητα και την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου. Επίσης, η χρήση της Prony μπορεί να επεκταθεί για τη διερεύνηση των φασικών γωνιών.

- *Μελέτη άλλων μη παραμετρικών μεθόδων*

Εκτός από τη μέθοδο Prony, υποψήφιες για χρήση στις Α/Γ μπορεί επίσης να είναι η μέθοδος ESPRIT, τα φίλτρα Kalman και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Και οι τρεις αυτές μέθοδοι, με βάση τις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις, εμφανίζονται ενδιαφέρουσες και ανταγωνιστικές της Prony για τη φασματική ανάλυση σημάτων στα ΣΗΕ.

6.4.2. Εκτίμηση αρμονικών αιολικών πάρκων

Λόγω έλλειψης των αναγκαίων μετρητικών δεδομένων, η πλήρης διερεύνηση του ζητήματος της συμβολής των αρμονικών ρευμάτων των επιμέρους Α/Γ στη διαμόρφωση του συνολικού ρεύματος των Α/Π δεν κατέστη εφικτή στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Θεωρούμε ιδιαίτερα σημαντικό τον έλεγχο και την επιβεβαίωση του μοντέλου άθροισης που προτείνουν οι ισχύοντες κανονισμοί ή την ανάπτυξη άλλων κανόνων, καταλληλότερων για τις ιδιαιτερότητες των Α/Π. Παράλληλα, ανοιχτό παρέμεινε το ζήτημα του επιμερισμού της ευθύνης για την αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου, καθώς οι μεθοδολογίες που εξετάστηκαν δεν έδωσαν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Η ανάπτυξη εναλλακτικών μεθοδολογιών, κατάλληλων για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Α/Γ (λειτουργία σε όλο το εύρος ισχύος, έγχυση αρμονικών > 2 kHz κ.ά.), μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω μελέτης.

6.4.3. Έρευνα των αρμονικών στην περιοχή άνω των 9 kHz

Ενδιαφέρον πεδίο έρευνας αποτελεί και η μελέτη των αρμονικών στην περιοχή άνω των 9 kHz, δεδομένης της μετατόπισης των διακοπτικών συχνοτήτων των μετατροπέων προς υψηλότερες συχνότητες, ιδίως σε μικρότερης ισχύος μετατροπείς όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά. Η μελέτη αυτή μπορεί να συνδυαστεί με παράλληλη διερεύνηση των επιβαλλόμενων ορίων για την εξασφάλιση του επιπέδου «ατρωσίας» του εξοπλισμού. Από τεχνικής άποψης, οι συνθήκες είναι πλέον ώριμες, καθώς τα νέα μετρητικά συστήματα είναι σε θέση να πραγματοποιούν δειγματοληψίες σε συχνότητες άνω των 100 kHz.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Α.1 Μεθοδολογία άθροισης αρμονικών Α/Γ κατά IEC 61400-21

Η διαδικασία μέτρησης ποιότητας ισχύος του προτύπου IEC 61400-21, [14], επικεντρώνεται στη δοκιμή μεμονωμένων Α/Γ, συνήθως των πρωτότυπων μοντέλων, και καλύπτει το σύνολο των αντιγράφων τους. Η μέτρηση πραγματοποιείται στους ακροδέκτες (terminals) της υπό εξέταση Α/Γ, στην πλευρά ΧΤ ή ΜΤ του μετασχηματιστή. Από την άλλη πλευρά, η γνώση των αρμονικών του συνολικού ρεύματος εξόδου των αιολικών πάρκων είναι σημαντική καθώς παρέχει τη δυνατότητα άμεσης αξιολόγησης εάν βρίσκονται εντός των προβλεπόμενων ορίων αρμονικής παραμόρφωσης σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου που συνήθως είναι το ΣΚΣ, [16], [82]. Η λήψη αυτής της πληροφορίας μπορεί να γίνει είτε με μετρήσεις αρμονικών ρευμάτων στην έξοδο των Α/Π ή μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας για την άθροιση των επιμέρους ρευμάτων των μεμονωμένων Α/Γ. Όσον αφορά την πρώτη επιλογή, δεν υπάρχει, τουλάχιστον στην ισχύουσα έκδοση του προτύπου, απαίτηση για μετρήσεις στην έξοδο αιολικών πάρκων. Ο προφανής λόγος είναι ότι η έκδοση πιστοποιητικού μετρήσεων ποιότητας ισχύος για Α/Π, θα απαιτούσε οι μετρήσεις να επαναλαμβάνονται σε κάθε νέο Α/Π και μάλιστα μετά την ηλεκτροδότηση των Α/Γ από τον Διαχειριστή του Δικτύου, γεγονός που θα αύξανε το κόστος της επένδυσης και τον κίνδυνο να διαπιστωθεί εκ των υστέρων ότι δεν τηρούνται τα όρια αρμονικής παραμόρφωσης χωρίς να έχουν ληφθεί έγκαιρα τα αναγκαία προληπτικά μέτρα. Ως μοναδική εναλλακτική λύση για την εκτίμηση του συνολικού αρμονικού ρεύματος των Α/Π, το IEC 61400-21 υιοθετεί τον κανόνα άθροισης αρμονικών συνιστωσών του προτύπου IEC 61000-3-6 με βάση τον οποίο το αρμονικό ρεύμα ενός Α/Π υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I_h = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{WT}} \left(\frac{I_{h,k}}{n_k} \right)^a} \quad (\text{A.1})$$

όπου:

- N_{WT} είναι ο αριθμός των Α/Γ του Α/Π
- I_h η συνολική αρμονική του πάρκου τάξης h στο ΣΚΣ
- $I_{h,k}$ η αρμονική ρεύματος τάξης h από την k -στη Α/Γ
- n_k ο λόγος του μετασχηματιστή της k -στης Α/Γ

Ο εκθέτης a παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

- $\alpha=1.0$ για $h<5$
- $\alpha=1.4$ για $5 \leq h \leq 10$
- $\alpha=2$ για $h>10$

Οι παραπάνω τιμές του εκθέτη εκφράζουν το γεγονός ότι οι επιμέρους αρμονικές συνιστώσες έχουν την τάση να είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους στις υψηλές συχνότητες, οπότε το συνολικό αρμονικό ρεύμα αναμένεται να είναι μικρότερο από το αλγεβρικό τους άθροισμα. Προφανώς, η υπόθεση αυτή δεν είναι εύκολο να επιβεβαιωθεί από τα πιστοποιητικά ποιότητας ισχύος των Α/Γ, καθώς αυτά αναφέρονται σε μεμονωμένες Α/Γ και όχι στο σύνολο του πάρκου. Σημειώνεται, η εξίσωση Α.1 δεν λαμβάνει υπόψη τη χρήση μετασχηματιστών με συνδεσμολογίες, οι οποίες διακόπτουν το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας (π.χ. τριγώνου-αστέρα) και επομένως «πνίγουν» ορισμένες αρμονικές. Η παρατήρηση αυτή δεν ισχύει στην περίπτωση μετρήσεων απευθείας στη Μέση Τάση, όπου προφανώς λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του μετασχηματιστή της Α/Γ.

Α.2 Θεωρητική ανάλυση αρμονικών αιολικών πάρκων

Η μελέτη των αρμονικών Α/Γ που πραγματοποιήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, ανέδειξε τα στοχαστικά χαρακτηριστικά του ρεύματος εξόδου των Α/Γ. Αυτό συνεπάγεται ότι για την εκτίμηση των αρμονικών του συνολικού ρεύματος ενός πάρκου καθώς και της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του συστήματος στο ΣΚΣ θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πιθανοτικές τεχνικές. Από την άλλη πλευρά, η μεθοδολογία άθροισης του προτύπου IEC 61400-21 βασίζεται σε κάποιες υποθέσεις, η οποίες είναι μεν λογικές αλλά όχι επαρκώς τεκμηριωμένες στη βιβλιογραφία από ικανό αριθμό μετρήσεων πεδίου

σε Α/Π. Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται μία σύντομη διερεύνηση του θέματος, αξιοποιώντας καταρχήν τα συμπεράσματα του 4^{ου} Κεφαλαίου για τις μεμονωμένες Α/Γ.

Το ζήτημα της άθροισης τυχαία μεταβαλλόμενων διανυσμάτων αρμονικών από πολλαπλά φορτία έχει απασχολήσει τη βιβλιογραφία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αρκετά πριν τη διείδυση των Α/Γ. Σχετικές μεθοδολογίες και τεχνικές παρουσιάζονται στις εργασίες [291]-[294] και στις επιμέρους αναφορές που περιλαμβάνονται σε αυτές. Η χρήση αναλυτικών εξισώσεων στην πιθανοτική ανάλυση παρόμοιων προβλημάτων είναι επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί πολλές παραδοχές για την εξεύρεση μοναδικών λύσεων, οι οποίες μάλιστα δεν είναι πάντα επαρκώς τεκμηριωμένες. Για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιείται η τεχνική *Monte Carlo* (MC), η οποία είναι μία ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνική για τη διαχείριση πιθανοτικών προβλημάτων. Η βασική ιδέα της τεχνικής είναι η χρήση τυχαίων αριθμών για τη μοντελοποίηση μίας διεργασίας και λειτουργεί πολύ αποδοτικά όταν οι πιθανότητες που τη διέπουν είναι γνωστές αλλά τα αποτελέσματα είναι δύσκολο να εξαχθούν σε αναλυτική μορφή.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των αρμονικών ρευμάτων μεμονωμένων Α/Γ χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε διαδοχικές προσομοιώσεις MC με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συνολική εκπομπή αρμονικών ρευμάτων Α/Π. Η μελέτη λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα στατιστικά χαρακτηριστικά που διαπιστώθηκαν για τα αρμονικά ρεύματα των Α/Γ:

- Τα μέτρα των επιμέρους αρμονικών συνιστωσών ρεύματος, ιδιαίτερα των υψηλών τάξεων αρμονικών, δεν εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας των Α/Γ.
- Τα αρμονικά ρεύματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του «κλασικού» FFT ακολουθούν την κανονική κατανομή στις χαμηλές συχνότητες, η οποία προσεγγίζει σταδιακά την κατανομή Rayleigh στις μεγαλύτερες συχνότητες.
- Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης σύμφωνα με το IEC 61000-4-7, τα αρμονικά ρεύματα ακολουθούν την κανονική κατανομή σε ολόκληρο των εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος (0-9 kHz).
- Στις χαμηλές συχνότητες η φασική γωνία των αρμονικών ρευμάτων έχει την τάση να είναι συγχρονισμένη με τη φάση της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης, ακολουθώντας κανονική κατανομή με πολύ μικρή διασπορά.
- Στις υψηλές συχνότητες, οι φασικές γωνίες των αρμονικών ρευμάτων διαμορφώνονται από τις διακοπτικές συχνότητες των μετατροπέων και ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή σε ολόκληρο τον κύκλο $[0,2\pi)$.

Με βάση τα παραπάνω, η εκτίμηση του συνολικού αρμονικού ρεύματος ενός Α/Π από τις επιμέρους εκπομπές αρμονικών των Α/Γ μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή της MC, θεωρώντας δύο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: Τα μέτρα των αρμονικών ρευμάτων ακολουθούν κατανομή Rayleigh, ενώ οι φασικές τους γωνίες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $[0,2\pi)$. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην άθροιση αρμονικών μεγάλης τάξης, οι οποίες έχουν προκύψει απευθείας από την εφαρμογή του FFT χωρίς ομαδοποίηση. Για να υπάρξει κοινή αναφορά για τη μετέπειτα μελέτη, η μέση τιμή των μέτρων όλων των τάξεων θεωρείται ίση με 1 α.μ., ενώ η διασπορά εκτιμάται κατάλληλα με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις.

Περίπτωση 2: Τα μέτρα των αρμονικών ρευμάτων ακολουθούν την κανονική κατανομή, ενώ οι φασικές γωνίες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $[0,2\pi)$. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί στην άθροιση των «ομαδοποιημένων» αρμονικών στις υψηλές συχνότητες. Λόγω της επίδρασης της ομαδοποίησης, στους υπολογισμούς θεωρείται μικρότερη τιμή για τη διασπορά των δειγμάτων.

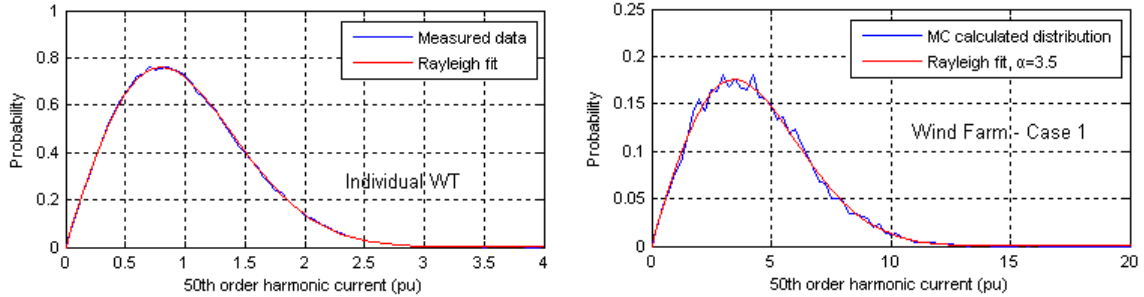
Και για τις δύο περιπτώσεις θεωρείται ενδεικτικός αριθμός 20 Α/Γ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση επικεντρώνεται στα αρμονικά ρεύματα υψηλής συχνότητας, όπου οι υπολογισμένες φασικές γωνίες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες. Στις χαμηλές συχνότητες, η κανονική κατανομή των φασικών γωνιών καθώς και η πολύ μεγάλη εξάρτηση από την τάση του δικτύου απαιτεί πιο σύνθετη προσέγγιση, η οποία δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα εργασία.

Στα Σχήματα Α1 και Α2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της τεχνικής MC για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιώντας ως βάση δεδομένων τη κατανομή των αρμονικών ρευμάτων Α/Γ υπολογισμένων σε χρονικό παράθυρο 0.2 s. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις

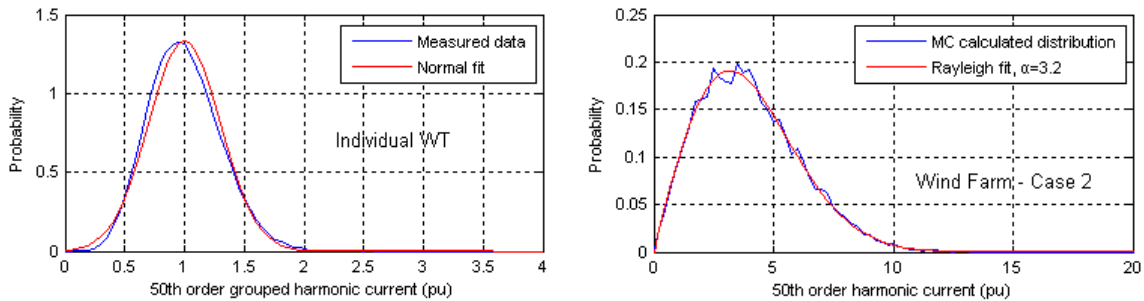
η κατανομή του συνολικού αρμονικού ρεύματος του πάρκου έχει τη μορφή της Rayleigh και περιγράφεται από τη γενική εξίσωση, [151]:

$$f(I) = \frac{I}{\alpha^2} e^{-\frac{I^2}{2\alpha^2}} \quad (A.2)$$

όπου α η παράμετρος της κατανομής.



Σχήμα A1. Εκτίμηση της στατιστικής κατανομής αρμονικών ρευμάτων 50^{ης} τάξης αιολικού πάρκου από τις πρωτογενείς αρμονικές ρεύματος των επιμέρους Α/Γ με χρήση τεχνικής Monte Carlo.



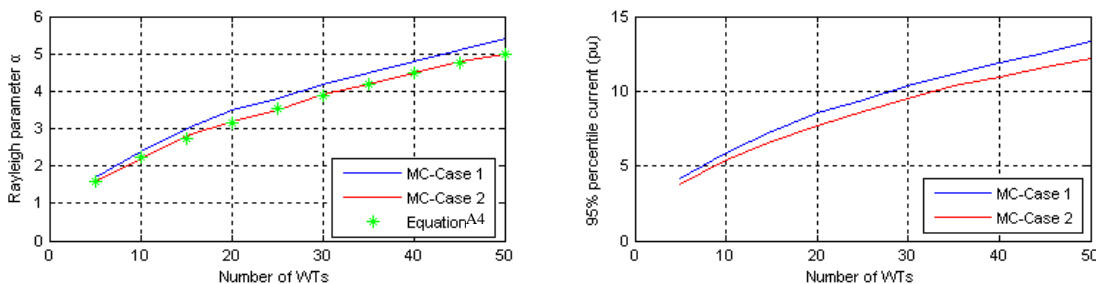
Σχήμα A2. Εκτίμηση της στατιστικής κατανομής αρμονικών ρευμάτων 50^{ης} τάξης αιολικού πάρκου από τις ομαδοποιημένες αρμονικές ρεύματος των επιμέρους Α/Γ με χρήση τεχνικής Monte Carlo.

Η μέση τιμή, η διασπορά και η επί τοις εκατό πιθανότητα μη υπέρβασης p συνδέονται με την παράμετρο α της κατανομής Rayleigh μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$E\{I\} = \alpha \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \sigma_1^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \alpha^2 \quad I_p = \alpha \sqrt{\ln \frac{1}{(1-p)^2}} \quad (A.3)$$

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της εργασίας [37], προκύπτει ότι η τιμή της παραμέτρου α αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των Α/Γ (Σχήμα A3). Στο Σχήμα A3 φαίνεται επίσης ότι η σχέση μεταξύ της παραμέτρου α της κατανομής Rayleigh και του αριθμού N_{WT} των Α/Γ που περιλαμβάνονται σε ένα Α/Π μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\alpha \cong \sqrt{N_{WT} / 2} \quad (A.4)$$



Σχήμα A3. Εκτίμηση της παραμέτρου κατανομής Rayleigh και του αρμονικού ρεύματος Α/Π με πιθανότητα μη υπέρβασης 95% ως συνάρτηση του αριθμού των Α/Γ.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση A.4, μπορούν στη συνέχεια να προκύψουν εύκολα τα πλήρη στατιστικά χαρακτηριστικά των αρμονικών ρευμάτων του Α/Π (μέση τιμή, διασπορά και η 95% πιθανότητα μη υπέρβασης) μέσω των σχέσεων A.3. Η τιμή 95% επιλέγεται επειδή αποτελεί κοινό όριο αναφοράς στα πρότυπα της σειράς IEC 61000. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον Πίνακα A.1 (εκφράζονται ως ανά μονάδα του μέγιστου αρμονικού ρεύματος της μεμονωμένης Α/Γ):

Πίνακας Α.1. Εκτίμηση βασικών στατιστικών δεικτών αρμονικού ρεύματος Α/Π με χρήση μεθοδολογίας Monte Carlo.			
Περίπτωση	Mean, \bar{I}	Variance, σ_I^2	p-percentile, I_p (e.g. p=0.95)
1 & 2	$\sqrt{\pi \cdot N_{WT}} / 4$	$(4 - \pi) \cdot N_{WT} / 4$	$\sqrt{-N_{WT} \cdot \ln(1-p)}$

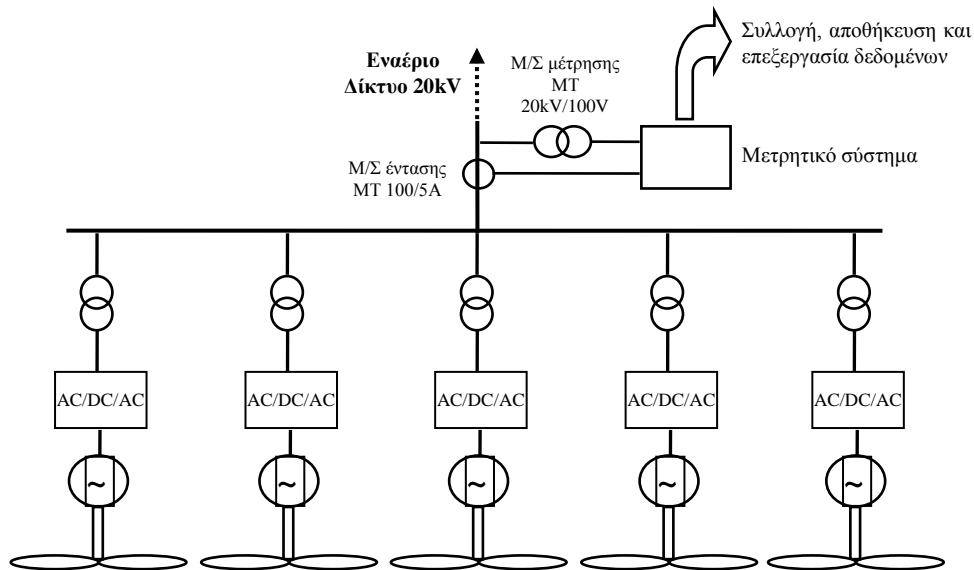
Αντικαθιστώντας $\ln(1-0.95) \cong -3$, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης MC οδηγούν σε τιμή αρμονικού ρεύματος με 95% πιθανότητα $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τον προτεινόμενο κανόνα άθροισης της IEC της εξίσωσης Α.1 για τις ανώτερες αρμονικές²⁶:

$$I_{WF, 95\%} \cong \sqrt{3N_{WT}} \quad (\text{A.5})$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα της θεωρητικής προσέγγισης αναδεικνύουν τη χρησιμότητα διεξαγωγής συστηματικών μετρήσεων σε αιολικά πάρκα ταυτόχρονα με μετρήσεις στις επιμέρους Α/Γ, γεγονός που δεν είναι τόσο εύκολο να πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες, δεδομένου και του γεγονότος ότι δεν προβλέπεται από το θεσμικό πλαίσιο. Παρόλα αυτά, μικρή συμβολή στη μελέτη των χαρακτηριστικών των αρμονικών Α/Π επιχειρείται με την ανάλυση μετρήσεων αρμονικών στο ΣΚΣ ενός Α/Π που περιλαμβάνεται στην επόμενη παράγραφο.

Α.3 Ανάλυση μετρήσεων αρμονικών αιολικού πάρκου

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται τα χαρακτηριστικά των αρμονικών ρεύματος στο ΣΚΣ ενός Α/Π αποτελούμενου από 5 Α/Γ μεταβλητών στροφών ονομαστικής ισχύος < 1 MW. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ΣΚΣ του πάρκου με το εναέριο δίκτυο ΜΤ δίκτυο 20 kV / 50 Hz, όπως εικονίζεται στο Σχήμα Α4, με χρήση παρόμοιου μετρητικού εξοπλισμού με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε και για τις μεμονωμένες Α/Γ, ο οποίος περιγράφεται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα Α4. Σχεδιάγραμμα του Α/Π με το σημείο μέτρησης ρεύματος και τάσης.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι ανάλογη με αυτή του Κεφαλαίου 4, καθώς ο βασικός στόχος είναι η εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων μεταξύ της αρμονικής συμπεριφοράς μεμονωμένων Α/Γ και ενός ενδεικτικού Α/Π. Συζητείται η στατιστική συμπεριφορά των αρμονικών ρευμάτων έως 9 kHz, εξάγοντας τις πιθανοτικές κατανομές του μέτρου και της φασικής γωνίας και παρατηρώντας την επίπτωση του διαστήματος υπολογισμού στη μέση τιμή και τη διασπορά των δειγμάτων. Άλλα σημαντικά θέματα που αναλύονται είναι η μεταβλητότητα των αρμονικών ρευμάτων ανάλογα με τη συνολική ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου, η επίπτωση της ομαδοποίησης σύμφωνα με το IEC 61000-4-7 στα μέτρα των αρμονικών και οι συμμετρικές συνιστώσες.

²⁶ Υπενθυμίζεται ότι για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών έχει θεωρηθεί υποθετική τιμή για τα μέτρα των αρμονικών όλων των τάξεων ίση με 1 αμ.

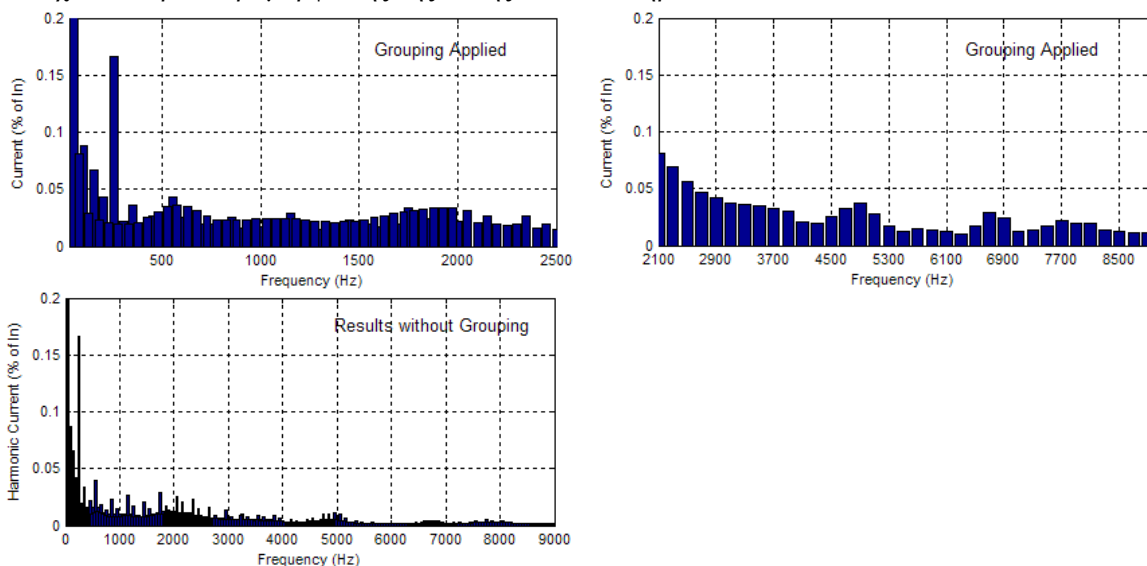
I. Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης

Το φάσμα αρμονικών ρεύματος του Α/Π που εξετάστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα Α5, για συχνότητες έως 9 kHz. Όπως ζητείται από το IEC 61400-21, εικονίζονται οι μέγιστες τιμές των μέσων τιμών δεκαλέπτου εκφραζόμενες επί τοις εκατό του ονομαστικού ρεύματος του πάρκου. Επιπρόσθετα, για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με το IEC 61000-4-7, ο υπολογισμός του μέτρου των αρμονικών πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της ομαδοποίησης (grouping). Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα αρμονικών χωρίς ομαδοποίηση προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αρχική μορφή του φάσματος σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Τέλος στο εικονιζόμενο φάσμα συμπεριλαμβάνονται και οι ενδιάμεσες αρμονικές ρεύματος έως τα 1975 Hz με ομαδοποίηση και έως 9 kHz χωρίς ομαδοποίηση.

Τα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης που εικονίζονται στο Σχήμα Α5 είναι σχετικά χαμηλά σε σχέση με τα φάσματα των μεμονωμένων Α/Γ που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, γεγονός που αντικατοπτρίζει τις χαμηλές αρμονικές εκπομπές του συγκεκριμένου τύπου Α/Γ που περιλαμβάνεται στο εν λόγω Α/Π. Η διαπίστωση αυτή ωστόσο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω για τη λήψη συμπερασμάτων σχετικά με τη σχέση μεταξύ των αρμονικών του πάρκου και των επιμέρους Α/Γ καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες ταυτοχρονισμένες μετρήσεις από τουλάχιστον μία Α/Γ του πάρκου. Το βασικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι τα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης αλλά και των επιμέρους αρμονικών του εξεταζόμενου Α/Π βρίσκονται εντός των ορίων αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος που ορίζονται από το πρότυπο 519 της IEEE, [78], ανεξάρτητα από την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στο ΣΚΣ (η οποία δεν είναι γνωστή).

Από την άλλη πλευρά, η μορφή και το εύρος συχνοτήτων του αρμονικού φάσματος σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο ελέγχου των μετατροπέων κάθε Α/Γ καθώς και με τα φίλτρα αρμονικών που χρησιμοποιούνται. Σημαντική είναι η παρουσία αρμονικών χαμηλής τάξης (5^{ης}, 7^{ης}, 11^{ης} κ.λπ.), οι οποίες κυριαρχούν στο φάσμα. Η παρουσία τους οφείλεται σε υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση και ασυμμετρίες του δικτύου και πιθανώς στη λειτουργία των μονοφασικών βοηθητικών φορτίων του πάρκου. Στις υψηλές συχνότητες παρατηρείται διάχυση του φάσματος, γεγονός που παρατηρήθηκε και στην εξέταση μεμονωμένων Α/Γ στο Κεφάλαιο 4 και υποδηλώνει τη χρήση ελέγχου ρεύματος υστέρησης για τους μετατροπείς των Α/Γ του πάρκου. Επιπρόσθετα, το αρμονικό φάσμα του Α/Π περιλαμβάνει σημαντικές ενδιάμεσες αρμονικές, συγκρίσιμες με τις γειτονικές ακέραιες, γεγονός που υποδηλώνει επίσης ότι ο έλεγχος των μετατροπέων των Α/Γ γίνεται με τεχνική PWM χωρίς τη χρήση φέροντος σήματος.

Συμπερασματικά, οι αρμονικές εκπομπές του αιολικού πάρκου είναι χαμηλές. Παρόλα αυτά, είναι ενδεχόμενο να τεθούν θέματα ελέγχου συγκεκριμένων αρμονικών συχνοτήτων καθώς η υφιστάμενη αρμονική παραμόρφωση είναι αξιοσημείωτη σε μη ακέραιες, άρτιες και ανώτερες συχνότητες, όπου τα ισχύοντα όρια παραμόρφωσης της τάσης είναι αυστηρά, [16], [37], [82].



Σχήμα Α5. Φασματικό περιεχόμενο ρευμάτων εξόδου αιολικού πάρκου, υπολογισμένα με και χωρίς την εφαρμογή της ομαδοποίησης.

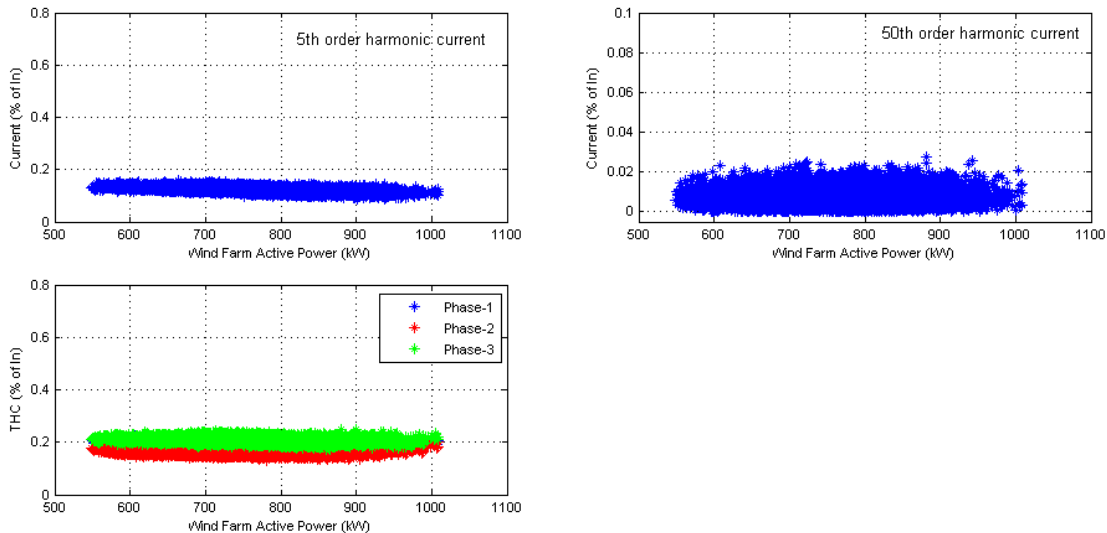
II. Εξάρτηση από την ισχύ εξόδου

Η γνώση της επίδρασης του σημείου λειτουργίας του Α/Π στο επίπεδο των εκπεμπόμενων αρμονικών είναι σημαντική για την πρόληψη ανεπιθύμητων καταστάσεων αρμονικών συντονισμού. Στο Σχήμα Α6 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} και 50^{ης} τάξης αλλά και ο συντελεστής συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος (THC), ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου του Α/Π. Ο THC ορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-21, ως εξής:

$$THC_{WP}(\%) = 100 \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} / I_n \right) \quad (A.6)$$

όπου I_h είναι η μεμονωμένη αρμονική ρεύματος και I_n το ονομαστικό ρεύμα του Α/Π. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται βασίζονται στα πρωτογενή αποτελέσματα της εφαρμογής του FFT σε χρονικό παράθυρο 0.2 s (10 κύκλων), χωρίς την εφαρμογή ομαδοποίησης (grouping).

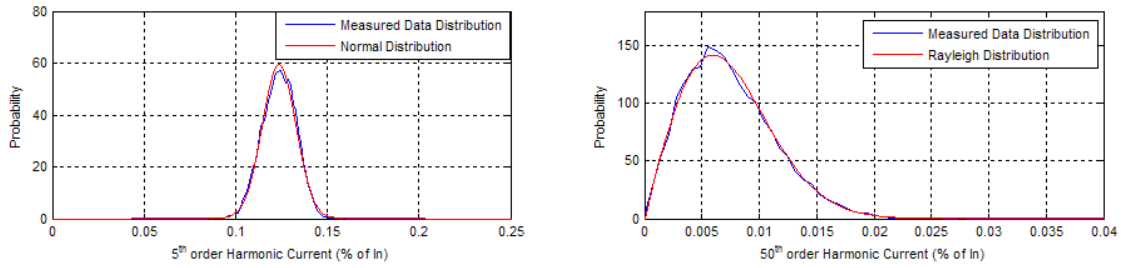
Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι οι επιμέρους αρμονικές καθώς και η συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες από το σημείο λειτουργίας του Α/Π. Μάλιστα, αυτό ισχύει σε μεγαλύτερο βαθμό όταν χρησιμοποιούνται χρόνοι υπολογισμού της μέσης τιμής μεγαλύτεροι των 10 κύκλων (π.χ. 3 s ή 10 min). Επομένως, η λειτουργία του Α/Π σε στοχαστικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου χαρακτηρίζεται από αρμονικές ρεύματος περίπου σταθερού πλάτους (σε απόλυτες τιμές ή ως ποσοστό (%) του I_n). Η τάση αυτή μάλιστα είναι περισσότερο χαρακτηριστική στην παρούσα περίπτωση σε σχέση με τις μεμονωμένες Α/Γ που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 4, γεγονός που συνδέεται με τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται από τους μετατροπείς PWM των συγκεκριμένων Α/Γ και ενδεχομένως στην επίδραση της άθροισης των αρμονικών ρευμάτων των επιμέρους Α/Γ.



Σχήμα Α6. Μεταβλητότητα των αρμονικών ρεύματος Α/Π με την ισχύ εξόδου.

III. Στατιστική ανάλυση

Στην προηγούμενη παράγραφο διαπιστώθηκε ότι, εφαρμόζοντας προσομοίωση Monte-Carlo σε πραγματικές μετρήσεις αρμονικών ρευμάτων Α/Γ, οι ανώτερες αρμονικές συχνότητες των ρευμάτων ενός Α/Π αναμένεται να ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση των πρωτογενών μετρήσεων στην έξοδο του Α/Π. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 για τις μεμονωμένες Α/Γ, υπολογίζονται η μέση τιμή και η διασπορά των μετρήσεων αρμονικών του Α/Π και οι πραγματικές κατανομές των δεδομένων προσεγγίζονται από γνωστές στατιστικές κατανομές, όπως η Κανονική ή η Weibull. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Α7, οι χαμηλές τάξεις συχνοτήτων (έως 10¹ τάξη) εμφανίζουν σχεδόν τέλεια κανονική κατανομή, η οποία παίρνει τη μορφή Weibull στις μεγαλύτερες τάξεις και καταλήγει να προσεγγίζει τη Rayleigh σε συχνότητες γύρω από την 50¹ τάξη. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας το βασικό χρονικό παράθυρο των 10 κύκλων (0.2 s), όπως υποδεικνύεται από το IEC 61000-4-7, χωρίς ωστόσο την εφαρμογή της ομαδοποίησης στο συγκεκριμένο στάδιο, προκειμένου να τονιστούν τα πρωτογενή στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων, όπως προκύπτουν απευθείας από την εφαρμογή του FFT.

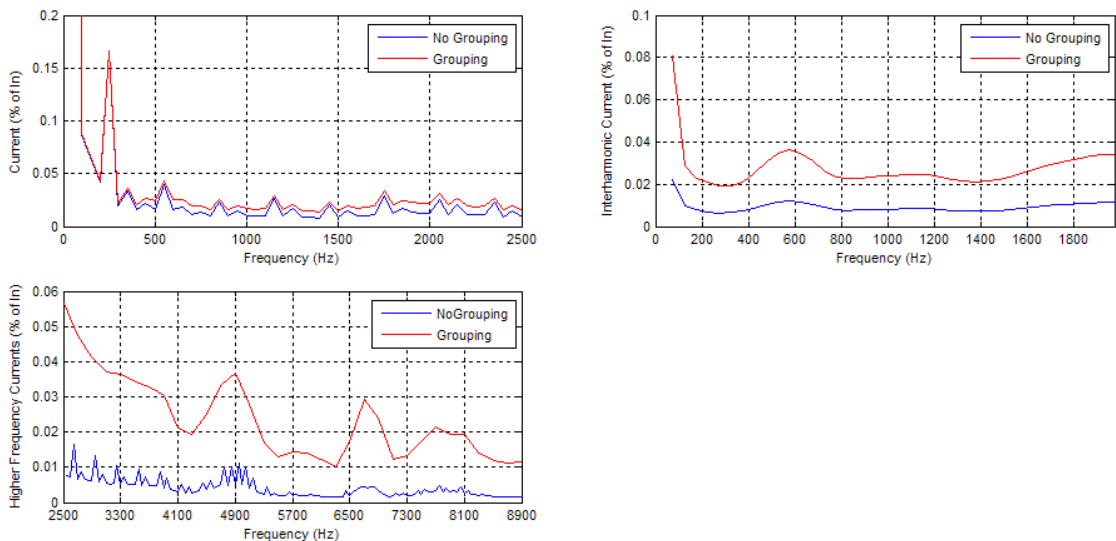


Σχήμα Α7. Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των αρμονικών ρευμάτων 5^{ης} και 50^{ης} τάξης Α/Π.

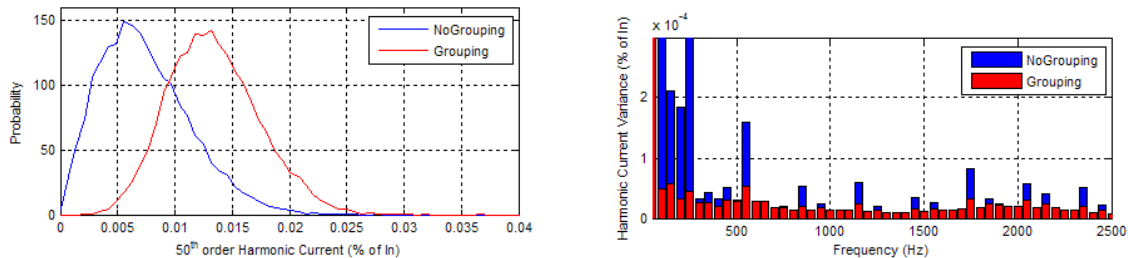
Η εφαρμογή της ομαδοποίησης έχει ουσιαστική επίδραση στα στατιστικά χαρακτηριστικά των αρμονικών ρεύματος, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

IV. Επίπτωση της ομαδοποίησης σύμφωνα με το IEC 61000-4-7

Όπως έχει ήδη τονιστεί στα προηγούμενα Κεφάλαια, η εφαρμογή του FFT σε μη στάσιμα σήματα, εισάγει σημαντικές αβεβαιότητες στην εκτίμηση του αρμονικού τους περιεχομένου, οι οποίες επιχειρείται να περιοριστούν από το IEC 61000-4-7 με τη χρήση της μεθοδολογίας της ομαδοποίησης. Η άμεση επίδραση της μεθοδολογίας είναι η αύξηση του πλάτους των επιμέρους «ομαδοποιημένων» αρμονικών συνιστωσών σε σχέση με τις πρωτογενείς συνιστώσες, όπως αναλύθηκε με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 4 για τις μεμονωμένες Α/Γ. Αντίστοιχα, η εφαρμογή της ομαδοποίησης στις αρμονικές του ρεύματος εξόδου του εξεταζόμενου Α/Π οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα. Βασική αιτία είναι η αξιοσημείωτη φασματική διάχυση που παρατηρείται ιδιαίτερα στις ανώτερες συχνότητες. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα Α8, όπου συγκρίνονται οι μέγιστες τιμές των μέσων τιμών 10λέπτου της rms τιμής κάθε τάξης αρμονικής με και χωρίς την εφαρμογή της ομαδοποίησης. Παρόμοια συμπεράσματα με αυτά του Κεφαλαίου 4 εξάγονται και για τη στατιστική κατανομή και τη διασπορά των «ομαδοποιημένων» αρμονικών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Α9, η ομαδοποίηση έχει ως αποτέλεσμα η κατανομή των αρμονικών να προσεγγίζει πλέον την κανονική σε όλες τις συχνότητες, με ταυτόχρονη σημαντική μείωση της διασποράς.



Σχήμα Α8. Επίδραση της ομαδοποίησης (grouping) στο μέτρο των αρμονικών ρευμάτων Α/Π.

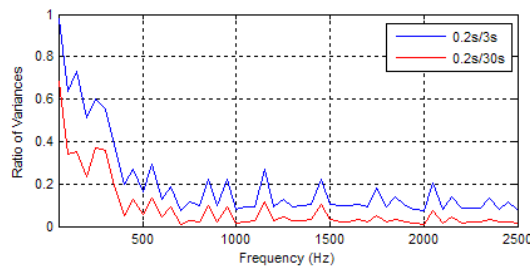


Σχήμα Α9. Επίδραση της ομαδοποίησης στη μορφή της κατανομής και τη διασπορά των αρμονικών ρευμάτων Α/Π.

Γενικά, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των «ομαδοποιημένων» τιμών είναι απαραίτητα κατά τον έλεγχο συμβατότητας με τα όρια αρμονικών εκπομπών, ιδιαίτερα σύμφωνα με το «πνεύμα» της σειράς IEC 61000 των προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, όπου η συμμόρφωση των αρμονικών εκπομπών αναφέρεται κυρίως στις τιμές που δεν υπερβαίνουν τα όρια με πιθανότητα 95%. Όσον αφορά τα θέματα της ακρίβειας της μεθόδου της ομαδοποίησης, ισχύουν οι διαπιστώσεις και οι εναλλακτικές προτάσεις των προηγούμενων Κεφαλαίων για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων.

V. Επίδραση του διαστήματος υπολογισμού της μέσης τιμής (time-averaging)

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάστηκε η επίδραση της επιλογής του χρόνου ολοκλήρωσης στα χαρακτηριστικά των αρμονικών συνιστωσών μεμονωμένων Α/Γ. Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, συμπεραίνεται ότι η τιμή του χρόνου ολοκλήρωσης δεν επηρεάζει τη μέση τιμή αλλά μειώνει τη διασπορά των αρμονικών. Αυτό απεικονίζεται καθαρά στο Σχήμα Α10, όπου παρουσιάζεται ο λόγος της διασποράς των αρμονικών συνιστωσών εκφρασμένων ως μέσες τιμές 3 s και 30 s σε σχέση με το βασικό σενάριο των 10 κύκλων (0.2 s), για συχνότητες έως 2.5 kHz.

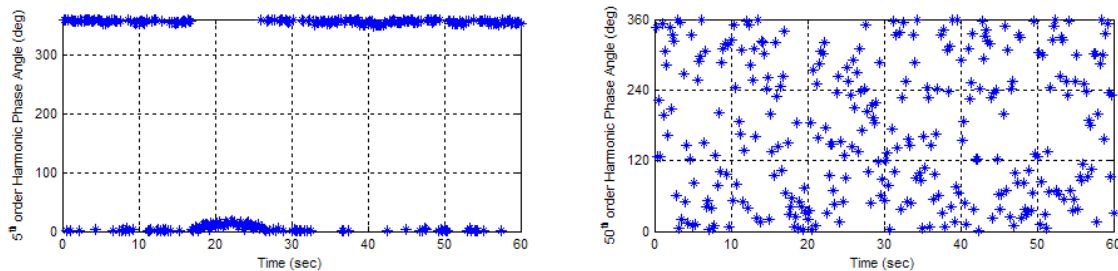


Σχήμα Α10. Επίδραση του χρόνου ολοκλήρωσης (time-averaging) στη διασπορά των αρμονικών ρευμάτων Α/Π

Άμεση συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι ότι οι μέγιστες τιμές των μετρημένων αρμονικών είναι σημαντικά μειωμένες όταν θεωρούνται μεγαλύτερα διαστήματα ολοκλήρωσης, καθώς η διαδικασία εύρεσης της μέσης τιμής «φιλτράρει» τις ακραίες τιμές 0.2 s. Η διαπίστωση αυτή είναι σημαντική κατά την αξιολόγηση της συμβατότητας με τη σειρά προτύπων IEC 61000, η οποία αναφέρεται σε τιμές αρμονικών εκφρασμένες ως μέσες τιμές 3 s. Γενικά πάντως, όπως ισχύει και για τις μεμονωμένες Α/Γ, όταν αναφέρονται οι αρμονικές εκπομπές ενός Α/Π θα πρέπει να δηλώνεται και ο αντίστοιχος χρόνος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό τους.

VI. Μεταβλητότητα φασικής γωνίας

Σε αντιστοιχία με τις μεμονωμένες Α/Γ, η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων ρεύματος Α/Π δείχνει ότι οι αρμονικές χαμηλής τάξης έχουν την τάση να είναι συγχρονισμένες με τη θεμελιώδη συνιστώσα της τάσης, ενώ στις υψηλές συχνότητες, όπου οι αρμονικές διαμορφώνονται από τον τρόπο ελέγχου των μετατροπέων, οι φασικές γωνίες κατανομούνται ομοιόμορφα σε ολόκληρο τον κύκλο $[0,2\pi]$. Ως παράδειγμα, στο Σχήμα Α11 εικονίζεται η διακύμανση της φασικής γωνίας της 5^{ης} και 50^{ης} τάξης του αρμονικού ρεύματος σε χρονικό παράθυρο 60 s (η θεμελιώδης τάση χρησιμοποιείται ως κοινή αναφορά για τις φασικές γωνίες όλων των αρμονικών).



Σχήμα Α11. Διακύμανση της φασικής γωνίας των αρμονικών ρεύματος Α/Π 5^{ης} και 50^{ης} τάξης σε χρονικό παράθυρο 60s.

VII. Ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών

Αξιοποιώντας την πληροφορία για τις φασικές γωνίες, η οποία εξάγεται άμεσα από τον FFT ταυτόχρονα με τα αντίστοιχα πλάτη των αρμονικών, μπορεί στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών, απαραίτητη για την αρμονική ανάλυση του δικτύου όπου συνδέεται το Α/Π. Η ανάλυση σε συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στα αρμονικά ρεύματα μεμονωμένων Α/Γ πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4. Το ιδιαίτερο

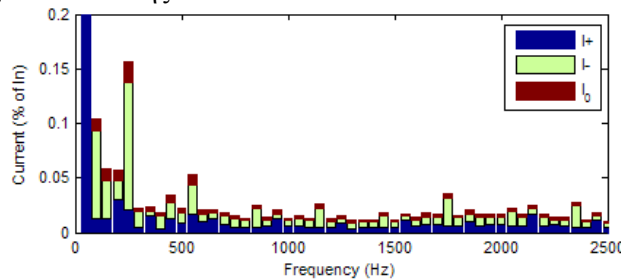
χαρακτηριστικό της ανάλυσης αυτής ήταν ότι η πλειοψηφία των μετρήσεων είχε πραγματοποιηθεί στην πλευρά ΧΤ των μετασχηματιστών των εξετασθέντων Α/Γ. Στην παρούσα περίπτωση, τα ρεύματα μετρήθηκαν στο ΣΚΣ του Α/Π, δηλαδή στην πλευρά ΜΤ (20kV) και συνεπώς αναμένονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα.

Ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών του Κεφαλαίου 4 εφαρμόστηκε και στην ανάλυση των ρευμάτων του Α/Π, για κάθε τάξη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{I}_a \\ \tilde{I}_b \\ \tilde{I}_c \end{bmatrix} \tag{A.7}$$

όπου $a = e^{j120^\circ}$.

Οι χαρακτηριστικές αρμονικές τάξης $3k-1$, $3k$ and $3k+1$ (k ακέραιος) είναι τυπικά αρνητικής, μηδενικής και θετικής ακολουθίας αντίστοιχα, [53]. Ο κανόνας αυτός ισχύει στις χαμηλές συχνότητες, όταν πρόκειται για αρμονικές που προέρχονται π.χ. από μετατροπείς μεταγωγής από το δίκτυο (line-commutated), αλλά όχι απαραίτητα στην περίπτωση μετατροπέων PWM που λειτουργούν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες. Οι διαπιστώσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από την ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων. Στο Σχήμα A12, παρουσιάζονται οι ακολουθιακές συνιστώσες του ρεύματος του Α/Π για όλες τις τάξεις αρμονικών μέχρι την 50^{th} (τα ρεύματα εκφράζονται ως επί τοις εκατό του ονομαστικού). Στις χαμηλές τάξεις τα χαρακτηριστικά των ακολουθιακών συνιστωσών είναι συμβατά με τα θεωρητικά αναμενόμενα. Στις υψηλότερες συχνότητες ωστόσο, οι περισσότερες αρμονικές έχουν την τάση να περιλαμβάνουν αμφοτέρως τις συνιστώσες θετικής και μηδενικής ακολουθίας. Παρόλο που το διάγραμμα εσωκλείει μόνο τις ακέραιες αρμονικές έως 2.5 kHz, παρόμοιες διαπιστώσεις ισχύουν και για τις μη ακέραιες και τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Ένα σημείο που χρήζει σχολιασμού είναι η εμφάνιση συνιστωσών μηδενικής ακολουθίας, γεγονός που δεν δικαιολογείται λόγω της παρεμβολής του μετασχηματιστή με συνδεσμολογία τριγώνου από την πλευρά της ΜΤ καθώς και από τη διάταξη του μετρητικού εξοπλισμού. Η παρουσία τους αποδίδεται σε σφάλματα μέτρησης και ανάλυσης.



Σχήμα A12. Συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής στα ρεύματα εξόδου Α/Π.

A.4 Διερεύνηση συμβολής αρμονικών ρευμάτων Α/Π στη διαμόρφωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης στο ΣΚΣ

Η πληροφορία που εξάγεται από την ανάλυση αρμονικών εκπομπών του Α/Π της προηγούμενης παραγράφου, πέρα από τη σύγκριση με τα υφιστάμενα όρια και τον έλεγχο της πιθανότητας εμφάνισης ανεπιθύμητων συντονισμών, μπορεί να αξιοποιηθεί και για τη μελέτη ενός ακόμη σημαντικού ζητήματος που αφορά στην απόδοση ευθύνης για την αρμονική «μόλυνση» του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό έχει αναδειχθεί ως σημαντικό τα τελευταία χρόνια λόγω του ολοένα αυξανόμενου αριθμού των φορτίων και μονάδων παραγωγής που βασίζονται στα ηλεκτρονικά ισχύος και επομένως διαχέουν αρμονικές προς το υπόλοιπο δίκτυο.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, συναντώνται αρκετές μέθοδοι για το διαχωρισμό της συνεισφοράς αρμονικών στο ΣΚΣ, οι περισσότερες από τις οποίες δίνουν αντικρουόμενα αποτελέσματα. Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιείται μία συνοπτική διερεύνηση των πιο σημαντικών μεθόδων και παρουσιάζονται αποτελέσματα της εφαρμογής τους στο Α/Π της προηγούμενης παραγράφου.

(i) *Κατεύθυνση της Ενεργού Ισχύος (Active Power Direction)*: Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο. Μετρώντας την αρμονική τάξη h της τάσης V_h και του ρεύματος I_h και τις αντίστοιχες

φασικές γωνίες ϕ_{V_h} και ϕ_{I_h} στο ΣΚΣ, υπολογίζεται η ενεργός ισχύς της αντίστοιχης τάξης h με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$P_h = V_h \cdot I_h \cdot \cos(\phi_{V_h} - \phi_{I_h}) \quad (\text{A.8})$$

Θεωρώντας θετική τη ροή της ισχύος από το δίκτυο προς το Α/Π²⁷, εάν $P_h > 0$, τότε το υφιστάμενο δίκτυο θεωρείται ως η κυρίαρχη αρμονική πηγή, ενώ αν $P_h < 0$ η αρμονική παραμόρφωση προέρχεται κυρίως από το χρήστη. Παρά την απλότητα στην εφαρμογή της, η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητες και ασάφειες, [295], [296], [297].

(ii) *Κατεύθυνση της Άεργου Ισχύος (Reactive Power Direction)*: Η μέθοδος αυτή προτείνεται στην αναφορά [295] για την αντιμετώπιση των αδυναμιών της προηγούμενης μεθόδου. Αντί της ενεργού ισχύος, υπολογίζεται η άεργος ισχύς τάξης h με παρόμοια διαδικασία. Εάν $Q_h > 0$, που σημαίνει ότι το δίκτυο απορροφά άεργο ισχύ από το Α/Π, τότε το Α/Π θεωρείται ως ο κύριος υπεύθυνος για την παραμόρφωση στο ΣΚΣ. Εάν $Q_h < 0$, δηλαδή το δίκτυο αποδίδει άεργο ισχύ προς το Α/Π, τότε δεν είναι ξεκάθαρο ποιος είναι ο υπεύθυνος και απαιτείται πιο λεπτομερής ανάλυση.

(iii) *Συμμορφούμενο – Μη Συμμορφούμενο Ρεύμα (Conforming – Nonconforming Current)*: Η μέθοδος αυτή που περιγράφεται στην αναφορά [298] βασίζεται αποκλειστικά σε μετρήσεις στο ΣΚΣ και περιλαμβάνει το διαχωρισμό του μετρούμενου ρεύματος σε δύο συνιστώσες: μία που ακολουθεί τη μορφή της κυματομορφής της τάσης (conforming current) και μία που ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στο πραγματικό ρεύμα και τη συμμορφούμενη συνιστώσα (non-conforming current):

$$I_{nc}(t) = I(t) - I_c(t) \quad (\text{A.9})$$

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η ύπαρξη μη συμμορφούμενης συνιστώσας ρεύματος υπονοεί ότι η αρμονική παραμόρφωση προέρχεται από το Α/Π.

(iv) *Πηγή Αρμονικού Ρεύματος/Τάσης*: Με αυτή τη μέθοδο [299] η πλευρά του Α/Π και του δικτύου παριστάνονται από τα ισοδύναμα κυκλώματα Norton ή Thevenin, για κάθε αρμονική τάξη, για την ανάλυση της αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος ή τάσης αντίστοιχα. Η πλευρά του Α/Π παριστάνεται από ένα αρμονικό ρεύμα I_c ή πηγή τάσης V_c και μία ισοδύναμη αρμονική σύνθετη αντίσταση Z_c . Με όμοιο τρόπο, η πλευρά του δικτύου παριστάνεται επίσης από τις πηγές ρεύματος ή τάσης I_u ή V_u και σύνθετη αντίσταση Z_u . Εάν $I_c > I_u$ (ή $V_c > V_u$, για την παραμόρφωση τάσης), τότε η αρμονική παραμόρφωση αποδίδεται στο Α/Π, διαφορετικά αποδίδεται στο δίκτυο. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η χρήση ισοδύναμων κυκλωμάτων Norton και Thevenin είναι ιδιαίτερα απλουστευμένη προσέγγιση οδηγώντας σε αντίστοιχη μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

(v) *Υπέρθωση Ρεύματος/Τάσης*: Σε αυτή την περίπτωση [299] εκτιμάται το αρμονικό ρεύμα ή η τάση, θεωρώντας μόνο μία εκ των δύο πηγών κάθε φορά και η συνεισφορά του Α/Π ή του δικτύου υπολογίζεται στη συνέχεια εφαρμόζοντας τη μέθοδο της υπέρθεσης. Η πλευρά με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην αρμονική παραμόρφωση για κάθε τάξη αρμονικής βρίσκεται συγκρίνοντας τα μέτρα των υπολογισμένων ρευμάτων (ή τάσεων). Η αδυναμία της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός ότι η εφαρμογή της υπέρθεσης προϋποθέτει γραμμικότητα, γεγονός που τις περισσότερες φορές δεν ισχύει.

(vi) *Βαθμωτή Υπέρθωση (Scalar Superposition)*: Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται στις αναφορές [299] και [300] ως επέκταση της μεθόδου (v) όπου η τάση και το ρεύμα είναι διανύσματα και δεν μπορούν να συγκριθούν απευθείας. Αντί αυτού, υπολογίζεται η προβολή των ρευμάτων του Α/Π και του δικτύου (I_{cs} and I_{us}) στη διεύθυνση του διανύσματος του συνολικού αρμονικού ρεύματος στο ΣΚΣ. Εάν η προβολή του I_{cs} είναι θετική και μεγαλύτερη από την προβολή του I_{us} , τότε κυριαρχεί η παραμόρφωση από την πλευρά του Α/Π, ενώ εάν η προβολή του I_{us} είναι θετική και μεγαλύτερη από αυτή του I_{cs} , η επικρατούσα παραμόρφωση οφείλεται στο δίκτυο. Εάν μία από τις δύο προβολές των ρευμάτων είναι αρνητική, αυτό σημαίνει ότι η αντίστοιχη πλευρά πρακτικά συμβάλει στη μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Παρά τη φαινομενική αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής, η εφαρμογή της στην πράξη παρουσιάζει δυσκολίες.

²⁷ Οι πρωτότυπες εκδόσεις των μεθόδων που παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο δεν αναφέρονταν σε αιολικά πάρκα, αλλά γενικά σε χρήστες του δικτύου. Για λόγους ομοιομορφίας με την εφαρμογή που ακολουθεί, χρησιμοποιείται ο όρος «Α/Π» αντί του όρου «χρήστης του δικτύου».

(vii) *Κρίσιμη Σύνθετη Αντίσταση (Critical Impedance)*: Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται μία κρίσιμη τιμή για τη σύνθετη αντίσταση Z_{cr} , ακολουθώντας τη μεθοδολογία της αναφοράς [301]. Η πραγματική τιμή Z της σύνθετης αντίστασης για κάθε αρμονική τάξη συγκρίνεται στη συνέχεια με την κρίσιμη τιμή για την αντίστοιχη τάξη. Εάν $|Z| < |Z_{cr}|$, η ευθύνη της αρμονικής παραμόρφωσης ανήκει στο Α/Π, διαφορετικά στο δίκτυο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην (iii) και συνεπώς ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις.

Εφαρμογή σε πραγματικό Α/Π

Θεωρώντας τις μετρήσεις του Α/Π της προηγούμενης παραγράφου παρέχεται η δυνατότητα ενδεικτικής διερεύνησης της αποτελεσματικότητας των παραπάνω μεθόδων. Η μέθοδος της ενεργού ισχύος (i) εφαρμόζεται άμεσα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης FFT του ρεύματος του Α/Π. Για την εφαρμογή των μεθόδων που χρησιμοποιούν τα ισοδύναμα κυκλώματα Norton και Thevenin, πραγματοποιούνται δικαιολογημένες υποθέσεις σχετικά με τις σύνθετες αντιστάσεις των μετασχηματιστών ΧΤ/ΜΤ των Α/Γ, της εναέριας γραμμής διανομής ΜΤ του πάρκου και του μετασχηματιστή ΜΤ/ΥΤ. Στον Πίνακα Α2 παρουσιάζονται αποτελέσματα της εφαρμογής για τις πιο δημοφιλείς από τις παραπάνω μεθόδους για επιλεγμένες χαμηλές και υψηλές συχνότητες.

Πίνακας Α.2. Σύγκριση μεθόδων απόδοσης ευθύνης για την αρμονική παραμόρφωση του δικτύου στο ΣΚΣ.

Τάξη Αρμονικής Ρεύματος	Μέθοδος Ενεργού Ισχύος (i)	Μέθοδος Άεργου Ισχύος (ii)	Πηγή αρμονικού ρεύματος (iv)	Υπέρθεση αρμονικού ρεύματος (v)	Πηγή αρμονικής τάσης (iv)	Υπέρθεση αρμονικής τάσης (v)
5 ^η	Α/Π	Α/Π	Δίκτυο	Α/Π	Α/Π	Δίκτυο
7 ^η	Δίκτυο	Δίκτυο	Δίκτυο	Α/Π	Α/Π	Δίκτυο
11 ^η	Α/Π	Α/Π	Δίκτυο	Δίκτυο	Δίκτυο	Δίκτυο
13 ^η	Δίκτυο	Α/Π	Δίκτυο	Α/Π	Α/Π	Δίκτυο
50 ^η	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π
100 ^η	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π	Α/Π

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα, η εφαρμογή των μεθόδων ενδέχεται να δώσει αντικρουόμενα αποτελέσματα ιδιαίτερα στις χαμηλές τάξεις αρμονικών, όπου όμως το ζήτημα της απόδοσης ευθύνης είναι κρισιμότερο. Η μέθοδος (v) για παράδειγμα αποδίδει την ευθύνη για σχεδόν όλες τις αρμονικές χαμηλής τάξης στο δίκτυο, αποτέλεσμα μάλλον αμφιλεγόμενο. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της μεθόδου της ενεργού ισχύος έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό θετικών και αρνητικών τιμών για την ίδια αρμονική τάξη, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας του Α/Π, στοιχείο που σίγουρα δημιουργεί ερωτηματικά για την αξιοπιστία της μεθόδου. Από την άλλη πλευρά, όλες οι μέθοδοι συγκλίνουν στις υψηλές συχνότητες (>2 kHz), αποδίδοντας την ευθύνη στο Α/Π, όπως είναι αναμενόμενο καθώς η υψίσυχη παραμόρφωση προκαλείται από τη διακοπτική λειτουργία των μετατροπέων ισχύος των Α/Γ.

Συνοψίζοντας, το θέμα του διαχωρισμού της αρμονικής συνεισφοράς στο ΣΚΣ είναι εξαιρετικά σημαντικό δεδομένης της αυξανόμενης αιολικής διείσδυσης Α/Γ μεταβλητών στροφών και της παράλληλης χρήσης συσκευών με ηλεκτρονικά ισχύος. Ο απαραίτητος περιορισμός της αρμονικής παραμόρφωσης για την εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ισχύος, εντός των ορίων που τίθενται από τα σχετικά πρότυπα, προϋποθέτει τον δίκαιο επιμερισμό της. Από τη σύντομη διερεύνηση του θέματος, που περιλαμβάνεται ως επίμετρο στην παρούσα διατριβή, δεν προκρίνεται κάποια μέθοδος που να διασφαλίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Μία βασική αιτία, πέρα από το ασθενές θεωρητικό υπόβαθρο κάποιων μεθόδων, είναι και η ανεπαρκής διαθεσιμότητα λεπτομερών και αξιόπιστων στοιχείων για την ακριβή μοντελοποίηση του Α/Π και του δικτύου. Επομένως το συγκεκριμένο θέμα είναι ανοικτό προς περαιτέρω διερεύνηση. Από την άλλη πλευρά, για την ορθή αξιολόγηση των αρμονικών εκπομπών των Α/Π, είναι απαραίτητο να υπάρχει μία εικόνα και για την υφιστάμενη παραμόρφωση του δικτύου, πριν τη λειτουργία τους. Για το λόγο αυτό, προς το παρόν η πρακτική προσέγγιση είναι η μέτρηση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης πριν και μετά τη σύνδεση του Α/Π στο δίκτυο, παρόλο που με τον τρόπο αυτό ενδέχεται να υπερτονιστεί η υπευθυνότητα των Α/Π, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εμφάνισης αρμονικών συντονισμών.

A.5 Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Βασικός σκοπός της διερεύνησης του παρόντος Παραρτήματος ήταν η αξιοποίηση της μεθοδολογίας και των συμπερασμάτων της μελέτης αρμονικών των μεμονωμένων Α/Γ που περιλαμβάνεται στο 4^ο Κεφάλαιο για την εκτίμηση του συνολικών αρμονικών εκπομπών των Α/Π. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποιώντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά μίας Α/Γ ενός πάρκου, το συνολικό ρεύμα στο ΣΚΣ μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά με τη βοήθεια διαδοχικών προσομοιώσεων *Monte Carlo*. Το τελικό αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι, ενώ για τις χαμηλές συχνότητες ο κανόνας άθροισης του IEC 61000-3-6 είναι ακριβής, στα υψηλές τάξεις αρμονικών ενδέχεται να υποεκτιμά το συνολικό ρεύμα του πάρκου με συνέπεια την πιθανή παραβίαση των αντίστοιχων ορίων.
- Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4^ο, αναδείχθηκαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ρεύματος εξόδου ενός Α/Π, που προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις στο ΣΚΣ. Τα βασικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις που θεωρήθηκαν για την κατάστρωση της μεθοδολογίας άθροισης, χωρίς ωστόσο να την επαληθεύουν.

Για την πλήρη επαλήθευση της μεθόδου απαιτείται η συστηματική μέτρηση ταυτόχρονα σε μία τουλάχιστον Α/Γ και στην έξοδο του πάρκου, γεγονός πρακτικά δύσκολο, κυρίως στο θέμα της εξασφάλισης επαρκούς χρηματοδότησης για τη συγκεκριμένη ερευνητική εκστρατεία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

B.1 Επιλογή σημείου μέτρησης

Οι μετρήσεις ποιότητας ισχύος μπορούν να πραγματοποιούνται στη χαμηλή ή τη μέση τάση, ανάλογα με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους της μηχανής, την πρόσβαση στο σημείο μέτρησης και τα διαθέσιμα όργανα. Η μέτρηση στη ΜΤ έχει σαφή πλεονεκτήματα, καθώς λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του Μ/Σ στη ροή αρμονικών προς το δίκτυο, εμφανίζει όμως αρκετές τεχνικές δυσκολίες, γεγονός που οδηγεί πολλές φορές στην επιλογή μέτρησης στη ΧΤ. Πιο συγκεκριμένα:

- Οι μετρήσεις αρμονικών έως 9 kHz, απαιτούν τη μέτρηση με δειγματοληψίες, θεωρητικά τουλάχιστον διπλάσιες αυτής της τιμής (>18 kHz). Πρακτικά, απαιτούνται δειγματοληψίες τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερες του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων, ενώ τα περισσότερα μετρητικά συστήματα ποιότητας ισχύος σε A/G δειγματοληπτούν με συχνότητες ≥ 51.2 kHz. Λόγω της μεγάλης δειγματοληψίας και του μεγάλου όγκου δεδομένων, τα μετρητικά συστήματα δεν εγκαθίστανται μόνιμα, αλλά μόνο για όσο διάστημα απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή πληρότητα των παραμέτρων ποιότητας ισχύος (και των αρμονικών) για όλο το εύρος της ισχύος εξόδου της A/G. Η εγκατάσταση του μετρητικού εξοπλισμού στη ΧΤ παρέχει ευελιξία στην εγκατάσταση/απεγκατάσταση, χωρίς να απαιτείται μεγάλη παρέμβαση στο ηλεκτρικό σύστημα (αποσύνδεση και επανασύνδεση καλωδίων A/G). Επιπρόσθετα, η μεγάλη ποικιλία οργάνων ΧΤ που κυκλοφορούν στην αγορά, παρέχει πολλές επιλογές που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ακρίβειας της μέτρησης χωρίς μεγάλη επιβάρυνση στο κόστος.
- Για τη μέγιστη αξιοπιστία των μετρήσεων και τον περιορισμό της αβεβαιότητας απαιτείται η χρήση διακριβωμένων οργάνων τάσης και έντασης για ολόκληρο το εύρος ισχύος και συχνοτήτων. Η διακρίβωση των οργάνων ΜΤ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ λίγα μετρολογικά εργαστήρια και είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Τα παραπάνω προβλήματα παρακάμπτονται έμμεσα με την πραγματοποίηση μετρήσεων μόνο του ρεύματος στη ΜΤ (το οποίο είναι και το ζητούμενο), ενώ η πληροφορία για την ισχύ εξόδου της μηχανής δίνεται από την ένδειξη της ΧΤ (με κάποια πρόσθετη αβεβαιότητα). Για τη μέτρηση αυτή οι «κλασικοί» Μ/Σ έντασης ΜΤ μπορούν να αντικατασταθούν από φορητούς Μ/Σ έντασης ΧΤ, π.χ. διαιρούμενου πυρήνα (split core), των οποίων η διακρίβωση και εγκατάσταση/απεγκατάσταση είναι σχετικά απλή διαδικασία. Η εγκατάσταση των Μ/Σ αυτών σε γυμνούς αγωγούς ΜΤ δεν είναι επιτρεπτή καθώς δεν καλύπτουν τις προδιαγραφές μόνωσης. Μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν στο μονωμένο αγωγό ΜΤ, αρκεί να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ρεύματος του μανδύα (επιδερμικό φαινόμενο), το οποίο έχει αντίθετη φορά από το ρεύμα εξόδου της ανεμογεννήτριας και αξιοσημείωτο μέγεθος.

B.2 Περιγραφή μετρητικού εξοπλισμού και λογισμικού ανάλυσης

Για τις μετρήσεις της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο μετρητικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από το ΚΑΠΕ και την Εταιρεία SYMMETRON και είναι συμβατό με τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7. Το σύστημα περιλαμβάνει τους αισθητήρες τάσης και έντασης, μονάδα επεξεργασίας σήματος, σύστημα συλλογής δεδομένων βασισμένο σε υπολογιστή και εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης εικονίζεται στο Σχήμα Β.1, [302], [303].

Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

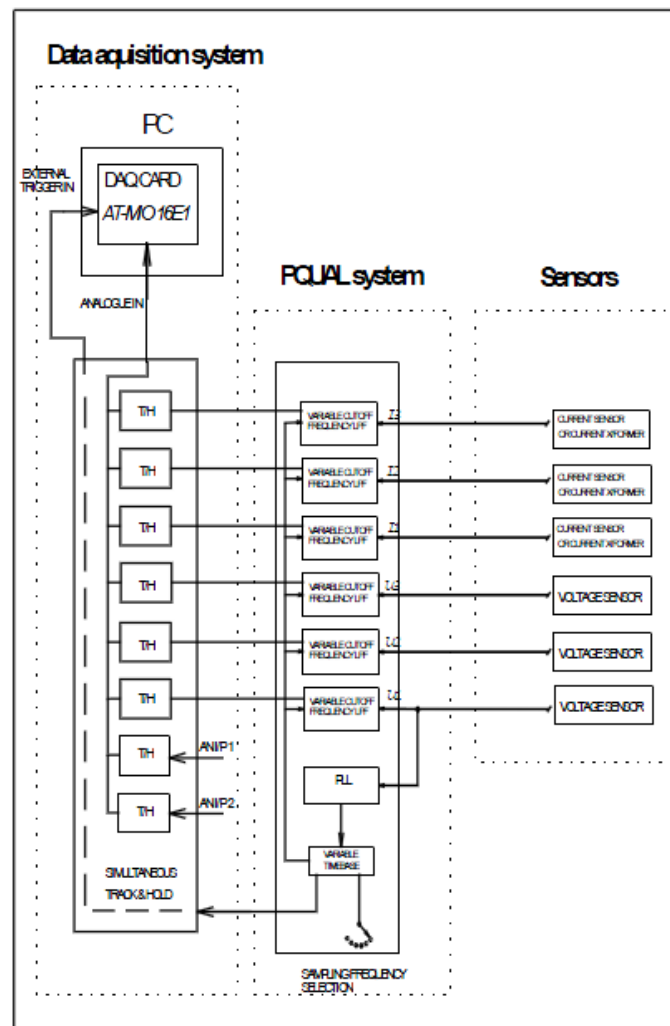
a. Αισθητήρες μέτρησης τάσης και ρεύματος

Το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται διαφέρει ανάλογα με το επίπεδο τάσης στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Για τις μετρήσεις στη ΧΤ, η μέτρηση του ρεύματος πραγματοποιείται με αμπεροτσιμπίδες (μία για κάθε φάση) κατάλληλου λόγου ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα της κάθε A/G και η μέτρηση τάσης με μορφοτροπείς (transducers) ονομαστικού μεγέθους κατάλληλου για τα επίπεδα χαμηλής τάσης που ενδιαφέρουν (συνήθως από 30 έως 1000 V).

Η διάμετρος του πυρήνα των αμπεροτσιμπήδων επιλέγεται ανάλογα με τη συνολική διατομή των καλωδίων κάθε φάσης της εξεταζόμενης Α/Γ. Γενικά πάντως, η πλέον τυπική είναι η χρήση ευέλικτου πυρήνα (flexible current clamp), η οποία επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων ακόμη και σε περιπτώσεις που η κάθε φάση περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό καλωδίων. Στις περιπτώσεις που οι μετρήσεις έγιναν στη ΜΤ, χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετοι Μ/Σ μέτρησης ΜΤ για τον υποβιβασμό της τάσης και του ρεύματος σε επίπεδα ΧΤ πριν τη χρήση του εξοπλισμού ΧΤ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η εγκατάσταση των οργάνων ΜΤ πραγματοποιήθηκε από τους κατασκευαστές των Α/Γ, λόγω του ότι απαιτούσε επέμβαση στο εσωτερικό της ηλεκτρικής εγκατάστασης της Α/Γ (ιδιαίτερα για την εγκατάσταση των Μ/Σ έντασης). Όλα τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν πληρούσαν τις προδιαγραφές ακρίβειας των προτύπων (0.5%–1%) και ήταν βαθμονομημένα από εξειδικευμένα εργαστήρια διακριβώσεων.

β. Μονάδα επεξεργασίας σημάτων

Είναι ειδικά προσαρμοσμένη για μετρήσεις ποιότητας ισχύος. Παρέχει προστασία από επικαλύψεις και δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων από όλα τα όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών (τρεις προγραμματιζόμενες μονάδες βαθυπερατών φίλτρων Butterworth 8ης τάξης για τη σύνδεση με τους Μ/Σ τάσης και τρεις αντίστοιχες μονάδες φίλτρων για τη σύνδεση με τους Μ/Σ έντασης). Επιπρόσθετα περιλαμβάνει μονάδα PLL, η οποία εξασφαλίζει το συγχρονισμό με τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz) παρέχοντας παράλληλα ψηφιοποίηση των σημάτων με συχνότητα δειγματοληψίας 2^n φορές τη συχνότητα του δικτύου, όπου n είναι ρυθμιζόμενη παράμετρος που επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο της δοκιμής ποιότητας ισχύος, όπως φαίνεται στον Πίνακα Β.1.



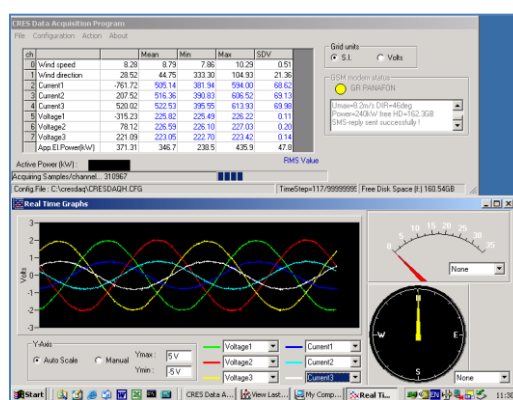
Σχήμα Β1. Διάγραμμα βαθμίδων του μετρητικού συστήματος ποιότητας ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις αρμονικών στα πλαίσια της διατριβής.

Πίνακας Β1. Επιλογή κατάλληλης συχνότητας δειγματοληψίας ανάλογα με τον τύπο της δοκιμής ποιότητας ισχύος.		
Όνομαστική συχνότητα δειγματοληψίας	Συχνότητα αποκοπής φίλτρων (Hz)	Τύπος δοκιμής ποιότητας ισχύος
3200Hz (50Hz x 64)	630	Flicker συνεχούς λειτουργίας
12800Hz (50Hz x 256)	2500	- Flicker και διακυμάνσεις τάσης κατά τη μεταβατική λειτουργία - Δοκιμές βύθισης τάσης - Ρυθμίσεις ενεργού και άεργου ισχύος
51200Hz (50Hz x 1024)	10000	Αρμονικές

γ. Το σύστημα συλλογής δεδομένων (Data Acquisition – DAQ)

Η συλλογή του απαιτούμενου αριθμού δεδομένων σύμφωνα με το IEC 61400-21 προϋποθέτει τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς την παρουσία προσωπικού, τη δυνατότητα επιλεκτικής συλλογής μετρήσεων ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καθώς και τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ενδεικτικά, για τις αρμονικές απαιτείται η λήψη τουλάχιστον τριών 10λεπτών δειγμάτων για το ρεύμα κάθε φάσης και για κάθε βαθμίδα ισχύος εύρους 10% της ονομαστικής (30 δείγματα), συχνότητας δειγματοληψίας 51.2 kHz.

Το σύστημα DAQ που χρησιμοποιήθηκε, συνδυάζει μια κάρτα ανάлого-ψηφιακού μετατροπέα (ανάλυσης 12 bit) ενσωματωμένη σε υπολογιστή, με μία κάρτα επικοινωνίας σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCI) εφοδιασμένη με ενισχυτές Track and Hold (T/H) για παράλληλη δειγματοληψία από πολλαπλά κανάλια, που ελέγχεται από H/Y βιομηχανικού τύπου, ώστε να είναι κατάλληλο για χρήση σε συνθήκες πεδίου (industrial PC). Για τη συνεχή καταγραφή δεδομένων, παρακολούθηση των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, παράλληλη επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων, έχει αναπτυχθεί στο ΚΑΠΕ ειδικό λογισμικό συλλογής δεδομένων (CRESDAQ), το οποίο έχει τη δυνατότητα διαχείρισης και αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων με συχνότητα δειγματοληψίας έως 51.2 kHz. Με τη βοήθεια του CRESDAQ είναι δυνατή η, εκ των προτέρων, ρύθμιση του μετρητικού συστήματος, ώστε να συλλέγει μόνο τον επιθυμητό αριθμό δεδομένων και να μην αποθηκεύει πρόσθετα δεδομένα, εφόσον ο αριθμός αυτός συμπληρωθεί. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας για την παρακολούθηση της εξέλιξης των μετρήσεων και, σε Α/Γ όπου υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο Internet, την ασύρματη συλλογή δεδομένων. Στο Σχήμα Β2, δίνεται φωτογραφία του μετρητικού συστήματος και στιγμιότυπο του λογισμικού συλλογής δεδομένων κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης.



Σχήμα Β2. Μετρητικό σύστημα ποιότητας ισχύος χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις αρμονικών στα πλαίσια της διατριβής (αριστερά) και στιγμιότυπο του λογισμικού συλλογής δεδομένων CRESDAQ (δεξιά).

δ. Λογισμικό ανάλυσης ποιότητας ισχύος

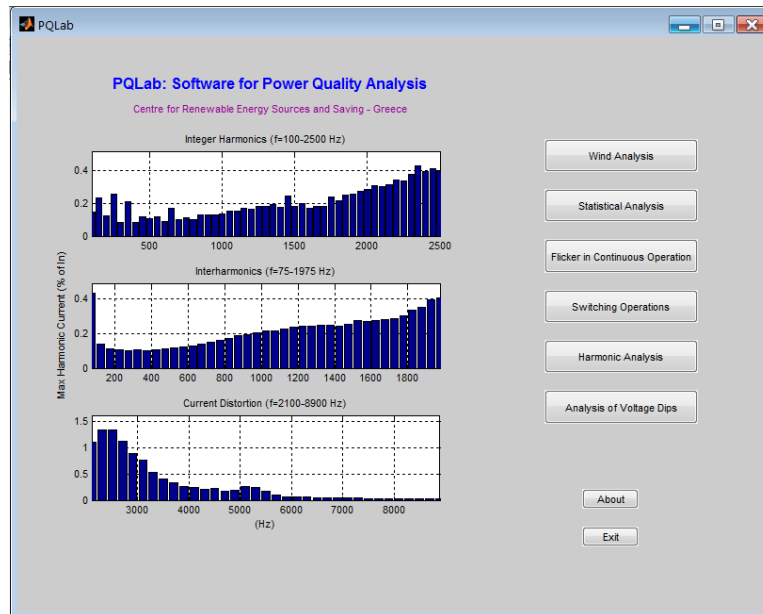
Για την επεξεργασία των μετρήσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61400-21 και IEC 61000-4-7, έχει αναπτυχθεί στο ΚΑΠΕ ειδικό λογισμικό (PQLab Software®)²⁸ υπολογισμού των

²⁸ Το πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί από το συγγραφέα.

παραμέτρων ποιότητας ισχύος μιας ανεμογεννήτριας (Σχήμα Β3). Το λογισμικό αυτό είναι αναπτυγμένο σε περιβάλλον Matlab και έχει πιστοποιηθεί μέσω σειράς διεργαστηριακών δοκιμών στα πλαίσια της ομάδας εργασίας ποιότητας ισχύος του δικτύου MEASNET. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού όλων των παραμέτρων ποιότητας ισχύος που προβλέπονται από το πρότυπο και πιο συγκεκριμένα:

- ενεργό και άεργο ισχύ κανονικής λειτουργίας για διάφορα χρονικά διαστήματα (ενδεικτικά 0.2 s, 1 min, 10 min)
- flicker κανονικής λειτουργίας
- flicker και διακυμάνσεις τάσης σε μεταβατικές καταστάσεις (σύνδεση, αποσύνδεση, εναλλαγή γεννητριών)
- ανάλυση αρμονικών (με και χωρίς ομαδοποίηση και για διάφορα διαστήματα υπολογισμού μέσης τιμής)
- ανάλυση δοκιμών βυθίσεως τάσης

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εφαρμογών αποθηκεύονται σε μορφή ASCII για μετέπειτα γραφική και πρόσθετη στατιστική επεξεργασία. Ειδικά για τις αρμονικές, τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν στις μέγιστες τιμές 10 min των αρμονικών των μετρούμενων ρευμάτων, που έχουν προκύψει με την εφαρμογή της ομαδοποίησης (σύμφωνα με το IEC 61000-4-7) αλλά και τις πρωτογενείς αρμονικές συνιστώσες (σε ξεχωριστό αρχείο) που προκύπτουν απευθείας από την εφαρμογή του FFT σε μετρούμενα ρεύματα.



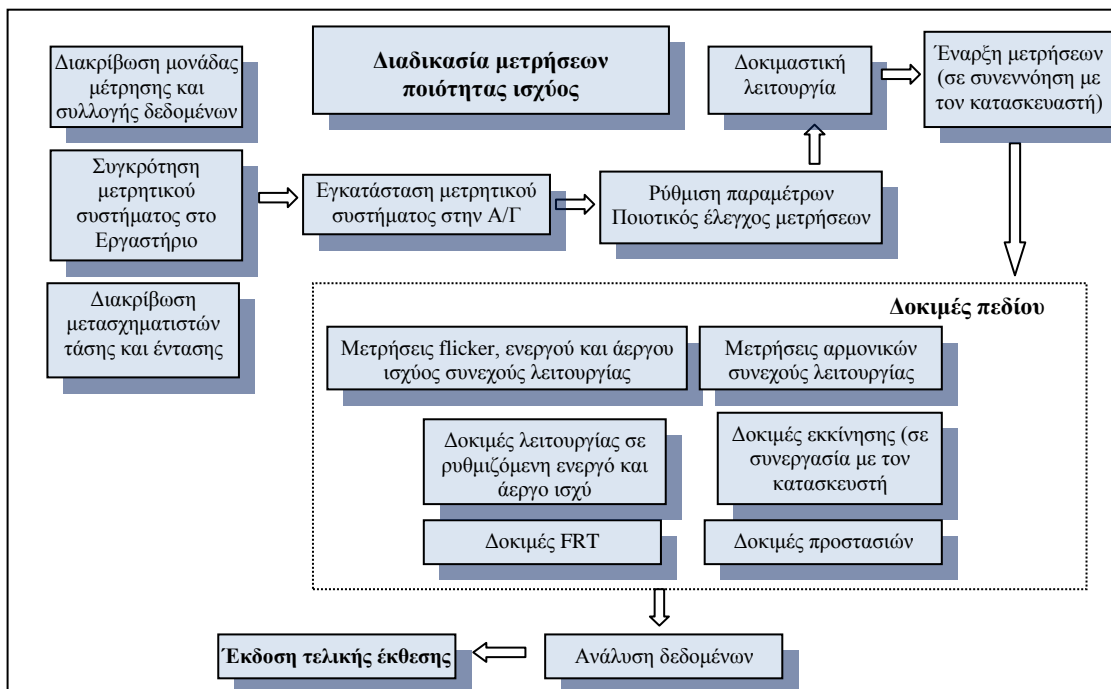
Σχήμα Β3. Στιγμιότυπο λογισμικού PQLab που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των μετρήσεων αρμονικών στα πλαίσια της διατριβής.

Συνοπτικά η διαδικασία δοκιμών μετρήσεων ποιότητας ισχύος αποτυπώνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος Β4.

Η διαδικασία ξεκινά με τη συγκρότηση του μετρητικού συστήματος στο εργαστήριο, κατά την οποία πραγματοποιείται η διακρίβωση των μετασχηματιστών έντασης (αμπεροτσιμπίδων) και τάσης και συνολική βαθμονόμηση γραμμής (line-calibration) με βάση την οποία υπολογίζονται οι απαιτούμενοι συντελεστές για κάθε κανάλι (πολλαπλασιαστές και σταθεροί όροι). Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την εγκατάσταση του μετρητικού συστήματος στους ακροδέκτες της υπό εξέταση Α/Γ (συνήθως μέσα στον πύργο της Α/Γ, είτε στην άτρακτο ή τη βάση), την εισαγωγή των συντελεστών και την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας μέσα από ένα σύντομο διάστημα δοκιμαστικής λειτουργίας. Οι επίσημες μετρήσεις ξεκινούν αφότου ο κατασκευαστής της Α/Γ δηλώσει ότι έχει οριστικοποιήσει τις ρυθμίσεις του συστήματος ελέγχου της Α/Γ και ότι δεν πρόκειται να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Η διάρκεια των μετρήσεων εξαρτάται κυρίως από τις ανεμολογικές συνθήκες, τη διαθεσιμότητα της Α/Γ και τη συνεργασία μεταξύ του κατασκευαστή και του μετρητικού εργαστηρίου. Για παράδειγμα, η συλλογή των απαιτούμενων μετρήσεων flicker,

προϋποθέτει τη λήψη κατ'ελάχιστον πέντε 10λεπτων δειγμάτων χρονοσειρών τάσης και ρεύματος για κάθε βαθμίδα ταχύτητας ανέμου από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας έως τα 15 m/s, διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει από μερικές ημέρες έως και εβδομάδες, εφόσον οι επικρατούσες συνθήκες ανέμου δεν είναι ευνοϊκές. Αντίστοιχη περίοδος χρειάζεται και για τις αρμονικές, ενώ για τις ειδικές δοκιμές εκκίνησης αλλά και FRT απαιτείται συνδυασμός ανεμολογικών συνθηκών και καλού συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η διάρκεια των μετρήσεων ποιότητας ισχύος χωρίς τις δοκιμές FRT διαρκούν τουλάχιστον 2 μήνες, ενώ η διενέργεια των δοκιμών βυθίσεων τάσης μπορεί να διαρκέσει περισσότερους από 6 μήνες.

Μετά το πέρας των μετρήσεων συντάσσεται τελική έκθεση, εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία εκτίμησης των παραμέτρων ποιότητας ισχύος που περιγράφεται στο IEC 61400-21 και συμπληρώνεται το σχετικό πιστοποιητικό μετρήσεων. Η μεθοδολογία εκτίμησης των αρμονικών αναλύθηκε εκτενώς στην παρούσα διατριβή, ενώ για τις υπόλοιπες παραμέτρους, τα πιο βασικά στοιχεία περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα Β.4. Επισκόπηση δοκιμής μέτρησης ποιότητας ισχύος Α/Γ σύμφωνα με το IEC 61400-21

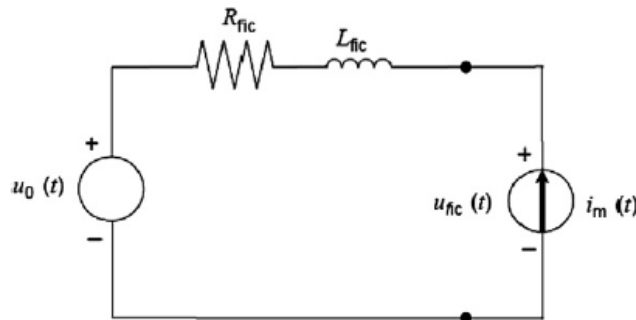
Β.3 Μεθοδολογία εκτίμησης λοιπών παραμέτρων ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του μετρητικού συστήματος και για λόγους πληρότητας, στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι βασικές παράμετροι ποιότητας ισχύος των Α/Γ που υπολογίζονται για τη συμπλήρωση του πιστοποιητικού μετρήσεων ποιότητας ισχύος των εμπορικών μηχανών, πλην των αρμονικών που έχουν αναλυθεί διεξοδικά στα προηγούμενα Κεφάλαια. Ιδιαίτερα σημαντικές έννοιες που εισάγονται από το πρότυπο είναι ο υπολογισμός υποθετικών κυματομορφών τάσης U_{fic} από τις πρωτογενείς μετρήσεις ρεύματος στις Α/Γ, μέσω της χρήσης υποθετικού δικτύου και η χρήση του FFT για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος θετικής ακολουθίας, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Β.3.1 Εκτίμηση διακυμάνσεων τάσης – Flicker

Στο δίκτυο στο οποίο συνδέεται η υπό εξέταση Α/Γ είναι συνήθως συνδεδεμένα και άλλα φορτία, τα οποία συμβάλλουν περαιτέρω στη διακύμανση της τάσης στο σημείο μέτρησης. Επίσης, οι διακυμάνσεις της τάσης που προκαλούνται από την ίδια την Α/Γ διαφέρουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, οι παράμετροι ποιότητας ισχύος που μετρώνται από κάθε Α/Γ θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ανεξάρτητες από τις συνθήκες του δικτύου στο σημείο μέτρησης προκειμένου να μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση της δυνατότητας σύνδεσης σε οποιοδήποτε δίκτυο. Για το λόγο αυτό, το πρότυπο IEC 61000-4-15, [275], εισάγει μεθοδολογία με την οποία χρησιμοποιούνται οι διαθέσιμες μετρήσεις ρεύματος στους

ακροδέκτες της Α/Γ για την προσομοίωση των διακυμάνσεων της τάσης σε ένα υποθετικό δίκτυο, στο οποίο δεν συνδέονται άλλες πηγές διακυμάνσεων παρά μόνο η Α/Γ. Το μονοφασικό διάγραμμα του υποθετικού δικτύου εικονίζεται στο Σχήμα Β.5.



Σχήμα Β5. Υποθετικό δίκτυο για την προσομοίωση υποθετικών διακυμάνσεων τάσης u_{fic} , που προκαλούνται από τις πραγματικές διακυμάνσεις του μετρούμενου ρεύματος i_m στους ακροδέκτες της Α/Γ, [14].

Το υποθετικό δίκτυο παριστάνεται από μία ιδανική πηγή τάσης στιγμιαίας τιμής u_0 και από μία σύνθετη αντίσταση που αποτελείται από ωμική αντίσταση R_{fic} σε σειρά με επαγωγικό στοιχείο L_{fic} . Η Α/Γ παριστάνεται από μία γεννήτρια ρεύματος i_m , που αντιστοιχεί στη μετρημένη χρονοσειρά ρεύματος μίας φάσης. Το απλουστευμένο μοντέλο παρέχει μία υποθετική τάση u_{fic} , η στιγμιαία τιμή της οποίας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U_{fic}(t) = u_0(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \cdot \frac{di_m}{dt} \quad (\text{B.1})$$

Οι τιμές των R_{fic} και X_{fic} επιλέγονται κατάλληλα ώστε προκύπτει η επιθυμητή φασική γωνία της σύνθετης αντίστασης του δικτύου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tan(\psi_k) = \frac{2\pi f L_{fic}}{R_{fic}} = \frac{X_{fic}}{R_{fic}} \quad (\text{B.2})$$

Τέλος η τριφασική φαινόμενη ισχύς βραχυκύκλωσης του υποθετικού δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$S_{k,fic} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + X_{fic}^2}} \quad (\text{B.3})$$

Οι υποθετικές διακυμάνσεις τάσης που προκύπτουν από τις παραπάνω εξισώσεις για διάφορες τιμές ισχύος βραχυκύκλωσης και γωνιών σύνθετης αντίστασης δικτύου, λαμβάνονται ως είσοδοι στο όργανο μέτρησης του flicker (φλικερόμετρο), από το οποίο προκύπτει ο δείκτη flicker βραχείας διάρκειας P_{st} της εξεταζόμενης Α/Γ (μία τιμή ανά 10λεπτο), όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.6.

Ο δείκτης P_{st} ανάγεται σε διάφορες τιμές ισχύος βραχυκύκλωσης με τη βοήθεια του κανονικοποιημένου συντελεστή flicker κατά τη συνεχή λειτουργία:

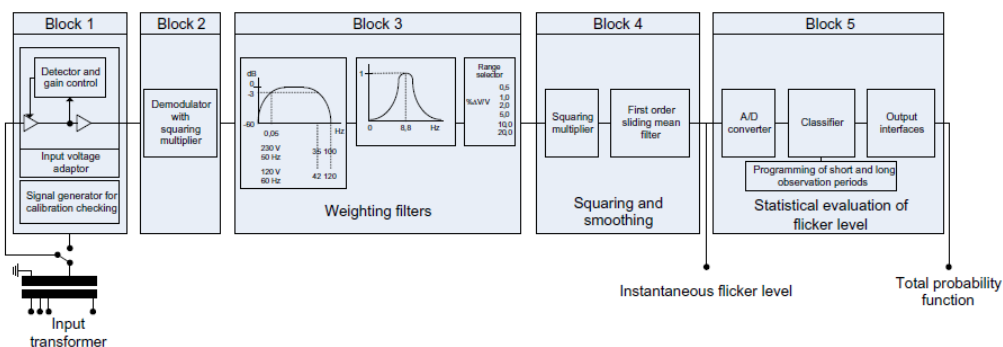
$$c(\psi_k) = P_{st,fic} \cdot \frac{S_{k,fic}}{S_n} \quad (\text{B.4})$$

όπου:

$P_{st,fic}$: η εκπομπή flicker της Α/Γ στο υποθετικό δίκτυο του Σχήματος Β.5

S_n : η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της Α/Γ

$S_{k,fic}$: η φαινόμενη ισχύς βραχυκύκλωσης του υποθετικού δικτύου του Σχήματος Β.5



Σχήμα Β.6. Διάγραμμα βαθμίδων για την υλοποίηση του φλικερόμετρου κατά IEC 61000-4-15, [275].

Αντίστοιχα υπολογίζεται ο δείκτης flicker και διακύμανσης τάσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών λειτουργιών της Α/Γ (εκκίνηση, εναλλαγή γεννητριών), ως εξής:

- **Flicker Step Factor:** Κανονικοποιημένος δείκτης εκπομπών flicker κατά τη μίας διακοπτικής λειτουργίας:

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \cdot \frac{S_{k,fic}}{S_n} P_{st,fic} \cdot T_p^{0,31} \quad (B.5)$$

όπου:

T_p : η περίοδος μέτρησης κατά την οποία θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι έχει αποσβεσθεί πλήρως το μεταβατικό φαινόμενο και ταυτόχρονα δεν περιλαμβάνονται διακυμάνσεις της ισχύος λόγω της τύρβης του ανέμου

- **Voltage Change Factor:** Κανονικοποιημένος δείκτης μεταβολής της τάσης κατά τη μίας διακοπτικής λειτουργίας:

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{fic,max} - U_{fic,min}}{U_n} \cdot \frac{S_{k,fic}}{S_n} \quad (B.6)$$

όπου:

$U_{fic,min}$, $U_{fic,max}$: η ελάχιστη και μέγιστη rms τιμή μίας περιόδου της φασικής τάσης του υποθετικού δικτύου του Σχήματος Β.5, κατά τη διάρκεια μίας διακοπτικής λειτουργίας

Β.3.2 Εφαρμογή του FFT για τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος των Α/Γ

Η βασική ιδιαιτερότητα των μετρήσεων στις Α/Γ σε σχέση με τα τυπικά φορτία που συνδέονται στα δίκτυα είναι ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ολόκληρο το εύρος ισχύος λειτουργίας τους. Αυτό σημαίνει ότι, εκτός από την ακριβή μέτρηση των ρευμάτων και των τάσεων, θα πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια και η αντίστοιχη ενεργός ισχύς για όλες τις επιμέρους παραμέτρους κατά τη συνεχή λειτουργία (flicker και αρμονικές). Σημαντική συνεισφορά στη μείωση της αβεβαιότητας και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων παρέχει η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των rms τάσεων και ρευμάτων καθώς και της αντίστοιχης ενεργού και άεργου ισχύος, που περιλαμβάνεται στο Annex C του IEC 61400-21. Ο υπολογισμός βασίζεται στην ανάλυση των σημάτων ρεύματος και φασικής τάσης σε συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, με σκοπό τον ακριβέστερο προσδιορισμό των θεμελιωδών μεγεθών και την ορθότερη περιγραφή των ασύμμετρων καταστάσεων. Επιπρόσθετα, οι θεμελιώδεις συνιστώσες θετικής ακολουθίας τάσης και ρεύματος αντιστοιχούν στην ωφέλιμη μηχανική ροπή του άξονα της γεννήτριας ενώ οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας και οι αρμονικές αφορούν κυρίως τις ηλεκτρικές απώλειες.

Με χρήση του μετασχηματισμού Fourier (FFT), από τα διαθέσιμα σήματα ρεύματος και φασικής τάσης, η συχνότητα δειγματοληψίας των οποίων πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 kHz, υπολογίζονται οι συντελεστές Fourier της θεμελιώδους συνιστώσας:

$$v_{\phi,Re} = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t v_{\phi}(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \cdot dt \quad (B.7\alpha)$$

$$v_{\phi,Im} = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t v_{\phi}(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \cdot dt \quad (B.7\beta)$$

όπου f_1 είναι η θεμελιώδης συχνότητας (50 Hz) και ο δείκτης ϕ υποδηλώνει φασική τιμή. Στον υπολογισμό της ενεργού ισχύος το χρονικό παράθυρο για την εφαρμογή του FFT θεωρείται ίσο με μία θεμελιώδη περίοδο (0.02 s) και ο υπολογισμός προτείνεται να επαναλαμβάνεται τουλάχιστον μία φορά σε κάθε περίοδο και επομένως μπορεί να υπάρχει ή όχι επικάλυψη στο θεωρούμενο παράθυρο. Από τις εξισώσεις Β.7 προκύπτει η ενδεικνύμενη τιμή της θεμελιώδους φασικής τάσης:

$$v_{\phi,rms} = \sqrt{\frac{v_{\phi,Re}^2 + v_{\phi,Im}^2}{2}} \quad (B.8)$$

Όσον αφορά στις θεμελιώδεις συμμετρικές συνιστώσες τάσεων και ρευμάτων, αυτές μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν εφαρμόζοντας το γνωστό μετασχηματισμό συμμετρικών συνιστωσών, όπως φαίνεται στις εξισώσεις Β.9 έως Β.14 για τις τάσεις (όπου v_{ω} , v_b , v_c οι φασικές τάσεις και v_1 , v_2 , v_0 οι αντίστοιχες συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας). Αντίστοιχα ισχύουν για τα ρεύματα:

$$v_{1,Re} = \frac{1}{6} \cdot \left[2 \cdot v_{a,Re} - v_{b,Re} - v_{c,Re} - \sqrt{3} \cdot (v_{b,Im} - v_{c,Im}) \right] \quad (B.9)$$

$$v_{1,Im} = \frac{1}{6} \cdot \left[2 \cdot v_{a,Im} - v_{b,Im} - v_{c,Im} - \sqrt{3} \cdot (v_{c,Re} - v_{b,Re}) \right] \quad (B.10)$$

$$v_{2,Re} = \frac{1}{6} \cdot \left[2 \cdot v_{a,Re} - v_{b,Re} - v_{c,Re} - \sqrt{3} \cdot (v_{c,Im} - v_{b,Im}) \right] \quad (B.11)$$

$$v_{2,Im} = \frac{1}{6} \cdot \left[2 \cdot v_{a,Im} - v_{b,Im} - v_{c,Im} - \sqrt{3} \cdot (v_{b,Re} - v_{c,Re}) \right] \quad (B.12)$$

$$v_{0,Re} = \frac{1}{3} \cdot (v_{a,Re} + v_{b,Re} + v_{c,Re}) \quad (B.13)$$

$$v_{0,Im} = \frac{1}{3} \cdot (v_{a,Im} + v_{b,Im} + v_{c,Im}) \quad (B.14)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες της θεμελιώδους (50 Hz) ενεργού και άεργου ισχύος:

$$P_1 = \frac{3}{2} \cdot (v_{1,Re} \cdot i_{1,Re} + v_{1,Im} \cdot i_{1,Im}) \quad (B.15)$$

$$P_2 = \frac{3}{2} \cdot (v_{2,Re} \cdot i_{2,Re} + v_{2,Im} \cdot i_{2,Im}) \quad (B.16)$$

$$P_0 = \frac{3}{2} \cdot (v_{0,Re} \cdot i_{0,Re} + v_{0,Im} \cdot i_{0,Im}) \quad (B.17)$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} \cdot (v_{1,Im} \cdot i_{1,Re} - v_{1,Re} \cdot i_{1,Im}) \quad (B.18)$$

$$Q_2 = \frac{3}{2} \cdot (v_{2,Im} \cdot i_{2,Re} - v_{2,Re} \cdot i_{2,Im}) \quad (B.19)$$

$$Q_0 = \frac{3}{2} \cdot (v_{0,Im} \cdot i_{0,Re} - v_{0,Re} \cdot i_{0,Im}) \quad (B.20)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ο συντελεστής $\frac{1}{2}$ προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του πλάτους των διανυσμάτων τάσεων και ρευμάτων αντί της ενδεικνύμενης τιμής αυτών στις εξισώσεις B.9 έως B.14.

Τέλος, οι ενδεικνύμενες τιμές της θεμελιώδους συνιστώσας θετικής ακολουθίας της πολικής τάσης και του ενεργού και άεργου ρεύματος υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$V_1 = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot (v_{1,Re}^2 + v_{1,Im}^2)} \quad (B.21)$$

$$I_{1,P} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_1} \quad (B.22)$$

$$I_{1,Q} = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot V_1} \quad (B.23)$$

Οι τιμές αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας υπολογίζονται κατά τρόπο αντίστοιχο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Vijay Vittal, Raja Ayyanar, «Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy», *Power Electronics and Power Systems*, Springer, 2013.
- [2] D. Schulz, «Grid Integration of Wind Energy Systems», *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*, Springer, 2008, pp. 327-374.
- [3] Henk Polinder, Sjoerd W.H. de Haan, Maxime R. Dubois, Johannes G. Slootweg, «Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines», *European Power Electronics and Drives (EPE) Journal, Volume 15-4, 2005*.
- [4] Siegfried Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, 1998, ISBN 0 471 97143 X.
- [5] Zhe Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg, «A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines», *IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 24, No. 8, August 2009*.
- [6] Frede Blaabjerg, Marco Liserre, and Ke Ma, «Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems», *IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 48, No. 2, March/April 2012*.
- [7] Hanna Emanuel, Martin Schellschmidt, Stephan Wachtel, Stephan Adloff, «Power Quality Measurements of Wind Energy Converters with Full-Scale Converter according to IEC 61400-21», *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, September 15-17, 2009, Lodz, Poland*.
- [8] A.Madariaga, J.L.Martin, I.Zamora, I.Martinez de Alegria, S.Ceballos, «Technological trends in electric topologies for offshore wind power plants», *Renewable and Sustainable Energy Reviews 24*, 2013.
- [9] Quincy Wang, Liuchen Chang, «PWM Control Strategies for Wind Turbine Inverters», *IEEE 1998 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Waterloo, Canada*.
- [10] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, «A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators», *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 2005*.
- [11] Hyong Sik Kim Dylan Dah-Chuan Lu, «Review on Wind Turbine Generators and Power Electronic Converters with the Grid-Connection Issues» *20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010*.
- [12] Φύλλο Εφημερίδας Κυβερνήσεως Αρ. Β' 1153 (2007), «Διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση ΑΠΕ». *Υπουργική Απόφαση Δ6/Φ1/13310/2007*.
- [13] IEC 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7, «Testing and measurement techniques- General guide on harmonics and inter-harmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto», Edition 2, 08-2002.
- [14] IEC 61400-21 Wind turbine generator systems, Part 21, «Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines», Edition 2.0, 08-2008.
- [15] MEASNET, «Power Quality Measurement Procedure», Version 4, October 2009.
- [16] IEC 61000-3-6 (2008-02) Electromagnetic Compatibility (EMC), « Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations in MV, HV and EHV power systems – Basic EMC Publication».
- [17] Σ. Παπαθανασίου, «Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την Επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διδακτορική Διατριβή, Φεβρουάριος 1997.
- [18] M. P. Papadopoulos, S. A. Papathanassiou, S. T. Tentzerakis, and N. G. Boulaxis, «Investigation of the flicker emission by grid connected wind turbines», *Proc. of IEEE 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Athens, Greece*.
- [19] L.L. Freris, «Wind Energy Conversion Systems», *Prentice Hall International, 1990, ISBN 0-13-960527-4*.
- [20] Swagata Das, Neeraj Karnik, and Surya Santoso, «Time-Domain Modeling of Tower Shadow and Wind Shear in Wind Turbines», *International Scholarly Research Network, ISRN Renewable Energy, Volume 2011, Article ID 890582, 11 pages, doi:10.5402/2011/890582*.
- [21] A. Testa, R. Langella, «Power System Subharmonics», *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*.
- [22] Ramón I. Diego, Julio Barros, «Subharmonic measurement using DFT and Wavelet-Packet Transform in an IEC extended framework», *Measurement 43*, p. 1603–1608, 2010.
- [23] A. Larsson, P. Sorensen, F. Santjer, «Grid Impact of Variable Speed Wind Turbines,» *Proc. European*

- Wind Energy Conference (EWEC) 1999, Nice, France.*
- [24] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro, «Power Conversion and Control of Wind Energy Systems», *IEEE Press Series of Power Engineering 2011, Wiley Publication, ISBN 978-1-118-02900-8.*
- [25] Pierluigi Tenca, Andrew A. Rockhill, Thomas A. Lipo, Pietro Tricoli, «Current Source Topology for Wind Turbines With Decreased Mains Current Harmonics, Further Reducible via Functional Minimization», *IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 23, No. 3, May 2008.*
- [26] S.M. Muyeen, Ahmed Al-Durra, J. Tamura, «Variable speed wind turbine generator system with current controlled voltage source inverter», *Energy Conversion and Management 52 (2011) 2688–2694.*
- [27] IEC CISPR 16-1-2, «Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment - Conducted disturbances», *Edition 1.2, 2006-08.*
- [28] IEC 61400-21 Wind turbine generator systems, Part 21, «Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines», *Edition 1.0, 12-2001.*
- [29] John Olav Giaever Tande, «Impact of Wind Turbines on Voltage Quality», *IEEE 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998, Athens, Greece.*
- [30] Haiyun Wang, Weiqing Wang, Liang Bin, «Power Quality Analysis and System Simulation on Permanent Magnet Direct-drive Wind Turbine», *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008.*
- [31] Weihao Hu, Zhe Chen, Yue Wang and Zhaoan Wang, «Flicker Mitigation by Active Power Control of Variable-Speed Wind Turbines With Full-Scale Back-to-Back Power Converters», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 24, No. 3, September 2009.*
- [32] Braulio Barahona, Poul Sørensen, Leif Christensen, Troels Sørensen, Henny K. Nielsen, and Xiaoli G. Larsen, «Validation of the Standard Method for Assessing Flicker From Wind Turbines», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.26, Issue 1, March 2011.*
- [33] Åke Larsson, «Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operations», *IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002.*
- [34] A. Tascikaraoglu, M. Uzunoglu, B. Vural, O. Erdinc, «Power quality assessment of wind turbines and comparison with conventional legal regulations: A case study in Turkey», *Journal Applied Energy 88 (2011) 1864–1872.*
- [35] Foussekis, D, Kokkalidis, F, Tentzerakis, S, Agoris, D, «Power quality measurements on different types of wind turbines operating in the same wind farm», *Proc. of European Wind Energy Conference 2003. Madrid. Spain.*
- [36] Lukasz Hubert Kocewiak, Jesper Hjerrild, Claus Leth Bak, «Harmonic Analysis of Offshore Wind Farms with Full Converter Wind Turbines», *Proceeding of the 8th International Conference on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems. Energnautics GmbH, 2009.*
- [37] Stavros A. Papathanassiou, Michael P. Papadopoulos, «Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, Issue 4, Oct. 2006.*
- [38] Fritz Santjer, «Harmonic current emission of wind farms», *DEWEK 2012: Deutsche Windenergie-Konferenz, November 2012.*
- [39] Fritz Santjer, Jens Herbrandt, «Harmonic current emission of wind farms exceeding the limiting values», *Deutsche Windenergie-Konferenz (DEWEC), Bremen, 17-18 November 2010..*
- [40] Amit Kumar Jain, Rohit Tirumala, Ned Mohan, Terje Gjengedal, Richard M. Halet, «Harmonics and Flicker Control in Wind Farms», *Wind Power Impacts on Power Systems Workshop, Oslo, Norway, 17–18 Jun. 2002.*
- [41] K.N Md Hasan, Kalle Rauma, Alvaro Luna, J. Ignacio Candela and P.Rodriguez, «Harmonic Resonance Study for Wind Power Plant», *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'12), Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March 2012.*
- [42] K.N Md Hasan, Kalle Rauma, P. Rodriguez, J. Ignacio Candela, Raul S. Muñoz-Aguilar, Alvaro Luna, «An Overview of Harmonic Analysis and Resonances of Large Wind Power Plant», *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.*
- [43] Ruimin Zheng, Math Bollen, «Harmonic Resonances Associated with Wind Farms», *Lulea University of Technology, 2010.*
- [44] B. K. Bose, «Modern Power Electronics and AC Drives», *ISBN 0-13-0167-43-6: Prentice Hall, 2002.*
- [45] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo, «Pulse Width Modulation for Power Converters – Principles and

- Practice», *IEEE Press* 2003, ISBN 0-471-20814-0.
- [46] J. Arrillaga, N.R. Watson, «Power System Harmonics», *Second Edition, 2003, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0-470-85129-5.*
- [47] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, «On the harmonics of the slip energy recovery drive», *IEEE Power Eng. Rev., vol. 21, no. 4, pp. 55–57, Apr. 2001.*
- [48] M. Lindholm, T.W.Rasmussen, «Harmonic analysis of Doubly Fed Induction Generators», *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PESD), 17-20 Nov. 2003, Vol. 2, Pages: 837 – 841.*
- [49] Stephan Meier, «Novel Voltage Source Converter based HVDC Transmission System for Offshore Wind Farms», *Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm* 2005.
- [50] Stephan Meier, Philip C. Kjær, «Benchmark of Annual Energy Production for Different Wind Farm Topologies», *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, PESC '05.*
- [51] Markus A. Poller, «Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms», *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna (Volume:3)*.
- [52] Giuseppe Saccomando, Jan Svensson, Ambra Sannino, «Improving Voltage Disturbance Rejection for Variable-Speed Wind Turbines», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002.*
- [53] Alexis Kwasinski, Philip T. Krein, Patrick L. Chapman, Member, IEEE, «Time Domain Comparison of Pulse-Width Modulation Schemes», *IEEE Power Electronics Letters, Vol. 1, No. 3, September 2003.*
- [54] Z. Chen, E. Spooner, «Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 16, No. 2, June 2001.*
- [55] E. Muljadi, H. Hess, K. Thomas, «Zero sequence method for Energy Recovery from a Variable Speed Wind Turbine Generator», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, March 2001.*
- [56] Carl Ngai-Man Ho, Victor S. P. Cheung, Henry Shu-Hung Chung, «Constant-Frequency Hysteresis Current Control of Grid-Connected VSI Without Bandwidth Control», *IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 24, No. 11, November 2009.*
- [57] Ali I. Maswood, Fangrui Liu, «A Unity Power Factor Front-End Rectifier With Hysteresis Current Control», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.21, No.1, March 2006.*
- [58] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, «POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Design», *John Wiley & Sons, Second Edition 1995, ISBN 0-471-58408-8.*
- [59] Gopal K. Dubey, «Power Semiconductor Controlled Drives», *Prentice –Hall International, 1989, ISBN 0-13-685942-9.*
- [60] Sokratis T. Tentzerakis and Stavros A. Papathanassiou, «An Investigation of the Harmonic Emissions of Wind Turbines», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, March 2007.*
- [61] Roberto Cárdenas, Ruben Pena, Patrick Wheelerc, Jon Clare, Andres Munoz, Alvaro Suredad, «Control of a wind generation system based on a Brushless Doubly-Fed Induction Generator fed by a matrix converter», *Electric Power Systems Research 103*, 2013.
- [62] Tusitha Abeyasekera, C. Mark Johnson, David J. Atkinson, Matthew Armstrong,, «Suppression of Line Voltage Related Distortion in Current Controlled Grid Connected Inverters», *IEEE Trans. On Power Electronics, Vol.20, No.6, November 2005.*
- [63] Timothy L. Skvarenina, «The Power Electronics Handbook», *CRC Press 2001, ISBN 0-8493-7336-0.*
- [64] Bogdan M. Wilamowski, J. David Irwin, «The Industrial Electronics Handbook: Power electronics and motor drives», *CRC Press 2011, ISBN 978-1-4398-0285-4.*
- [65] Erika Twining, Donald Grahame Holmes, «Grid Current Regulation of a Three-Phase Voltage Source Inverter With an LCL Input Filter», *IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 18, No. 3, May 2003.*
- [66] Fernando Soares dos Reis et. al., «Active Shunt Filter for Harmonic Mitigation in Wind Turbines Generators», *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC) 2006.*
- [67] Lukasz Hubert Kocewiak, Jesper Hjerrild, Claus Leth Bak, «Harmonic models of a back-to-back converter in large offshore wind farms compared with measurement data», *Proceedings of Nordic Wind Power Conference 2009.*
- [68] David B. Vannoy, Mark F. McGranaghan, S. Mark Halpin, W. A. Moncrief and D. Daniel Sabin, «Roadmap for Power-Quality Standards Development», *IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 43, No. 2, March/April 2007.*
- [69] IEC 61000-1-4, 1st Edition 2005, «Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 1-4: General – Historical

- rationale for the limitation of power-frequency conducted harmonic current emissions from equipment, in the frequency range up to 2 kHz».
- [70] IEC 61000-2-1, 1st Edition 1990, «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems».
- [71] IEC 61000 2-2, 2nd Edition 2002, «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems».
- [72] IEC 61000 2-4, 2nd Edition 2002, «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances».
- [73] IEC 61000-2-12, «EMC-Part 2-12: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems,» 1st Edition, 2003-04.
- [74] IEC 61000 3-2, Edition 3.2 (2009), «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)».
- [75] IEC 61000 3-4, 1st Edition (1998), «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-4: Limits – Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A».
- [76] IEC 61000-3-12, Edition 2.0 (2011), «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase».
- [77] IEC 61000-4-13, Edition 1.1 (2009), «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-13: Testing and measurement techniques – Harmonics and interharmonics including mains signalling at a.c. power port, low frequency immunity tests».
- [78] IEEE 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [79] IEC 61000-4-30 Edition 2 (2008). Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30, «Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods».
- [80] IEEE Std. 1459-2000, «IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions».
- [81] Federation of German Windpower (FGW). Technical Guideline Part -3, «Determination of Electrical Characteristics of Power Generating Units connected to MV, HV and EHV Grids».
- [82] S.A. Papathanassiou, «A Technical Evaluation Framework for the Connection of DG to the Distribution Network», *Electric Power Systems Research, Volume 77, Issue 1, January 2007, Pages 24–34*.
- [83] ISO/IEC 17025 (2005), «General requirements for the competence of testing and calibration laboratories».
- [84] Σ. Τεντζεράκης, Κ. Ρώσσης, Σ. Παπαθανασίου, «Εφαρμογή του νέου προτύπου IEC 61400-21/2008 για τη σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο», *4ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Μάιος 2010, Αθήνα*.
- [85] Moeler, J, Nohme, K, «Status and development of LVRT Tests», *9th German Wind Energy Conference, 2008*.
- [86] Σ. Παπαθανασίου, «Σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στα δίκτυα διανομής», *Σημειώσεις μαθήματος: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2003*.
- [87] D. Schulz, R. Hanitsch, T. Kompa, A. Samour, «Comparative Power Quality Investigations of Variable Speed Wind Energy Converters with Doubly-fed Induction and Synchronous Generator», *Proc. PCIM Power Quality Conference 2002, Nuremberg, Germany*.
- [88] D. Schulz, R. Hanitsch, K. Moutawakkil, C. Saniter, “Power Quality Behaviour of Large Wind Parks with Variable Speed Wind Energy Converter”, *Proc. CIRED 2003, Barcelona, Spain*.
- [89] T. Thiringer, T. Petru, C. Liljegren, «Power Quality Impact of a Sea Located Hybrid Wind Park», *IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.16, No.2, June 2001, pp.123-127*.
- [90] M. Sanz, A. Llombart, A. Bayod, J. Mur, «Power Quality Measurements and Analysis for Wind Turbines», *Proc. of the 17th IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology, 2000*.
- [91] M. Koulouvari, P. Ladakakos, D. Foussekis, and E. Morfiadakis, «Measurement system dedicated to wind turbine power quality applications», *Proc. Int. Conf. Harmonics Quality Power, Athens, Greece, Oct. 14–16, 1998, pp. 911–946*.

- [92] Luis Sainz, Juan Jose Mesas, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, «Deterministic and Stochastic Study of Wind Farm Harmonic Currents», *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Volume: 25, Issue: 4, Dec. 2010.
- [93] Shun Liang, Qiaohui Hu, Wei-jen Lee, «A Survey of Harmonic Emissions of a Commercial Operated Wind Farm», *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol.48, No.3, May/June 2012.
- [94] L. Sainz and J. Cunill-Solà, «Currents' Physical Components (CPC) concept in wind farm harmonic current studies», *11th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO)*, Las Palmas de Gran Canaria: 2011.
- [95] Kai Yang, Math H.J. Bollen and Mats Wahlberg, «A comparison study of Harmonic Emission Measurements in Four Windparks», *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [96] Ionel Urdea Marcus, Anca Elena Nestor, Paul Clarkson, «The Influence of the Network Impedance on the Nonsinusoidal (Harmonic) Network Current and Flicker Measurements», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 7, July 2011.
- [97] Ozgur Salih Mutlu, Eyup Akpınar, Abdul Balıkcı, «Power quality analysis of wind farm connected to Alaçatı substation in Turkey», *Renewable Energy* 34 (2009) 1312–1318.
- [98] Kai Yang, «Licentiate Thesis: Wind-Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm», *Lulea University of Technology*, 2012.
- [99] Kai Yang, Math H.J. Bollen, Mats Wahlberg, «Characteristic and non-characteristic harmonics from windparks», *CIGRE 21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 6-9 June 2011.
- [100] EN 50160, «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems», 2000.
- [101] Yan Feng Li, Kui Fu Chen, «Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform», *Computer Physics Communications* 178 (2008) 486–491, Available online at www.sciencedirect.com.
- [102] T. X. Zhu, «Exact Harmonics/Interharmonics Calculation Using Adaptive Window Width», *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.22, Issue 4, Oct. 2007.
- [103] Peng Zhang, Hui Xue, and Rengang Yang, «Shifting Window Average Method for Accurate Frequency Measurement in Power Systems», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.26, Issue 4, Oct 2011.
- [104] Francesco Cupertino, Elisabetta Lavopa, Pericle Zanchetta, Mark Sumner, Luigi Salvatore, «Running DFT-Based PLL Algorithm for Frequency, Phase, and Amplitude Tracking in Aircraft Electrical Systems», *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol.58, No.3, March 2011.
- [105] Hsiung Cheng Lin, «Power Harmonics and Interharmonics Measurement using Recursive Group-harmonic Power Minimizing Algorithm», *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol.59, Issue 2, Feb. 2012.
- [106] Bo Zeng, Zhaosheng Teng, Yulian Cai, Siyu Guo, and Baiyuan Qing, «Harmonic Phasor Analysis Based on Improved FFT Algorithm», *IEEE Trans. On Smart Grid*, Vol.2, No.1, March 2011.
- [107] Alfredo Testa, Daniele Gallo, Roberto Langella, «On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, January 2004.
- [108] Julio Barros, and Ramón I. Diego, «On the Use of the Hanning Window for Harmonic Analysis in the Standard Framework», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.21, No.1, January 2006.
- [109] YuHua Gu, Math H. J. Bollen, «Time-Frequency and Time-Scale Domain Analysis of Voltage Disturbances», *IEEE Trans On Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, October 2000.
- [110] G. T. Heydt, P. S. Fjeld, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, G. Hensley, «Applications of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.14, No.4, Oct. 1999.
- [111] Zhongdong Liu, Jörg Himmel, and Karl Walter Bonfig, «Improved Processing of Harmonics and Interharmonics by Time-Domain Averaging», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 20, No. 4, October 2005.
- [112] Sachin K. Jain, S. N. Singh, J. G. Singh, «An Adaptive Time-Efficient Technique for Harmonics Estimation of Non-stationary Signals», *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 60, Issue: 08, Aug. 2013.
- [113] S.K.Jain, S.N.Singh, «Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges», *Electric Power Systems Research* 81 (2011) 1754-1766.
- [114] O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier, «New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.
- [115] Michel MEUNIER, Françoise BROUAYE, «Fourier transform, Wavelets, Prony analysis: Tools for Harmonics and Quality of Power», *ICHQP 1998, Athens, Greece*.
- [116] T. Lobos, J. Rezmer, P. Janik, H. Amarís, M. Alonso, C. Álvarez, «Application of wavelets and Prony

- method for disturbance detection in fixed speed wind farms», *Electrical Power and Energy Systems* 31 (2009) 429–436.
- [117] Julio Barros, Ramón I. Diego, «Analysis of Harmonics in Power Systems Using the Wavelet-Packet Transform», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 1, January 2008.
- [118] P. F. Ribeiro, «Wavelet transform: an advanced tool for analysing non-stationary harmonic distortions in power systems», *Proceedings of the IEEE International Conference on Harmonics in Power Syetms, Bologna, Italy, September 1994*.
- [119] R. G. Stockwell, L. Mansinha, and R. P. Lowe, «Localization of the Complex Spectrum: The S-Transform», *IEEE Trans. On Signal Processing*, Vol. 44, No. 4, April 1996.
- [120] S. Mishra, C. N. Bhende, B. K. Panigrahi, «Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Probabilistic Neural Network», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, January 2008.
- [121] Zhang Shi, Liu Ruirui, Wang Qun, Jeffers Teargun Heptol, Yang Guimin, «The Research of Power Quality Analysis Based on Improved S-Transform», *IEEE 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, ICEMI' 2009*.
- [122] Xianyong Xiao, Fangwei Xu, Honggeng Yang, «Short duration disturbance classifying based on S-transform maximum similarity», *Electrical Power and Energy Systems* 31 (2009) 374–378.
- [123] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, «The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis», *Royal Society of London A*, vol. 454, pp. 903-995, 1998.
- [124] N. Senroy, S. Suryanarayanan, P. F. Ribeiro, «An Improved Hilbert-Huang Method for Analysis of Time-varying Waveforms in Power Quality», *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 22, No. 4, November 2007.
- [125] R.T. Rato, M.D. Ortigueira, A.G. Batista, «On the HHT, its problems, and some solutions», *Mechanical Systems and Signal Processing* 22 (2008) 1374–1394.
- [126] Shi Zhang, Qun Wang, Ruirui Liu, «Power System Harmonic Analysis Based on Improved Hilbert-Huang Transform», *IEEE 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, ICEMI' 2009*.
- [127] Dina Shona Laila, Arturo Roman Messina and Bikash C. Pal, «A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring», *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 24, No. 2, May 2009.
- [128] J. F. Hauer, «Application of prony analysis to the determination of modal content and equivalent models for measured power system response», *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 1062–1068, Aug. 1991.
- [129] Antonio Bracale, Guido Carpinelli, Zbigniew Leonowicz, Tadeusz Lobos and Jacek Rezmer, «Measurement of IEC Groups and Subgroups Using Advanced Spectrum Estimation Methods», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 4, April 2008.
- [130] Jaroslaw Zygarlicki, Malgorzata Zygarlicka, Janusz Mroczka, Krzysztof J. Latawiec, «A Reduced Prony's Method in Power-Quality Analysis—Parameters Selection», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 25, No. 2, April 2010.
- [131] Arturo Roman Messina, «Inter-area Oscillations in Power Systems: A Non-Linear and Non Stationary Perspective», *Springer Power Electronics and Power Systems*, ISBN 978-0-387-89529-1, 2009.
- [132] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, «Interharmonics: Theory and Modeling», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.22, No.4, October 2007.
- [133] J.I. Herrera, T.W. Reddoch, J.S. Lawler, «Harmonics Generated by Two Variable Speed Wind Generating Systems», *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 3, No. 2, June 1988, pp. 267-273.
- [134] P Sorensen, G Gerdes, R Klosse, F Santjer, «Standards for measurements and testing of wind turbine power quality», European Wind Energy Conference 1999.
- [135] Federation of German Windpower and other Renewable Energies (FGW), «Technical Guidelines for Power Generating Units – Part 4: Demands on Modeling and Validating Simulation Models of the Electrical Characteristics of Power Generating Units and Systems».
- [136] IEC 61400-27-1 Ed.1.0: «Wind Turbines - Part 27-1: Electrical simulation models for wind power generation», *Draft Circulated as Committee Draft 2013-08*.
- [137] IEC 61400-27-2 Ed. 1.0: «Wind turbines - Part 27-2: Electrical simulation models for wind power generation - Wind power plants», *1st Committee Draft 2013-09*.
- [138] S. Tentzerakis, S. Papathanassiou, P. Papadopoulos, D. Foussekis, P. Vionis, «Evaluation of Wind Farm

- Harmonic Current Emissions», *EWEC 2007, May 2007, Milan, Italy*.
- [139] S. Tentzerakis, N. Paraskevopoulou, S. Papathanassiou and P. Papadopoulos, «Measurement of Wind Farm Harmonic Emissions», *IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2008, Rhodes, Greece*.
- [140] Iman Sadinezhad, Vassilios G. Agelidis, «Slow sampling on-line harmonics/interharmonics estimation technique for smart meters», *Electric Power Systems Research 81 (2011), pp 1643–1653*.
- [141] Julio Barros, Ramón I. Diego and Matilde de Apráiz, «Applications of Wavelet Transform for Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems: A Review», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 61, No. 10, October 2012*.
- [142] Paulo F. Ribeiro, «Time-Varying Waveform Distortions in Power Systems», *John Wiley & Sons, Ltd*.
- [143] Xueli An, Dongxiang Jiang, Shaohua Li, Minghao Zhao, «Application of the ensemble empirical mode decomposition and Hilbert transform to pedestal looseness study of direct-drive wind turbine», *Energy 36 (2011) 5508-5520*.
- [144] Wenxian Yang, Richard Court, Peter J. Tavner, Christopher J. Crabtree, «Bivariate empirical mode decomposition and its contribution to wind turbine condition monitoring», *Journal of Sound and Vibration 330 (2011) 3766–3782*.
- [145] B. Baby Priya and A. Chilambuchelvan, «Modelling and Analysis of DFIG Wind Turbine Harmonics Generated in Grids», *International Journal of Engineering and Technology Vol.2(3), 2010, 185-189*.
- [146] P. Janik, Z. Leonowicz, Jacek Rezmer, S. Chistan, D. Schulz, «Advanced Signal Processing Methods for Evaluation of Harmonic Distortion Caused by DFIG Wind Generator», *Proceedings of the 16th Power Systems Computation Conference, PSCC 2008, Glasgow, Scotland*.
- [147] E. Torres, S. Djurovic, V. Terzija, Steve Williamson, «Application of Parameter Estimation Methods to the Assessment of DFIG's Currents», *IEEE Power Tech Conference, June 2009, Bucharest, Romania*.
- [148] A. Oppenheim, R. Schaffer, and J. Buck, «Discrete-Time Signal Processing», *Englewood Cliffs, NJ,; 2nd Ed., Prentice Hall, 1999*.
- [149] Sergio Rapuano and Fred J. Harris, «An Introduction to FFT and Time Domain Windows», *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, December 2007*.
- [150] S.A. Broughton, K. Bryan, «Discrete Fourier analysis and wavelets applications to signal and image processing», *John Wiley & Sons Publication, ISBN 978-0-470-29466-6, 2009*.
- [151] Athanassios Papoulis, «Probability, Random Variables and Stochastic Processes», *McGraw-Hill, ISBN 0-07-048477-5, 1991*.
- [152] A. Testa, D. Gallo, R. Langella, «Interharmonic Measurements in IEC Standard Framework», *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 25-25 July 2002*.
- [153] Irimi S. Reljin, Branimir D. Reljin and Veljko D. Papic, «Extremely Flat-Top Windows for Harmonic Analysis», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 3, June 2007*.
- [154] Bracewell, R., «The Fourier Transform and Its Applications», *New York: 3rd edition, McGraw-Hill, 1999*.
- [155] David Gottlieb and Chi-Wang Shu, «On the Gibbs Phenomenon and Its Resolution», *Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol.39, Issue 4, 1997*.
- [156] He Wen, Zhaosheng Teng, Yong Wang and Xiaoguang Hu, «Spectral Correction Approach Based on Desirable Sidelobe Window for Harmonic Analysis of Industrial Power System», *IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, March 2013*.
- [157] Hao Qian, Rongxiang Zhao and Tong Chen, «Interharmonic Analysis Based on Interpolating Windowed FFT Algorithm», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No.2, April 2007*.
- [158] Kui Fu Chen, Jing Tao Jiang, Stephen Crowsen, «Against the long-range spectral leakage of the cosine window family», *Computer Physics Communications 180 (2009)*.
- [159] Wen He, Teng Zhao Sheng, Guo Si Yu, Wang Jing Xun, Yang Bu Ming, Wang Yi & Chen Tao, «Hanning self-convolution window and its application to harmonic analysis», *Springer Science in China Press Series E: Technological Sciences 2009*.
- [160] Kui Fu Chen, Yan Feng Li, «Combining the Hanning windowed interpolated FFT in both directions», *Computer Physics Communications 178 (2008)*.
- [161] Michael Cerna and Audrey F. Harvey, «The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement», *National Instruments, Application Note 041, July 2000*.
- [162] José Antonio de la O Serna, «On the Use of Amplitude Shaping Pulses as Windows for Harmonic Analysis», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 6, December 2001*.
- [163] F. J. Harris, «On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform», *IEEE*,

- vol. 66, pp. 51–83, Jan. 1978.
- [164] Henry K. Kwok and Douglas L. Jones, «Improved Instantaneous Frequency Estimation Using an Adaptive Short-Time Fourier Transform», *IEEE Trans. On Signal Processing*, VOL. 48, NO. 10, October 2000.
- [165] Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan, «Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithms, and Applications», *Published by John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-470-48413-5, 2011.*
- [166] IEEE Standard 1159-2009, «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality».
- [167] James S. Walker, «A Primer on WAVELETS and Their Scientific Applications», *Second Edition, 2008 by Taylor & Francis Group, LLC, ISBN 978-1-58488-745-4.*
- [168] S. Jaffard, Y. Meyer, R. Ryan, «Wavelets Tools for Science and Technology, Society for Industrial and Applied Mathematics», 2001, ISBN 0-89871-448-6.
- [169] Mei Kobayashi, «Wavelets and their Applications – Case Studies, Society for Industrial and Applied Mathematics», 1998, ISBN 0-89871-416-8.
- [170] Angrisani, L.; Daponte, P.; D'Apuzzo, M.; Testa, A., «A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 13, Issue: 4, Oct 1998, Page(s): 990 -998.
- [171] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M., «Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 12, Issue: 3, Jul 1997, Page(s): 1250 -1257.
- [172] Heydt, G.T.; Galli, A.W., «Transient power quality problems analyzed using wavelets», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 12 Issue: 2, Apr 1997, Page(s): 908 -915.
- [173] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Hofmann, P., «Power quality assessment via wavelet transform analysis», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 11 Issue: 2, Apr 1996, Page(s): 924 -930.
- [174] Gaouda, A.M.; Salama, M.M.A.; Sultan, M.R.; Chikhani, A.Y., «Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 14 Issue: 4, Oct 1999, Page(s): 1469.
- [175] W. K. Yoon and M. J. Devaney, «Power measurement using the wavelet transform», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 5, pp. 1205–1210, Oct. 1998.
- [176] R. Eslami, H. Askarian, A. Mahmoudi and S. H. Hosseinian, «A New Method for Measurement of Harmonic Groups Using Wavelet-Packet-Transform», *Journal of American Science*, 2012; 8(2).
- [177] Mazloomzadeh, A., Mirsalim, M.; Fathi, H., «Harmonic and inter-harmonic measurement using discrete wavelet packet transform with linear optimization», 4th *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009. ICIEA 2009.
- [178] Tomasz Tarasiuk, «Hybrid Wavelet–Fourier Method for Harmonics and Harmonic Subgroups Measurement—Case Study», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jan. 2007, Volume: 22, Issue: 1, Page(s): 4 – 17.
- [179] Matlab Wavelet Toolbox Help, «www.mathworks.com,» [Ηλεκτρονικό].
- [180] C. Parameswariah, M. Cox, «Frequency characteristics of wavelets», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 17 Issue: 3, Jul 2002, Page(s): 800 -804.
- [181] E.Y. Hamid, Z.-I. Kawasaki, «Wavelet-based data compression of power system disturbances using the minimum description length criterion», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 17 Issue: 2, Apr 2002, Page(s): 460 -466.
- [182] Hamid, E.Y.; Kawasaki, Z.-I., «Instrument for the quality analysis of power systems based on the wavelet packet transform», *IEEE Power Engineering Review*, Volume: 22 Issue: 3, Mar 2002, Page(s): 52 -54.
- [183] Gunner C. Larsen and Kurt S. Hansen, «Database on Wind Characteristics Analyses of Wind Turbine Design Loads», *Risø-R-1473*, June 2004.
- [184] Basu, M., Basu, B., «Analysis of Power Quality (PQ) Signals by Continuous Wavelet Transform», σε *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2007. PESC 2007.
- [185] Z.K. Peng, Peter W. Tse, F.L. Chu, «A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing», *Mechanical Systems and Signal Processing* 19 (2005) 974–988.
- [186] Thomas Croes, Cristina Gherasim, Jeroen Van den Keybus, Jozef Ghijselen, Johan Driesen, Ronnie Belmans, «Power Measurement using the Wavelet Transform of Analytic Signals», *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power 2004.*
- [187] Kezunovic, M.; Liao, Y., «A novel software implementation concept for power quality study», *IEEE*

- Transactions on Power Delivery, Volume: 17 Issue: 2, Apr 2002, Page(s): 544 -549.*
- [188] Shyh-Jier Huang; Tsai-Ming Yang; Jiann-Tseng Huang, «FPGA realization of wavelet transform for detection of electric power system disturbances», *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 17 Issue: 2, Apr 2002, Page(s): 388 -394.*
- [189] Mokhtari, H.; Karimi-Ghartemani, M.; Iravani, M.R., «Experimental performance evaluation of a wavelet-based on-line voltage detection method for power quality applications», *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 17 Issue: 1, Jan 2002, Page(s): 161 -172.*
- [190] Hong-Tzer Yang; Chiung-Chou Liao, «A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system», *IEEE Trans. on Power Delivery, Volume: 16 Issue: 3, Jul 2001, Page(s): 353 -360.*
- [191] Karimi, M.; Mokhtari, H.; Iravani, M.R., «Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications», *IEEE Trans. on Power Delivery, Volume: 15, Issue: 4, Oct 2000, Page(s): 1212 -1220.*
- [192] Olivier Poisson, Pascal Rioual, and Michel Meunier, «Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000.*
- [193] Santoso, S.; Grady, W.M.; Powers, E.J.; Lamoree, J.; Bhatt, S.C., «Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms», *IEEE Trans. on Power Delivery, Volume: 15 Issue: 1, Jan 2000, Page(s): 247.*
- [194] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Parsons, A.C., «Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. I. Theoretical foundation», *IEEE Trans. on Power Delivery, Volume: 15 Issue: 1, Jan 2000, Parts 1 & 2.*
- [195] M. Negnevitsky and Vitaly Faybisovich, «Discussion of “Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier—Part 1: Theoretical Foundation», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 4, October 2000.*
- [196] Gudar, U., Waje, V.B., «Analysis of harmonics in power system using wavelet transform», *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2012.*
- [197] Suresh K. Gawre, N.P.Patidar, R. K. Nema, «Application of wavelet Transform in power Quality: A Review», *International Journal of Computer Applications, Volume 39 - Number 18, 2012.*
- [198] Zhang Peng, Li Hong-Bin, «Power System Frequency Estimation Algorithm for Electric Energy Metering of Nonlinear Loads», *Metrology and Measurement Systems, Vol. XIX (2012), No. 2, pp. 307-320.*
- [199] Yanli Liu, Baochen Jiang, Chengyou Wang, Shengmin Geng, «Power System Harmonic Analysis Based on Windowed FFT and Wavelet Transform», *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2.*
- [200] T. Tarasiuk, «Method, algorithm and device for estimation of components above the harmonic frequency range up to 9 kHz», *ELSEVIER Measurement 44*, p. 219–229, 2011.
- [201] R.G. Stockwell, «A basis for efficient representation of the S-transform», *Digital Signal Processing 2006.*
- [202] C. Robert Pinnegar and Lalu Mansinha, «The S -transform with windows of arbitrary and varying shape», *Geophysics, Vol. 68, No. 1 (January-February 2003); P. 381–385.*
- [203] Navid Eghtedarpour, Ebrahim Farjah, and Alireza Khayatian, «Effective Voltage Flicker Calculation Based on Multiresolution S-Transform», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 27, No. 2, April 2012.*
- [204] S.R. Samantaray, B.K. Panigrahi, P.K. Dash and G. Panda, «Power transformer protection using S-transform with complex window and pattern recognition approach», *IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 1, No. 2, March 2007.*
- [205] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, «Power Quality Analysis Using S–Transform», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 18, No. 2, April 2003.*
- [206] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, D. K. Sahoo, and G. Panda, «Power Quality Disturbance Data Compression, Detection, and Classification Using Integrated Spline Wavelet and S-Transform», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.18, No. 2, April 2003.*
- [207] I. W. C. Lee and P. K. Dash, «S-Transform-Based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance Signals», *IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 50, No. 4, August 2003.*
- [208] M. V. Chilukuri and P. K. Dash, «Multiresolution S-Transform-Based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 19, No. 1, January 2004.*
- [209] Ming Zhang, Kai-Cheng, Wei-Bing Hu, «Automated Classification of Power Quality Disturbances using the S-Transform», σε *Proceedings of the 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Hong Kong, 30-31 Aug. 2008.*
- [210] A. Rodríguez, J. Aguado, J.J. López, F. Martín, F. Muñoz, and J.E. Ruiz, «Time-Frequency Transforms

- Comparison for Power Quality Analysis», *5th International Conference on European Electricity Market, 2008*.
- [211] Fengzhan Zhao and Rengang Yang, «Power-Quality Disturbance Recognition Using S-Transform», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.22, No.2, April 2007*.
- [212] Mohammed E. Salem, Azah Mohamed, Salina Abdul Samad, Iskandar Yahya, «Software Tool for Real Time Power Quality Disturbance Analysis and Classification», *5th Student Conference on Research and Development –SCORED 2007, 11-12 December 2007*.
- [213] Maya Nayak, Bhawani Sankar Panigrahi, «Advanced Signal Processing Techniques for Feature Extraction in Data Mining», *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 19– No.9, April 2011*.
- [214] Rodríguez, Alejandro; Aguado, José Antonio; López, José Jesús; Martín, Francisco I.; Muñoz, Francisco; Ruiz, Jose Ernesto, «Time-Frequency Transforms for Classification of Power Quality Disturbances», *Βιβλιοθήκη Πανεπιστημίου Μάλαγα, 2011*.
- [215] P. T. Rajan, Dharmishtan K. Varugheese, «Wind Power Quality Analysis using S-Transform and Wavelet Transform», *European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.73 No.4 (2012), pp. 555-564, 2012*.
- [216] M. Feldman, «Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration», *Wiley & Sons publication 2011, ISBN 978-0-470-97827-6*.
- [217] Ioannis Tsoumas, George Georgoulas, Athanasios Safacas, George Vachtsevanos, «Empirical Mode Decomposition of the Stator Start-up Current for Rotor Fault Diagnosis in Asynchronous Machines», *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*.
- [218] Yong Huang, Yongqiang Liu, Zhiping Hong, «Detection and Location of Power Quality Disturbances Based on Mathematical Morphology and Hilbert-Huang Transform», *The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009*.
- [219] N. Senroy and S. Suryanarayanan, «Two Techniques to Enhance Empirical Mode Decomposition for Power Quality Applications», *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007*.
- [220] Stuti Shukla, S. Mishra and Bhim Singh, «Empirical-Mode Decomposition With Hilbert Transform for Power-Quality Assessment», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009*.
- [221] G. Rilling, P. Flandrin and P. Goncalves, «On empirical decomposition and its algorithms», *IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Processing, Grado, Italy, 2003*.
- [222] Gabriel Rilling and Patrick Flandrin, «One or Two Frequencies? The Empirical Mode Decomposition Answers», *IEEE Trans. On Signal Processing, Vol. 56, No. 1, January 2008*.
- [223] M. Feldman, «Analytical basics of the EMD: Two harmonics decomposition», *Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009), 2059-2071*.
- [224] E.A.Feilat, «Detection of Voltage Envelope Using Prony Analysis–Hilbert Transform Method», *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, No. 4, October 2006*.
- [225] Z.K. Peng, Peter W. Tse, F.L. Chu, «An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis», *Journal of Sound and Vibration 286 (2005) 187-205*.
- [226] Patrick Flandrin, Gabriel Rilling and Paulo Gonçalves, «Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank», *IEEE Signal Processing Letters, Vol. 11, No. 2, February 2004*.
- [227] Oumar Niang, Eric Delechelle and Jacques Lemoine, «A Spectral Approach for Sifting Process in Empirical Mode Decomposition», *IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.58, Issue 11, Date of Publication: Nov. 2010, Page(s): 5612 – 5623*.
- [228] Ting Wang, Gang Liu, «An Improved Method to Solve the End Effect of EMD and its Application on Vibration Signal», *Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2009*.
- [229] Dong-liang Guo, Tie-jun Zhang, Xian-hua Dai, «An Improved method dealing with the End Effect of Hilbert-Huang Transform», *Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing 2010*.
- [230] Baoping Tang, Shaojiang Dong, Tao Song, «Method for eliminating mode mixing of empirical mode decomposition based on the revised blind source separation», *Signal Processing 92 (2012) 248–258*.
- [231] Yi Qin, Baoping Tang, Jiayu Wang, Xiao Ke, «A new method for multicomponent signal decomposition based on self-adaptive filtering», *Measurement 44 (2011) 1312–1327*.
- [232] Jose L. Sancheza and Juan J. Trujillo, «Improving the empirical mode decomposition method», *Taylor & Francis Group, Applicable Analysis Vol. 90, Nos. 3–4, March–April 2011, 689–713*.

- [233] Yanli Yang, Jiahao Deng and Caipeng Wu, «Analysis of Mode Mixing Phenomenon in the Empirical Mode Decomposition Method», Second International Symposium on Information Science and Engineering, 2009.
- [234] Xu Guanlei, Wang Xiaotong, Xu Xiaogang, «Time-varying frequency-shifting signal-assisted empirical mode decomposition method for AM/FM signals», *Mechanical Systems and Signal Processing* 23 (2009) 2458–2469.
- [235] Hong Hong, Xinlong Wang and Zhiyong Tao, «Local Integral Mean-Based Sifting for Empirical Mode Decomposition», *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 16, No. 10, October 2009.
- [236] Zhihua Yang, Lihua Yang, «An Improved Empirical Mode Decomposition», 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 2009.
- [237] R. Deering, J.F. Kaiser, «The use of a masking signal to improve empirical mode decomposition», *Proc. of IEEE International Conf. on Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP'05)*, vol. 4, pp.485-488, 2005.
- [238] M. R. Osborne, G.K.Smyth, «A modified Prony algorithm for exponential function fitting», *SIAM Journal on Scientific Computing* 1995, Vol. 16, Issue 1, doi 10.1137/0916008.
- [239] K. Holmstrom, J. Petersson, «A review of the parameter estimation problem of fitting positive exponential sums to empirical data», *Applied Mathematics and Computation* 126 (2002), 31-61.
- [240] Li Qi, Lewei Qian, Stephen Woodruff, and David Cartes, «Prony Analysis for Power System Transient Harmonics», *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume 2007*, Article ID 48406, 12 pages, doi:10.1155/2007/48406.
- [241] A. Andreotti, A. Bracale, P. Caramia and G. Carpinell, «Adaptive Prony Method for the Calculation of Power-Quality Indices in the Presence of Nonstationary Disturbance Waveforms», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 24, No. 2, April 2009.
- [242] Gary W. Chang and Cheng-I Chen, Member, «An Accurate Time-Domain Procedure for Harmonics and Interharmonics Detection», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, July 2010.
- [243] Jarosław Zygarlicki, Janusz Mroczka, «Variable Frequency Prony method in the Analysis of Power Quality», *Polish Metrology and Measurement Systems*, Vol. XIX (2012), No. 1, pp. 39-48.
- [244] Cheng-I Chen and Gary W. Chang, «An Efficient Prony-Based Solution Procedure for Tracking of Power System Voltage Variations», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.: 60, Issue: 7, July 2013.
- [245] Reza, M.S., Ciobotaru, M.; Agelidis, V.G., «Power quality analysis using piecewise adaptive Prony's Method», *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2012.
- [246] P. Janik, T. Lobos, J. Rezmer, «Assessment of transients in power system with wind generators by application of Prony method», *CIREC 19th International Conference on Electricity Distribution Vienna, 21-24 May 2007*, Paper 0225.
- [247] P. Janik, J. Rezmer, P. Ruczewski, Z. Waclawek, T. Lobos, «Adaptation of SVD and Prony Method for precise computation of current components in networks with wind generation», *International Conference on Clean Electrical Power*, 2009.
- [248] D. Wang, Y. Lu, «The signal subspace decomposition method for extracting harmonic signal», *IEEE Inform. Theory Workshop (2006)* 714–717.
- [249] R. Roy, T. Kailath, «ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques», *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal* 37 (1989) 984–995.
- [250] Irene Yu-Hua Gu and Math H. J. Bollen, «Estimating Interharmonics by Using Sliding-Window ESPRIT», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, January 2008.
- [251] Sachin K. Jain and S. N. Singh, «Exact Model Order ESPRIT Technique for Harmonics and Interharmonics Estimation», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 7, July 2012.
- [252] T. Lobos, Z. Leonowicz, J. Rezmer, «Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods», *Int. Conf. on Harmonics And Quality Of Power*, pp. 335–340, Orlando, Florida, USA, 2000.
- [253] A. Bracale, G. Carpinelli, «An ESPRIT and DFT-based new method for the waveform distortion assessment in power systems», *20th Int. Conf. and Exhibition on Electricity Distribution, CIREC, 2009*, pp. 1–4.
- [254] C. Tao, D. Shanxu, R. Ting, L. Fangrui, «A robust parametric method for power harmonic estimation based on M-estimators», *Measurement* 43 (2010) 67–77.
- [255] Iman Sadinezhad and Vassilios G. Agelidis, «Frequency Adaptive Least-Squares-Kalman Technique for

- Real-Time Voltage Envelope and Flicker Estimation», *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 8, August 2012.
- [256] Neslihan Köse, Özgül Salor, Kemal Leblebicioğlu, «Interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation using Kalman filtering», *Electric Power Systems Research*, Volume 80, Issue 9, September 2010, Pages 1145–1153.
- [257] H. Ma, A.A. Girgis, «Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 11 (1996) 1659–1665.
- [258] S Liu, «An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals», *Int. Conf. on Harmonics And Quality of Power*, pp.636–640, Athens, Greece, 1998.
- [259] M.A. Mostafa, «Kalman filtering algorithm for electric power quality analysis: harmonics and voltage sags problems», *Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. (2007)* 159–165.
- [260] J.A.R. Macias, A.G. Exposito, «Self-tuning of Kalman filters for harmonic computation», *IEEE Trans. On Power Delivery* 21 (2006) 501–503.
- [261] P.K. Dash, A.K. Pradhan, G. Panda, «Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter», *IEEE Trans. On Power Delivery* 14 (1999) 761–766.
- [262] K. Kennedy, G. Lightbody, R. Yacamini, «Power system harmonic analysis using the Kalman filter», *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2 (2003)* p757.
- [263] C.I. Chen, G.W. Chang, R.C. Hong, H.M. Li, «Extended real model of Kalman filter for time-varying harmonics estimation», *IEEE Trans. On Power Delivery* 25 (2010) 17–26.
- [264] Sang-Wook Sohn, Young-Bin Lim, Jae-Jun Yun, Hun Choi, and Hyeon-Deok Bae, «A Filter Bank and a Self-Tuning Adaptive Filter for the Harmonic and Interharmonic Estimation in Power Signals», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, VOL. 61, Issue 1.
- [265] H. Mori, K. Itou, H. Uematsu, S. Tsuzuki, «An artificial neural-network based method for predicting power system voltage harmonics», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 7, 1992, 402–409.
- [266] H.C. Lin, «Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection», *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 54, 2007, 43–52.
- [267] B. Swiatek, M. Rogoz, Z. Hanzelka, «Power system harmonic estimation using neural networks», *Int. Conf. Electr. Power Quality Utilisation (2007)* 1–8.
- [268] L. Qian-jin, Q. Si-shi, «A DFP-neural networks algorithm for analysis of power system harmonics», *Power Energy Eng. Conf. (2010)* 1–4.
- [269] C.F. do, A.A. de, A. Goedtel, P.J. Amaral, «Harmonic identification using parallel neural networks in single-phase systems», *Appl. Soft Comp.* 11 (2011) 2178–2185.
- [270] H. Temurtas, F. Temurtas, «An application of neural networks for harmonic coefficients and relative phase shifts detection», *Expert Syst. Appl.* 38 (2011) 3446–3450.
- [271] P.K. Dash, D.P. Swain, A.C. Liew, S. Rahman, «An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics», *IEEE Trans. On Power Systems* 11, (1996) 1730–1735.
- [272] Arghya Sarkar, S. Roy Choudhury, S. Sengupta, «A self-synchronized ADALINE network for on-line tracking of power system harmonics», *Measurement* 44 (2011) 784–790.
- [273] IEEE Std.1547, «IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems», *IEEE Standards Coordinating Committee 21*, July 2003.
- [274] IEC 61000-4-1, International Standards, «Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-1: Testing and Measurement Techniques - Overview of IEC 61000-4 series», *Edition 3*, 2006-10.
- [275] IEC 61000-4-15, «EMC - Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications», *International Standard*, Ed.2.0 2010-08.
- [276] Massimo Aiello, Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino and Salvatore Nuccio, «Synchronization Techniques for Power Quality Instruments», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 56, No. 5, October 2007.
- [277] Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino, Salvatore Nuccio, «A Phase-Locked Loop for the Synchronization of Power Quality Instruments in the Presence of Stationary and Transient Disturbances», *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 56, No. 6, December 2007.
- [278] Iman Sadinezhad and Vassilios G. Agelidis, «A New Optimization Technique to Measure Frequency and Harmonics in Power Systems», *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2010.
- [279] L. Ferrigno, C. Landi, M. Laracca, C. Luongo, «A Study on the Feasibility and Effectiveness of Digital

- Filters Approach for Power Quality Monitoring in Compliance with IEC 61000-4-7», *15th IMEKO TC4 Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentation*, 2007.
- [280] Julio Barros and R.I. Diego, «Effects of Windowing on the Measurement of Harmonics and Interharmonics in the IEC Standard Framework», *IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento, Italy 24-27, April 2006*.
- [281] S. T. Tentzerakis, V.A. Riziotis, S.A. Papathanassiou and S.G. Voutsinas, «Evaluation of a variable speed strategy for class I stall regulated wind turbines», *European Wind Energy Conf. (EWEC) 1999, Nice, France*.
- [282] J. Holtz, «Pulsewidth modulation for electronic power conversion», *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1194–1214, Aug. 1994.
- [283] L. Morhn, P. D. Ziogas, and G. Joos, «Design aspects of synchronous pwm rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 6, pp. 1286–1293, Nov./Dec. 1992.
- [284] Y. Suh and T. A. Lipo, «Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for pwm AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 3, pp. 825–835, May/Jun. 2006.
- [285] F. Gakis and S. Papathanassiou, «Simple control schemes for grid-connected three-phase voltage-source inverters of DG units», *Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM) 2006, Chania, Greece*.
- [286] E. Twining and D. G. Holmes, «Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter», *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 888–895, May 2003.
- [287] J S Bendat and A G Piersol, Random Data Analysis and Measurement Procedures, *John Wiley and Sons 2010, ISBN 978-0-470-24877-5*.
- [288] F. Santjer and R. Klosse, «Influence of transformers on harmonics», *European Wind Energy Conf. (EWEC) 2003, Madrid, Spain*.
- [289] IEC 61800-3, «Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods».
- [290] J. Rissanen, «An Introduction to the MDL Principle», Available on-line in <http://www.mdl-research.org>, 2005.
- [291] Y. Baghzouz et al., «Time-Varying Harmonics: Part II – Harmonic Summation and Propagation», *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.17, No.1, January 2002.
- [292] A. Russo, P. Varilone, «Discussion of Time-Varying Harmonics: Part II – Harmonic Summation and Propagation», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.18, No.2, Apr 2003.
- [293] A. Cavallini, R. Langella, A. Testa, F. Ruggiero, «Gaussian modeling of harmonic vectors in power systems», *Proc. IEEE 8th Int. Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, 1998*.
- [294] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, «Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 11, No 1, January 1996.
- [295] C. Li, W. Xu, T. Tayjasanant, «A "critical impedance"-based method for identifying harmonic sources», *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol. 19, No. 2, April 2004.
- [296] W. Xu, X. Liu, Y. Liu, «An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination», *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol. 18, No 1, Jan 2003.
- [297] M. Ippolito, G. Morana, F. Russo, «A contribution to solve the problem of attributing harmonic distortion responsibility», *CIGRE 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, June 2005*.
- [298] K. Srinivasan, «On separating customer and supply side harmonic contributions», *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol. 11, No. 2, April 1996.
- [299] Chun Li, Wilsun Xu, «On Defining Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling», *IEEE Power Eng. Rev.* Vol. 22, No. 7, July 2002.
- [300] Wilsun Xu, «On the validity of the power direction method of identifying harmonic source locations», *IEEE Power Eng. Rev.*, Vol. 20, Jan 2000.
- [301] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, T. Tayjasanant, «Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems», *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol. 19, No. 1, Jan. 2004.
- [302] Σύμμετρον Ηλεκτρονικές Εφαρμογές, «User's manual for THALES Power Quality Measurement System», www.symmetron.gr.

[303] ΚΑΠΕ, «User's manual for the CRESDAQ Data Acquisition program».

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Περιοδικά:

- [1] S.T.Tentzerakis, S.A.Papathanassiou, “*An Investigation on the Harmonic Emission of Wind Turbines*”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Volume 22, Issue 1, March 2007. (27 Citations)
- [2] S.T. Tentzerakis, S.A. Papathanassiou, “*Application of Advanced Harmonic Analysis Techniques to Wind Turbines*”, υπό κρίση στο περιοδικό IEEE Trans. On Energy Conversion, Ιούλιος 2013.

Συνέδρια:

- [1] S. Tentzerakis, N. Paraskevopoulou, S. Papathanassiou and P. Papadopoulos, “*Measurement of Wind Farm Harmonic Emissions*”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2008, Rhodes, Greece. (5 Citations)
- [2] S. Tentzerakis, S. Papathanassiou, P. Papadopoulos, D. Foussekis, P. Vionis, “*Evaluation of Wind Farm Harmonic Current Emissions*”, EWEC 2007, May 2007, Milan, Italy. (1 Citation)
- [3] M.P.Papadopoulos, S.A.Papathanassiou, S.T.Tentzerakis, N.G.Boulaxis, “*Investigation of the Flicker Emission by Grid Connected Wind Turbines*”, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, October 1998, Athens, Greece. (12 Citations)
- [4] D. Foussekis, F. Kokkalidis, S.Tentzerakis, D.Agoris, “*Power Quality Measurements on Different Types of Wind Turbines operating in the same Wind Farm*”, EWEC 2003, Madrid, Spain. (1 Citation)
- [5] S.T.Tentzerakis, V.A.Riziotis, S.A.Papathanassiou, S.G.Voutsinas, "Evaluation of a Variable Speed Strategy for a Class I Wind Turbine", EWEC'99, March 1999, Nice, France. (5 Citations)
- [6] M.P. Papadopoulos, S.A. Papathanassiou, S.T. Tentzerakis, “*Modelling of induction machine main flux saturation in the arbitrary reference frame - A case study on wind turbine self-excitation*”, ICEM'96, September 1996, Vigo, Spain. (2 Citations)
- [7] S.A.Papathanassiou, M.Tziantzi, M.P.Papadopoulos, S.T.Tentzerakis, P.S.Vionis, “*Possible benefits from the combined operation of wind parks and pumped storage stations*”, EWEC 2003, Madrid, Spain. (4 Citations)
- [8] Σ. Τεντζεράκης, Κ. Ρώσσης, Σ. Παπαθανασίου, «*Εφαρμογή του νέου προτύπου IEC 61400-21/2008 για τη σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο*», 4^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Μάιος 2010, Αθήνα.
- [9] Papadopoulos P., Tentzerakis S., Binopoulos E., Mouzakis F., Foussekis D., «*Integrated mechanical load and electrical monitoring on wind turbine drive trains*», EWEC 2008, Brussels, Belgium.
- [10] Σ. Τεντζεράκης, «*Πιστοποίηση μικρών ανεμογεννητριών: Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές*», Πρακτικά 6^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου ENERTECH 2011, Αθήνα 29/9 – 1/10/2011
- [11] M.P.Papadopoulos, S.A.Papathanassiou, S.T.Tentzerakis, “*Dynamic Behavior of Wind Turbines during Unsymmetrical Faults on the Grid*”, ICEM'98, September 1998, Istanbul, Turkey. (1 Citation)
- [12] F. Mouzakis, G. Larsen, S. Tentzerakis, P. Vionis, “*Critical Wind Speed Gusts Identification in Complex Terrain Using Advanced Windowing Technique*”, EWEC 2003, Madrid, Spain.
- [13] N.Stefanatos, F. Kokkalidis, S.Tentzerakis, E. Binopoulos, “*Power Performance Verification in Complex Terrain*”, EWEC 2004, London, UK.
- [14] M.P. Papadopoulos, S.A. Papathanassiou, S.T. Tentzerakis, “*Operating problems in wind-diesel power systems with extended MV networks*”. EWEC'96, May 1996, Goteborg, Sweden.
- [15] N. Hatziaergyriou, M.Papadopoulos, S. Tentzerakis, “*Control requirements for optimal operation of large isolated systems with increased wind power penetration*”, EWEC'97, October 1997, Dublin, Ireland.
- [16] M.P.Papadopoulos, S.A.Papathanassiou, N.G.Boulaxis, S.T.Tentzerakis, "Voltage quality change by grid-connected Wind Turbines", EWEC'99, March 99, Nice, France.
- [17] Tselepis, S., Tentzerakis, S., Lymberopoulos, N., Chaviaropoulos, P., Agoris, “*Distributed Energy Resources*”, CIGRE, Study Committee WG D1.18: Materials and emerging technologies, 31st August - 5th September 2003, Turku, Finland.
- [18] Cano, C. Tentzerakis, S.T. Kladas, A.G. Tegopoulos, J.A., “*Analysis of the influence of asynchronous generator rotor parameters on wind turbine operating characteristics*”, ICEMS 2001, China.

- [19] M.P.Papadopoulos, S.A.Papathanassiou, N.G.Boulaxis, S.T.Tentzerakis, "*Voltage quality change by grid-connected Wind Turbines*", CIRED'99, June 99, Nice, France.
- [20] M.P.Papadopoulos, A.I.Androutsos, N.G.Boulaxis, S.T.Tentzerakis, "*Limits of Wind Turbines penetration in small electric power systems*", The European Congress on Renewable Energy Implementation, May 1997, Athens, Greece.
- [21] M.P.Papadopoulos, A.I.Androutsos, N.G.Boulaxis, S.T.Tentzerakis, "*Penetration Limits of Wind Turbines in Electric Power Systems of Islands*", POWER-GEN'98, June 1998, Milano, Italy.
- [22] S. Tentzerakis et. al. "*Preliminary results on the use of renewable energy sources in commercial Mediterranean fish hatcheries*", International Conference on Ecological Protection of the Planet Earth, Democritus University of Thrace, Greece 2001.