



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

**Μελέτη αρμονικών σε δίκτυα χαμηλής τάσης με υψηλή
διείσδυση φωτοβολταϊκών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κουβελιώτης – Λυσίκατος Ιάσωνας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



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

Μελέτη αρμονικών σε δίκτυα χαμηλής τάσης με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κουβελιώτης – Λυσίκατος Ιάσωνας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....
Κουβελιώτης – Λυσίκατος Ιάσωνας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κουβελιώτης – Λυσίκατος Ιάσωνας, 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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το πρόβλημα των αρμονικών σε δίκτυα χαμηλής τάσης στα οποία υπάρχει υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Σε πρώτη φάση διερευνάται ο μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η εισαγωγή των αρμονικών στη τάση σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο λόγω του παραμορφωμένου ρεύματος που καταναλώνουν ή εγχύουν μη γραμμικές ηλεκτρικές διατάξεις. Παράλληλα, εξετάζονται τα προβλήματα που μπορούν να προκληθούν σε ένα δίκτυο του οποίου η τάση είναι "μολυσμένη" με αρμονικές, αλλά και οι τρόποι με τους οποίους αυτές περιορίζονται.

Το πρόβλημα προσανατολίζεται σε συγκεκριμένες ηλεκτρικές διατάξεις οι οποίες αποτελούν βασική λειτουργική μονάδα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που συνδέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για τους αντιστροφείς, το παραγόμενο ρεύμα των οποίων έχει εκ των πραγμάτων αξιόλογη αρμονική παραμόρφωση.

Στη συνέχεια, γίνεται μία αναθεώρηση των προτύπων ποιότητας ισχύος από την πλευρά των επιτρεπόμενων εκπομπών αρμονικών ρεύματος αλλά και των προδιαγραφών ποιότητας ισχύος (με έμφαση στις αρμονικές) που πρέπει να πληρεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο επόμενο στάδιο, αναλύεται σε θεωρητικό επίπεδο ο μηχανισμός δημιουργίας αρμονικών στην τάση από πηγές αρμονικών ρεύματος σε δίκτυα χαμηλής τάσης.

Τα πειράματα που διενεργούνται έχουν ως σκοπό τον εντοπισμό των παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την ένταση των εκπεμπόμενων αρμονικών στον εργαστηριακό αντιστροφέα και για αυτό γίνονται καταγραφές των εκπεμπόμενων αρμονικών του σε διάφορες τιμές αποδιδόμενης ισχύος. Επίσης μελετώνται οι εκπομπές του με πειράματα τεχνητής παραμόρφωσης της τάσης στην οποία συνδέεται. Παράλληλα, διενεργούνται μετρήσεις αρμονικών σε συχνότητες μεγαλύτερες από αυτές που καλύπτουν τα πρότυπα emc (μεγαλύτερες από 2kHz). Τέλος, καταμετρώνται οι φασικές γωνίες των αρμονικών ρεύματος σε όμοιους αντιστροφείς και διερευνάται η σχέση μεταξύ των γωνιών ίδιων τάξεων.

Στο τελικό στάδιο της εργασίας, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε Η/Υ με το λογισμικό PSCAD-EMTDC. Στα πλαίσια της μελέτης αρμονικών, μοντελοποιούνται δίκτυα χαμηλής τάσης (με έμφαση στα αγροτικά δίκτυα) στα οποία εισάγονται μοντέλα αρμονικών πηγών κατ' αντιστοιχία με την διείσδυση των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων στα αντίστοιχα πραγματικά δίκτυα χαμηλής τάσης. Οι πηγές αρμονικών που επιστρατεύονται για τη μελέτη είναι, αρχικά πηγές ρεύματος με εκπομπή αρμονικών σταθερών πλατών και φασικών γωνιών, μετρημένες κυματομορφές πραγματικών αντιστροφέων και στο τέλος πλήρης μοντελοποίηση μονοφασικού αντιστροφέα.

Οι προσομοιώσεις ορίζονται από ποικίλα σενάρια διαφορετικών χαρακτηριστικών (δικτύων, φορτίων και πηγών αρμονικών) με απώτερο σκοπό τόσο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ένταση του προβλήματος

των αρμονικών, λόγω της διεξόδου Φ/Β σε δίκτυα Χ.Τ., όσο και την εγκυρότητα των διαφορετικών μοντελοποιήσεων των πηγών αρμονικών.

Λέξεις κλειδιά: φωτοβολταϊκά συστήματα, αρμονικές, εκπομπές αρμονικών αντιστροφέα, προσομοίωση αρμονικών, μετρήσεις αρμονικών, μοντέλο μονοφασικού αντιστροφέα, μοντέλα πηγών αρμονικών, PSCAD

Abstract

In the current diploma thesis, it is examined the problem of harmonics in low voltage electrical networks with high penetration of photovoltaic systems.

In the first place it's investigated the mechanism of harmonic generation in the networks voltage due to the distorted current that a non linear electrical device consumes or injects. Furthermore, problems that can occur in a network whose voltage is "polluted" as long as ways of harmonic mitigation are addressed.

The harmonic problem is studied for specific electrical devices which are the basic functional units of the photovoltaic grid-connected plants. These are the power inverters of which the output current is in fact remarkably distorted.

Thereafter, the power quality standards are evaluated from the perspective of allowable harmonic current emission of an electrical device but also for the requirements (focusing on voltage harmonics) that an electrical grid must meet.

In the next stage, a theoretical analysis is performed, regarding the harmonic voltage generation mechanism due to harmonic current sources in low voltage networks.

The experiments which are conducted aim to the identification of the parameters that affect the intensity of the emitted current harmonics of the laboratory inverter and for this reason harmonic current emissions are measured in various values of its output power. Also, it is studied the inverter harmonic current emission by technically polluting (with voltage harmonics), the voltage that it is being connected. Still, harmonics at frequencies higher than the standards are covering (greater than 2kHz) are measured. Finally, the phase angles of current harmonics in inverters of the same type are measured and it is being investigated the relation between angles of the same order.

In the final stage of the thesis, simulations are performed using the PSCAD-EMTDC software. In the context of a harmonic study, low voltage networks are modeled (emphasizing on rural networks) with harmonic sources in correspondence with the penetration of PV inverters in actual low voltage networks. The harmonic sources utilized for this study are, firstly Rigid harmonic sources (with fixed current harmonic amplitudes and phase angles), measured waveforms from actual inverters and finally a fully modeled single-phase inverter.

The simulations are defined by a variety of scenarios with different characteristics (network loads and sources of harmonics) with the aim of drawing conclusions as to the intensity of the problem of harmonics due to the penetration of photovoltaic in LV networks, as long as the validity of different modeling of harmonic sources.

Key words: photovoltaic systems, harmonics, inverter harmonic emission, harmonic simulation, harmonic measurement, single-phase inverter modeling, harmonic sources modeling, PSCAD

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο για τις υποδείξεις του, την καθοδήγησή του αλλά και για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής αλλά και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π., για τη δυνατότητα που μου παρείχε να χρησιμοποιήσω το λογισμικό PSCAD-EMTDC αλλά και τον κ. Σταύρο Παπαθανασίου, επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., για τις χρήσιμες υποδείξεις του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστώ θερμά τους Αλέξανδρο Ρήγα και Βασίλειο Κλεφτάκη, διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Η/Υ Ε.Μ.Π., για τη βοήθειά τους στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη της οικογένειάς μου αλλά και τους φίλους μου, για την αμέριστη συμπαράστασή τους αλλά και για την κατανόηση που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαιτέρως τους τελευταίους μήνες της προσπάθειάς μου, και να τους αφιερώσω αυτή την εργασία.

Περιεχόμενα

1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μετατροπή ισχύος και διείσδυση στο δίκτυο.....	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	15
1.2.1 Ιστορική αναδρομή.....	15
1.2.2 Λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας.....	16
1.3 Μετατροπή ισχύος.....	18
1.3.1 Ηλεκτρονικά ισχύος.....	19
1.3.2 Αντιστροφείς (inverters).....	19
1.3.3 Αρχή λειτουργίας αντιστροφών.....	19
1.3.3.1 Τύποι αντιστροφών.....	20
1.3.3.2 Έλεγχος αντιστροφών.....	22
1.3.3.3 Φίλτρα εξόδου αντιστροφών.....	24
1.4 Διεσπαρμένη παραγωγή και μικροδίκτυα.....	25
2. Ποιότητα ισχύος.....	28
2.1 Εισαγωγή στην ποιότητα ισχύος.....	28
2.2 Ηλεκτρική ισχύς σε καθαρά ημιτονοειδείς συνθήκες.....	28
2.2.1 Επέκταση του ορισμού της ηλεκτρικής ισχύος.....	29
2.3 Κατηγοριοποίηση προβλημάτων Ποιότητας ισχύος.....	31
2.4 Αρμονικές.....	38
2.4.1 Δημιουργία των αρμονικών.....	38
2.4.2 Πηγές των αρμονικών.....	40
2.4.3 Προβλήματα που δημιουργούν οι αρμονικές.....	42
2.4.4 Αντιμετώπιση των αρμονικών.....	43
2.5 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (emc).....	48
3. Πρότυπα προδιαγραφών και ορίων της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος και κανονισμοί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (emc).....	50
3.1 Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	50
3.2 Πρότυπα ποιότητας τάσης.....	50
3.2.1 Πρότυπο EN 50160.....	51
3.3 Πρότυπα ποιότητας ρεύματος.....	55
3.3.1 Πρότυπο IEC 61000.03.02.....	55
3.3.2 Πρότυπο IEC 61000.03.12.....	57
3.3.3 Πρότυπο IEC 61727.....	57
3.3.4 Όρια αρμονικών της ΔΕΗ για την σύνδεση φωτοβολταϊκών αντιστροφών έως 10kW στη χαμηλή τάση.....	58
3.4 Μετρήσεις ποιότητας ισχύος.....	59
3.4.1 Πρότυπα μέτρησης αρμονικών.....	59
3.4.2 Διαδικασία μέτρησης αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα που προτείνεται από το DERlab.....	60
3.5 Αρμονικές στο εύρος συχνοτήτων 2kHz-150kHz.....	62
4. Θεωρητική ανάλυση των αρμονικών.....	63

4.1	Ανάλυση των αρμονικών.....	63
4.2	Γραφική αναπαράσταση των αρμονικών.....	65
4.2.1	Αναπαράσταση των αρμονικών ως διανύσματα.....	65
4.3	Κυκλώματα αρμονικών σε δίκτυα Χ.Τ.....	65
4.3.1	Κυκλωματική αναπαράσταση απλού δικτύου χαμηλής τάσης.....	66
4.3.2	Εφαρμογή με ένα κόμβο έγχυσης αρμονικών σε δίκτυο Χ.Τ.....	67
4.3.3	Διερεύνηση αρμονικού αρμονικού κυκλώματος με περισσότερες πηγές αρμονικών.....	69
5.	Μέτρηση αρμονικών αντιστροφών μικροδικτύου.....	74
5.1	Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	74
5.2	Αντιστροφέας Sunny Boy 1100.....	74
5.3	Μετρήσεις αρμονικών του αντιστροφέα sunny boy 1100 σύμφωνα με τη διαδικασία του DERlab.....	76
5.4	Εξάρτηση παραμόρφωσης ρεύματος από την ισχύ λειτουργίας.....	85
5.5	Μετρήσεις αρμονικών συχνοτήτων > 2kHz.....	88
5.5.1	Μετρήσεις αρμονικών υψηλότερης τάξης μετά την τοποθέτηση πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση με τον αντιστροφέα.....	90
5.6	Μετατροπέας AC/DC/AC: προσομοιωτής δικτύου.....	92
5.6.1	Μετρήσεις αρμονικών σε κενό φορτίο.....	93
5.6.2	Μετρήσεις αρμονικών με ωμικό φορτίο.....	94
5.6.3	Μετρήσεις αρμονικών με ωμικό-επαγωγικό φορτίο και ωμικό-χωρητικό φορτίο.....	94
5.7	Σύνδεση αντιστροφέα σε PWM πηγή τάσης.....	96
5.7.1	Διερεύνηση της εξάρτησης της παραμόρφωσης της τάσης από τη παραμόρφωση του ρεύματος.....	97
5.8	Μέτρηση φασικών γωνιών αρμονικών αντιστροφών συνδεδεμένων σε διαφορετικές φάσεις.....	98
6.	Προσομοίωση αρμονικών σε Η/Υ με το λογισμικό PSCAD/EMTDC.....	102
6.1	Το λογισμικό PSCAD/EMTDC.....	102
6.2	Μέθοδοι προσομοίωσης αρμονικών.....	103
6.2.1	Μοντελοποίηση δικτύων χαμηλής τάσης.....	104
6.2.2	Μοντελοποίηση του Μ/Σ υποβιβασμού και της σύνδεσης με το δίκτυο μέσης τάσης.....	105
6.2.3	Μοντελοποίηση των γραμμών.....	106
6.2.4	Μοντελοποίηση των φορτίων.....	106
6.2.5	Μοντελοποίηση των αρμονικών πηγών.....	107
6.3	Μοντέλο αρμονικής πηγής με εκπομπή αρμονικών ρεύματος σταθερών χαρακτηριστικών.....	108
6.4	Μοντελοποίηση μονοφασικού PWM αντιστροφέα.....	109
6.5	Σενάρια προσομοιώσεων ηλεκτρικών δικτύων Χ.Τ. με διείδυση φωτοβολταϊκών inverter.....	115
6.5.1	Προσομοίωση με τις αρμονικές του εργαστηριακού Sunny Boy.....	115
6.5.2	Προσομοίωση με αρμονικές ρεύματος ακραίες τιμές που υπαγορεύει το πρότυπο IEC 61727.....	128
6.5.3	Προσομοίωση με πηγή αρμονικών την κυματομορφή ρεύματος που	

καταγράφηκε από τον αντιστροφέα SolarStar a6000.....	121
6.5.4 Προσομοιώσεις με πηγή αρμονικών μοντελοποιημένο αντιστροφέα.....	124
6.5.5 Προσομοίωση με σταθερή πηγή αρμονικών με τα πλάτη και τις φασικές γωνίες του μοντελοποιημένου αντιστροφέα για σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	128
7. Συμπεράσματα – Προοπτικές συνέχισης.....	131
Βιβλιογραφία.....	135

1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μετατροπή ισχύος και διείσδυση στο δίκτυο

1.1 Εισαγωγή

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειες είναι οι μη ορυκτές μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορους φυσικούς πόρους όπως η κινητική ενέργεια του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και άλλες. Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ότι είναι πρακτικά ανεξάντλητες καθώς επίσης και ότι για την εκμετάλλευσή τους, σε αντίθεση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση.

Με την αντικατάσταση επομένως των συμβατικών μορφών και την διείσδυση των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο επιτυγχάνεται μείωση της ρύπανσης του ήδη αρκετά βεβαρημένου φυσικού περιβάλλοντος. Οι ΑΠΕ θεωρούνται η λύση στο επερχόμενο ενεργειακό "αδιέξοδο" που πρόκειται να βρεθεί αντιμέτωπος ο ενεργοβόρος ανθρώπινος πολιτισμός από την αναμενόμενη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων μέσα στον επόμενο αιώνα^[1]. Για αυτούς τους λόγους τα τελευταία χρόνια διεξάγεται ολοένα και περισσότερη έρευνα για την καλύτερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευσή των ΑΠΕ.

Βέβαια, ένα σημαντικό ζήτημα που ανακύπτει είναι ότι οι ΑΠΕ, δεν έχουν τη δυνατότητα (μέχρι στιγμής τουλάχιστον) να αντικαταστήσουν πλήρως τις αντίστοιχες συμβατικές, δεν μπορούν δηλαδή να απεμπλέξουν πλήρως την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι ότι δεν μπορούν να είναι διαθέσιμες για εκμετάλλευση και συνεπώς για κατανάλωση τη στιγμή που υπάρχει ζήτηση, αλλά αντιθέτως η διαθεσιμότητα τους εξαρτάται από την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος, το κλίμα τη μορφολογία του εδάφους κ.ά. Για παράδειγμα δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια τη νύχτα ή την αιολική όταν δεν φυσάει.

Για τους ανωτέρω λόγους η έρευνα για την παραγωγή ενέργειας θα έπρεπε να στραφεί και σ' άλλες μορφές ενέργειας πέρα των "συμβατικών" ΑΠΕ οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό επίπεδο όπως για παράδειγμα, η πυρηνική σύντηξη, θερμή και ψυχρή. Ακόμη, σημαντικά μειονεκτήματα των ΑΠΕ είναι ότι δεν έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης (ο λόγος της αποδιδόμενης ενέργειας, προς την ενέργεια που απορροφούν από τη φύση). Αυτός αγγίζει συνήθως το 30%, κάτι που συνεπάγεται άμεσα ένα μεγάλο κόστος για την εγκατάστασή τους. Επίσης, οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ για παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα καταλαμβάνουν μεγάλες εδαφικές εκτάσεις συγκριτικά με τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις των συμβατικών.

Μια κατηγοριοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ακόλουθη^[3]:

- **Η αιολική**, η (κινητική) ενέργεια του ανέμου
- **Η ηλιακή**, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας
- **Η γεωθερμική**, η ενέργεια από το θερμικό δυναμικό της γης
- **Η υδραυλική**, οι μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μόνο θεωρούνται ανανεώσιμες (μέχρι 10MW)
- Η ενέργεια από τη **θάλασσα** η οποία έχει τις επόμενες κατηγορίες: την **ενέργεια από τα κύματα** (κινητική ενέργεια των κυμάτων), την **ενέργεια από τις παλίρροιες** (δυναμική, λόγω της βαρυτικής έλξης των ωκεανών της γης κυρίως από τη σελήνη) και την **ενέργεια από τους ωκεανούς** (θερμική, εκμετάλλευση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων του ωκεανού).
- τα **αέρια**, τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα **βιοαέρια - ενέργεια βιομάζας**.

Η αγορά ενέργειας είναι ο πιο σημαντικός τομέας της παγκόσμιας οικονομίας και ο ρόλος που έχει τόσο σε οικονομικό, πολιτικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο είναι κυρίαρχος. Συνεπώς η κατοχή και ο έλεγχος της παραγωγής ενέργειας συνεπάγονται ισχυρής εξουσίας.

Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό ενέργειας^[2] η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας για το έτος 2008 εκτιμήθηκε στα 132,000 TWh και σε σχέση με το έτος 1990 σημειώνεται αύξηση της τάξης του 40%. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού αλλά και παράλληλα, ο ολοένα και περισσότερο απαιτητικός σε ενέργεια μέσος καταναλωτής, σε συνδυασμό με την αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των αναπτυσσόμενων χωρών, ειδικά την τελευταία δεκαετία, αναδεικνύουν τη σημαντικότητα του ενεργειακού προβλήματος.

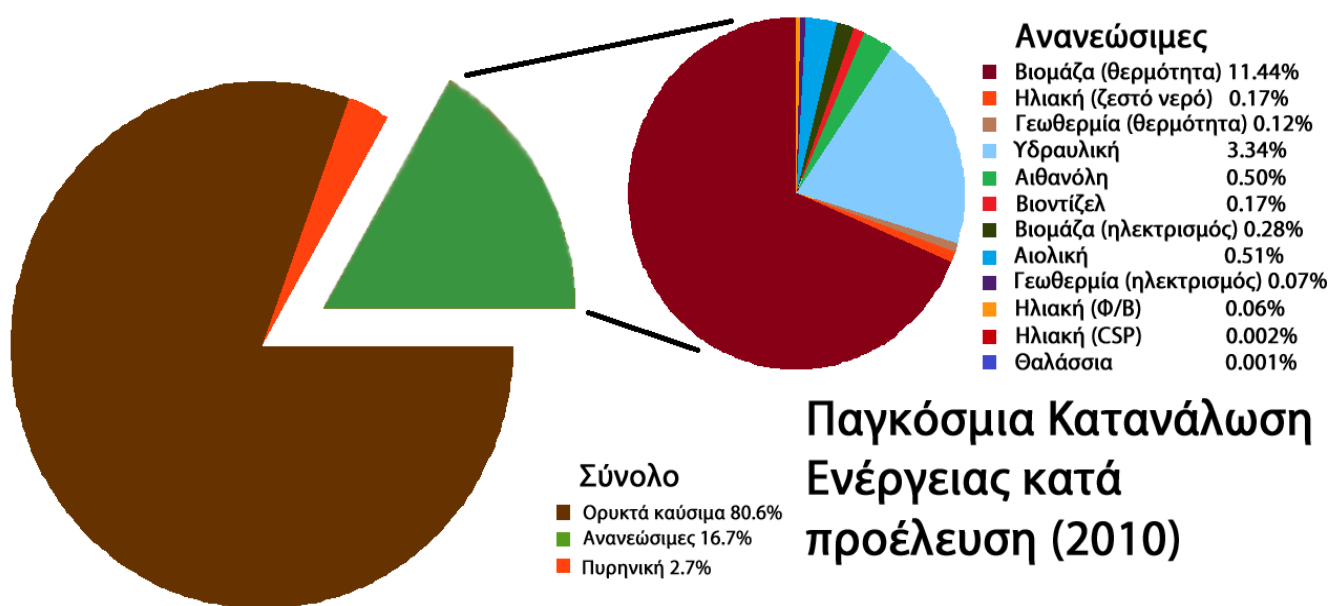
Η διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας για το έτος 2010 φτάνει περίπου στο 16.70%, εκ των οποίων ειδικά για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι το 4.26%, σε παγκόσμιο επίπεδο. Για την Ελλάδα εκτιμάται ότι το 2020 θα φτάσουν το 40% όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή και το 21% στην παραγωγή θερμότητας^[3]. Τα ποσοστά αυτά ανεβαίνουν διαρκώς, αφού με την εξέλιξη της τεχνολογίας πέφτει το κόστος του εξοπλισμού και αυξάνεται διαρκώς η αποδοτικότητά του.

Άλλοι λόγοι που η χρήση των ΑΠΕ επεκτείνεται είναι:

- τα οικονομικά κίνητρα μέσα από την μειωμένη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν,
- τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την μείωση των ρύπων στην παγκόσμια αγορά του διοξειδίου του άνθρακα.

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η κατηγοριοποίηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης σε πηγές προέλευσης. Ειδικά για το κομμάτι

των ΑΠΕ υπάρχει μια δεύτερη κατηγοριοποίηση ανάλογα με το είδος της αλλά και τη χρήση της.



Εικόνα 1-1: Πηγή: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

1.2 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Ως φωτοβολταϊκή γεννήτρια ορίζουμε την διάταξη η οποία μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Η λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αποτελεί τομέα συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης και η χρήση τους στην αντικατάσταση των συμβατικών μορφών ενέργειας εντείνεται εμφανώς τα τελευταία χρόνια. Τα Φ/Β συστήματα αποτελούν μια σύγχρονη και καλή λύση για την ηλεκτροδότηση περιοχών μη διασυνδεδεμένων με κάποιο κεντρικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.1 Ιστορική αναδρομή^[4]

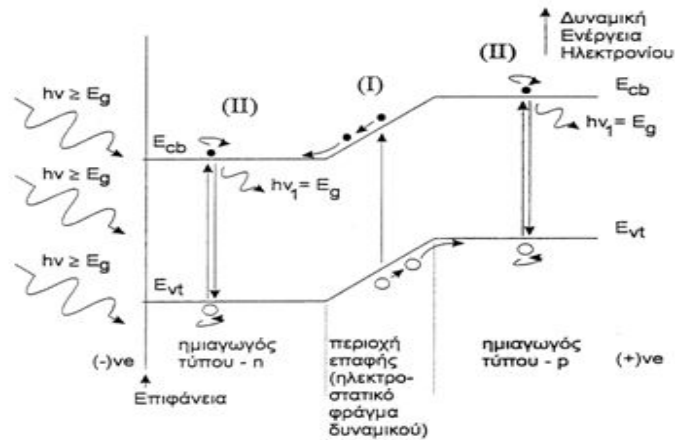
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτη φορά το 1839 σε μεταλλικά ηλεκτρόδια Pt, Ag μέσα σε ηλεκτρολύτη, ενώ το 1937 κατασκευάζεται το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από PbS (Fischer & Godden). Το 1939 κατασκευάζεται Φ/Β στοιχείο από Se με απόδοση 1%. Το πρώτο Φ/Β στοιχείο από Si (το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται ευρέως μέχρι και σήμερα τα Φ/Β) εμφανίζεται το 1941. Με τη σταδιακή εξέλιξη των Φ/Β στοιχείων φτάνουμε μέχρι το 1983, όπου λειτουργεί Φ/Β

σταθμός ισχύος 1MW στην Καλιφόρνια.

Σήμερα ο βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού Φ/Β συστήματος φτάνει το 13-15% αν και με την εξέλιξη της τεχνολογίας βελτιώνεται διαρκώς. Τα Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου αν και δεν είναι τα πιο αποδοτικά χρησιμοποιούνται λόγω χαμηλότερου κόστους κυρίως, σε εφαρμογές Φ/Β σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρχουν οι κατηγορίες: πολυκρυσταλλικού (mc-Si) και μονοκρυσταλλικού (sc-Si) πυριτίου καθώς και ταινία πυριτίου. Άλλα υλικά κατασκευής Φ/Β όπως το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) και το Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) εμφανίζουν πολύ υψηλότερους βαθμούς απόδοσης 29% και 16% αντίστοιχα, αλλά τροχοπέδη αποτελούν διάφορα ζητήματα, όπως η σπανιότητα ορισμένων από αυτά τα στοιχεία καθώς και ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο.

1.2.2 Λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας

Οι δομικές μονάδες μιας Φ/Β γεννήτριας είναι τα φωτοβολταϊκά ή ηλιακά στοιχεία (cells). Η λειτουργία των ηλιακών στοιχείων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου, όπου η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου και δέχεται την ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει το ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι και για όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών, πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των τμημάτων της διόδου. Δηλαδή η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου^[5].



Εικόνα 1-2: Ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p.

Τοποθετώντας μαζί πολλά ηλιακά στοιχεία προκύπτει το λεγόμενο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ενώ αντίστοιχα τοποθετώντας φωτοβολταϊκά πλαίσια μαζί προκύπτει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ (panel). Στην πράξη και κυρίως, στις μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις τοποθετούνται πολλά πάνελα ανάλογα με την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης.



Εικόνα 1-3: Αριστερά: Ηλιακό στοιχείο, Δεξιά: Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Η διαφορά δυναμικού που εκδηλώνεται στα άκρα ενός ηλιακού στοιχείου όταν αυτό φωτίζεται, οδηγεί σε ροή ρεύματος αν κλείσουμε το κύκλωμα με μία αντίσταση. Επομένως το Φ/Β στοιχείο αναπαρίσταται συχνά σαν μία πηγή έντασης (ρεύματος) η οποία παράγει το λεγόμενο φωτορεύμα I_{ϕ} ή I_L ευθέως ανάλογα με την ένταση της ηλιακής

ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Εφόσον το Φ/Β στοιχείο δεν διαφέρει ουσιαστικά από μία ηλεκτρική δίοδο και αν δανειστούμε την γνωστή για τους ημιαγωγούς σχέση:

$$I_{\varphi} = I_0 \cdot [\exp(\frac{eV}{\gamma kT}) - 1]$$

Όπου:

I_0 , το ανάστροφο ρεύμα κόρου,

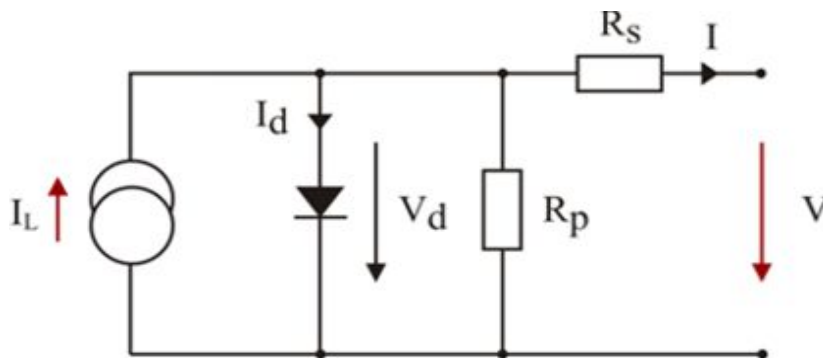
$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$, το φορτίο του ηλεκτρονίου

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$, η σταθερά Boltzman

T: η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου σε βαθμούς K

γ : συντελεστής ποιότητας της διόδου

Μία μοντελοποίηση του Φ/Β στοιχείου, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη και όλες τις απώλειες που εμφανίζονται (Η αντίσταση εν παραλλήλω R_p εκφράζει τις απώλειες που υπερθερμαίνουν το Φ/Β στοιχείο ακόμη και όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένο, ενώ η αντίσταση εν σειρά R_s τις πρόσθετες απώλειες και την μείωση της τάσης που παρατηρούνται όταν συνδέεται εξωτερικό φορτίο και αυξάνεται η ένταση I):



Εικόνα 1-4: Μοντελοποίηση ηλιακού στοιχείου

1.3 Μετατροπή ισχύος

Το ρεύμα και η τάση που δίνει ένα Φ/Β στοιχείο, είναι συνεχούς μορφής (DC). Γεγονός που θα μπορούσε να περιορίσει δραματικά τη χρήση τους για τροφοδότηση ηλεκτρικών φορτίων αφού οι ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν στην πλειοψηφία τους με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Έχει προκύψει λοιπόν, μία αναγκαιότητα για μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο τόσο για να μπορεί η Φ/Β γεννήτρια να τροφοδοτήσει πληθώρα ηλεκτρικών συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος αλλά επίσης για να μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ισχύ τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία εξ' ολοκλήρου (σχεδόν), στις περισσότερες χώρες του κόσμου, λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα και τάση. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο γίνεται από

ειδικές διατάξεις, τους αντιστροφείς.

1.3.1 Ηλεκτρονικά ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον **έλεγχο** και την **μετατροπή** της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατασκευάζονται από υλικά με συγκεκριμένες μη γραμμικές ηλεκτρικές ιδιότητες (ημιαγώγιμα στοιχεία) όπως οι δίοδοι, τα thyristor, το transistor ισχύος (PTR), το διπολικό transistor με απομονωμένη πύλη (IGBT). Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος συναντάται όπου υπάρχει ανάγκη για να γίνει οποιαδήποτε μετατροπή στην τάση το ρεύμα ή ακόμα και την συχνότητα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα. Κλασσικές εφαρμογές τους είναι οι μετατροπές:

- AC/DC, ανορθωτής (rectifier)
- DC/AC, αντιστροφέας (inverter)
- DC σε DC, (DC to DC converter), έλεγχος στάθμης τάσης DC
- AC σε AC, (AC to AC converter) ή AC/DC/AC, έλεγχος συχνότητας και στάθμης τάσης

Χαρακτηριστικό αυτών των διατάξεων είναι η υψηλή τους απόδοση, η φορητότητα καθώς επίσης και η ευελιξία τους και η δυνατότητά τους να προσαρμόζονται σε ποικίλες εφαρμογές.

1.3.2 Αντιστροφείς (inverters)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αντιστροφέας είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (ή το ρεύμα αντίστοιχα). Υπάρχουν πολλά είδη και κατηγορίες αντιστροφέων ανάλογα με το σκοπό της χρήσης τους αλλά και την τεχνολογία τους. Συνοπτικά και όσον αφορά την χρήση τους σε ΑΠΕ πρέπει να αναφέρουμε τους αντιστροφείς "αυτόνομων συστημάτων" που προορίζονται για λειτουργία σε αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα χωρίς να έχουν την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου και αντίστοιχα τους αντιστροφείς για "διασυνδεδεμένα συστήματα". Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την δεύτερη κατηγορία αντιστροφέων και κυρίως με τα προβλήματα που μπορούν να εμφανιστούν κάποιες φορές με την εκτεταμένη χρήση τους ή καλύτερα με την υψηλή διείσδυσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο.

1.3.3 Αρχή λειτουργίας αντιστροφέων

Η βασική αρχή λειτουργίας των αντιστροφέων είναι η δημιουργία ενός σήματος όσο το δυνατόν πιο κοντινού σε ένα ημιτονοειδές με την χρήση διακοπτικών στοιχείων τα οποία εφαρμόζουν κατάλληλα με ορθή και ανάστροφη πόλωση την DC τάση και ελέγχονται από κάποιο λογικό κύκλωμα. Στη συνέχεια το σήμα φιλτράρεται (από κάποιο φίλτρο με πηνία και πυκνωτές) προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της εξόδου. Το

λογικό κύκλωμα στέλνοντας παλμούς στα διακοπικά καθορίζει τα στοιχεία της κυματομορφής της εξόδου οπότε με τον κατάλληλο προγραμματισμό του λογικού κυκλώματος παράγεται το επιθυμητό σήμα. Οι αντιστροφείς βρίσκουν εφαρμογές στις ακόλουθες περιοχές: συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, συστήματα ήπιων μορφών ενέργειας, συστήματα αδιάκοπης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (UPS), συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος.

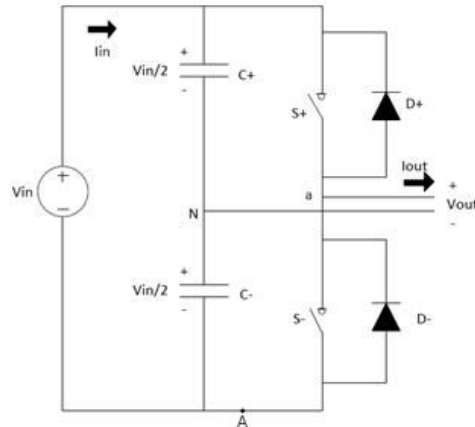
1.3.3.1 Τύποι αντιστροφών^[6]

Οι αντιστροφείς χωρίζονται στην κατηγορία των αντιστροφών **πηγών τάσεως** ή **πηγών ρεύματος** ή στην κατηγορία των αντιστροφών **πολλών κλάδων** (multilevel inverters). Οι πρώτοι έχουν τόσο μονοφασική όσο και τριφασική εφαρμογή ενώ οι δεύτεροι έχουν κυρίως τριφασικές εφαρμογές. Με την τρίτη κατηγορία παρότι υπάρχει το θέμα της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας και του υψηλότερου κόστους επιτυγχάνεται τελικά πολύ καλύτερη προσέγγιση της ημιτονοειδούς κυματομορφής και για αυτό το λόγο, αυτή, η σχετικά πιο πρόσφατη κατηγορία αντιστροφών, κερδίζει συνεχώς έδαφος.

Πιο συγκεκριμένα στους αντιστροφείς πηγών τάσεως που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία, υπάρχουν οι κατηγορίες:

1. Αντιστροφείς μισής γέφυρας

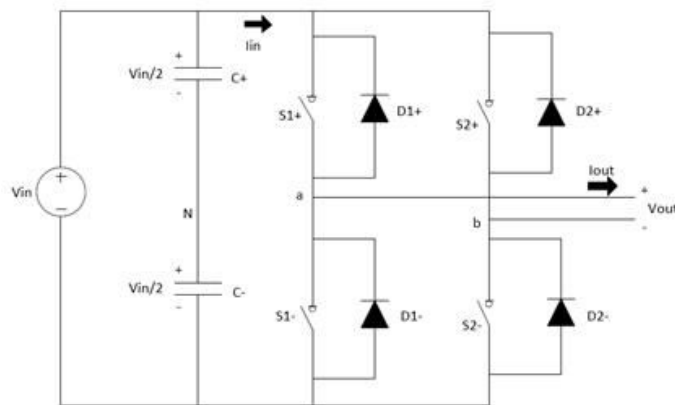
Στα άκρα της εισόδου συνδέονται σε σειρά δύο ίδιοι πυκνωτές. Το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών βρίσκεται στο μισό δυναμικό, οπότε στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται τάση ίση με $V_{in}/2$. Οι χωρητικότητες που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλες, ώστε η τάση στο σημείο N να παραμένει ουσιαστικά σταθερή σε σχέση με το δυναμικό στο σημείο A. Το φορτίο συνδέεται στα σημεία a και N όπως φαίνεται από το σχήμα που ακολουθεί. Ανάλογα με το διακοπικό στοιχείο που είναι κάθε φορά κλειστό, η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο είναι είτε $V_{in}/2$ (για S+ κλειστό), είτε $-V_{in}/2$ (για S- κλειστό). Προφανώς τα δύο διακοπικά δεν πρέπει ποτέ να είναι ταυτόχρονα κλειστά, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε βραχυκύκλωση της πηγής τάσης.



Εικόνα 1-5: Αντιστροφείας μισής γέφυρας

2. Αντιστροφείς πλήρους γέφυρας

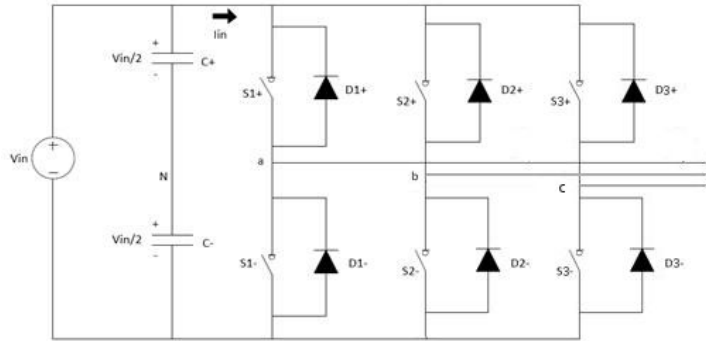
Ο αντιστροφείας πλήρους γέφυρας αποτελείται από δύο αντιστροφείας μισής γέφυρας. Με κατάλληλο συνδυασμό κλεισίματος των διακοπών η τάση που τροφοδοτείται στο φορτίο είναι είτε V_{in} (για S_{1+} , S_{2-} κλειστά), είτε $-V_{in}$ (S_{2+} , S_{1-} κλειστά), είτε 0 (S_{1+} , S_{2+} ή S_{1-} , S_{2-} κλειστά). Η τάση επομένως είναι διπλάσια σε σχέση με αυτή της μισής γέφυρας καθώς επίσης υπάρχει και η δυνατότητα για παροχή μηδενικής τάσης .



Εικόνα 1-6: Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας

3. Τριφασικοί αντιστροφείς

Τέλος ο τριφασικός αντιστροφείας αποτελείται από τρεις αντιστροφείας μισής γέφυρας, ένας για τον έλεγχο κάθε φάσης, επομένως παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες με τον αντιστροφείας μισής γέφυρας. Στην πράξη συνήθως δεν χρησιμοποιούνται τριφασικοί αντιστροφείς για την σύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο και άμα είναι το απαιτεί η εγκατάσταση προτιμούνται τρεις μονοφασικοί, ο κάθε ένας για κάθε φάση.



Εικόνα 1-7: Τριφασικός αντιστροφέας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι δυνατές καταστάσεις εξόδου ενός αντιστροφέα πλήρους γέφυρας μπορούν να είναι τρεις: V_{in} , $-V_{in}$ και 0. Επομένως έχουμε δύο τρόπους ελέγχου της τάσης:

1. Την **διπολική διαμόρφωση** όπου εκμεταλλευόμαστε μόνο τις δύο από τις τρεις καταστάσεις, έχουμε δηλαδή στην έξοδο θετική και αρνητική τάση εξόδου.

2. Την **μονοπολική διαμόρφωση** όπου εκμεταλλευόμαστε και τις τρεις καταστάσεις τάσης.

1.3.3.2 Έλεγχος αντιστροφών

Το πιο σημαντικό ίσως κομμάτι του κυκλώματος των αντιστροφών είναι το λογικό κύκλωμα που "οδηγεί" τα διακοπτικά στοιχεία. Η αλληλουχία των ζευγαριών των διακοπών που θα άγουν ή αντίστοιχα που δεν θα άγουν καθώς και ο χρόνος αγωγής θα καθορίσουν την τελική κυματομορφή. Σημειώνεται ότι η διακοπτική συχνότητα των παλμών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου και η αύξησή της συνεπάγεται καλύτερη προσέγγιση της ιδανικής κυματομορφής. Έτσι λοιπόν, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον έλεγχο των αντιστροφών από τις οποίες επιγραμματικά αναφέρονται ως πιο βασικές οι επόμενες:

- **HCC με έλεγχο βρόχου υστέρησης** (Hysteresis Current Control)

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη τεχνική παλμοδότησης δημιουργούνται δύο αναφορές ρεύματος οι οποίες είναι ανάλογες της τάσης εισόδου (άνω και κάτω όριο). Έτσι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος συγκρίνεται με τις τιμές των ορίων της αναφοράς περιορίζοντας τη εντός αυτών των ορίων. Είναι φανερό ότι χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική παλμοδότησης, η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή και αλλάζει ανάλογα με τα επιλεγμένα όρια του βρόχου υστέρησης, την τιμή του φίλτρου εισόδου και το είδος του φορτίου.

- **Απλή τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM.**

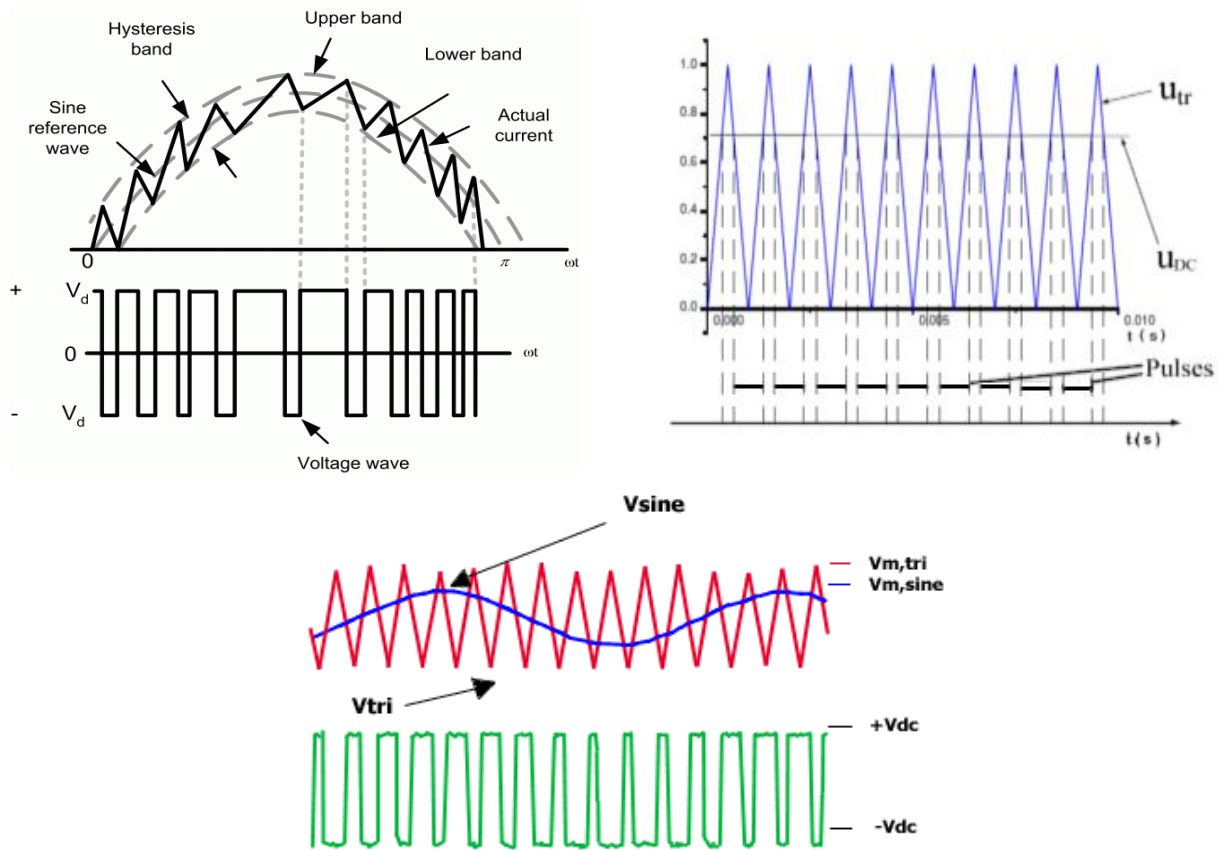
Σε αυτήν την περίπτωση μια τριγωνική κυματομορφή συγκρίνεται με κάποιο σήμα συνεχούς ρεύματος. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτουν κάποιοι παλμοί. Εφόσον έχουμε σταθερό σήμα αναφοράς τότε η παλμοσειρά έχει παλμούς με σταθερό εύρος για ολόκληρη την περίοδο της τάσης του δικτύου. Υπάρχουν και άλλες τεχνικές PWM όπως η τεχνική οριακού ρεύματος. Σ' αυτή την τεχνική, το ρεύμα εισόδου συγκρίνεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή το πλάτος της οποίας είναι προκαθορισμένα ίσο, με την επιθυμητή μέγιστη τιμή του ρεύματος. Όταν το ρεύμα είναι μικρότερο από την οριακή επιθυμητή τιμή αναφοράς, τότε αποκτάται ένα συνεχές σήμα, το οποίο συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα και το αποτέλεσμα της σύγκρισης δίνεται ως παλμός στην είσοδο των διακοπτικών στοιχείων. Η διακοπτική συχνότητα με αυτή τη μέθοδο λαμβάνει υψηλότερες τιμές από την προκαθορισμένη, πάντως παραμένει μικρότερη από την αντίστοιχη στην HCC μέθοδο.

- **SPWM Ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών.**

Η SPWM είναι μια από τις σημαντικότερες τεχνικές παλμοδότησης. Ο παλμός λαμβάνεται έπειτα από τη σύγκριση μιας τριγωνικής κυματομορφής με ένα ημίτονο ανάλογο της τάσης του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Η σύγκριση αυτή παράγει μια παλμοσειρά, στην οποία η διάρκεια των επιμέρους παλμών μεταβάλλεται ημιτονοειδώς μέσα σε μια περίοδο της τάσης του δικτύου. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται υψηλός συντελεστής ισχύος με σταθερή διακοπτική συχνότητα.

- **SVPWM Space Vector PWM.**

Η τεχνική παλμοδότησης SVPWM κάνει χρήση του διανύσματος καταστάσεως του μετατροπέα για την παραγωγή των κατάλληλων παλμών ελέγχου που θα οδηγήσουν τα διακοπτικά στοιχεία. Πρόκειται μάλλον για την τεχνική που εμφανίζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα ειδικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα κίνησης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο υψηλός συντελεστής ισχύος και η χαμηλή αρμονική παραμόρφωση της φασικής τάσης που εμφανίζει στο φορτίο. Πρόκειται για μια μέθοδο που προσφέρεται για υλοποίηση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και σε συστήματα πραγματικού χρόνου που υλοποιούνται με DSP (Digital Signal Processors).



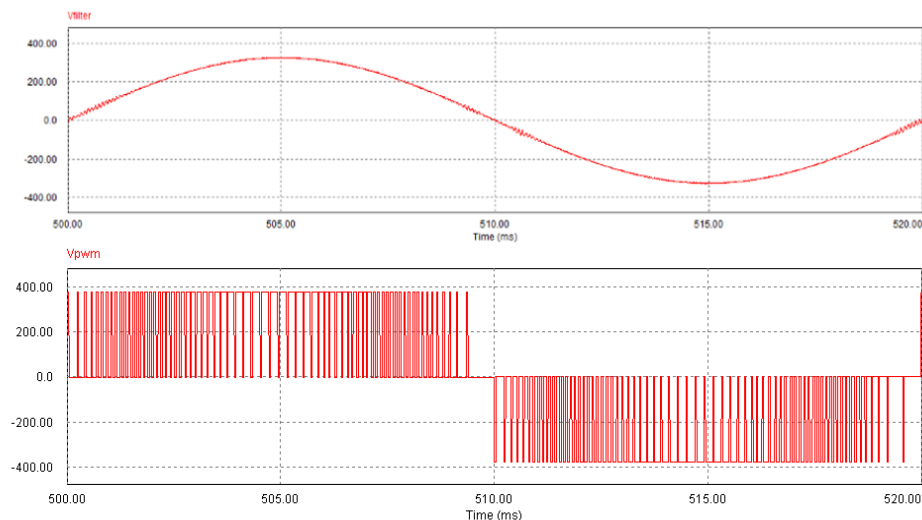
Εικόνα 1-8: Πάνω αριστερά παρουσιάζεται η τεχνική HCC, πάνω δεξιά η απλή PWM και κάτω η SPWM. Σε κάθε διάγραμμα φαίνεται στο πάνω μέρος του τα σήματα τα οποία υπόκεινται σε σύγκριση, ενώ στο κάτω, το αποτέλεσμα, οι παλμοί δηλαδή που δημιουργούνται με την σύγκριση και τροφοδοτούν τα διακοπτικά στοιχεία.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που δείχνει τις δυνατότητες των αντιστροφέων είναι η ικανότητά τους να ρυθμίζουν τη συχνότητα αλλά και τη φάση των κυματομορφών εξόδου τους μόνο με κατάλληλο προγραμματισμό του κυκλώματος παραγωγής των παλμών. Ειδικά το δεύτερο είναι πολύ σημαντικό καθώς επιτρέπει το συγχρονισμό των διασυνδεδεμένων αντιστροφέων με το δίκτυο, οι οποίοι μπορούν να "διαβάσουν" τα χαρακτηριστικά της τάσης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) και να προσαρμόζονται κατάλληλα (όπως γίνεται με την τεχνική **phase-locked loop PLL**). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να ελέγχεται άμεσα η παραγωγή ή και η κατανάλωση ενεργού και άεργου ισχύος και επομένως και η λειτουργία στον επιθυμητό συντελεστή ισχύος καλύπτοντας έτσι τοπικά τις ανάγκες που μπορεί να έχει το δίκτυο.

1.3.3.3 Φίλτρο εξόδου αντιστροφέα

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, μια τυπική έξοδος ενός

PWM αντιστροφέα αποτελείται από παλμούς τάσης το πλάτος των οποίων αυξομειώνεται ημιτονοειδώς. Όπως αποδεικνύεται από την ανάλυση Fourier η κυματομορφή αυτή αποτελείται από τη θεμελιώδη - ζητούμενη συνιστώσα καθώς όμως και από άλλες πολλαπλάσιες (κυρίως) συνιστώσες (αρμονικές) τις οποίες επιβάλλεται να εξαλείψουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο ώστε να προσεγγίσουμε την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τοποθετείται το φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα. Υπάρχουν πολλά είδη και τοπολογίες φίλτρων ανάλογα με την κάθε υλοποίηση του αντιστροφέα αλλά και την αποζητούμενη ποιότητα της κυματομορφής εξόδου καθώς το κομμάτι του φίλτρου αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα αύξησης του κόστους του. Έτσι ένα φίλτρο μπορεί να έχει την πολύ απλή μορφή ενός πηνίου σε σειρά με την φάση ή μπορεί να είναι πιο σύνθετο περιέχοντας και πυκνωτή (φίλτρο LC ή LCL). Αυτό που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των διακοπτικών στοιχείων (και του λογικού κυκλώματος αντίστοιχα) τόσο μικραίνουν οι απαιτήσεις για καλύτερο φίλτρο. Για αυτό το λόγο με την εξέλιξη της τεχνολογίας των αντιστροφέων επιδιώκεται η αύξηση της διακοπτικής συχνότητας. Τα φίλτρα θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

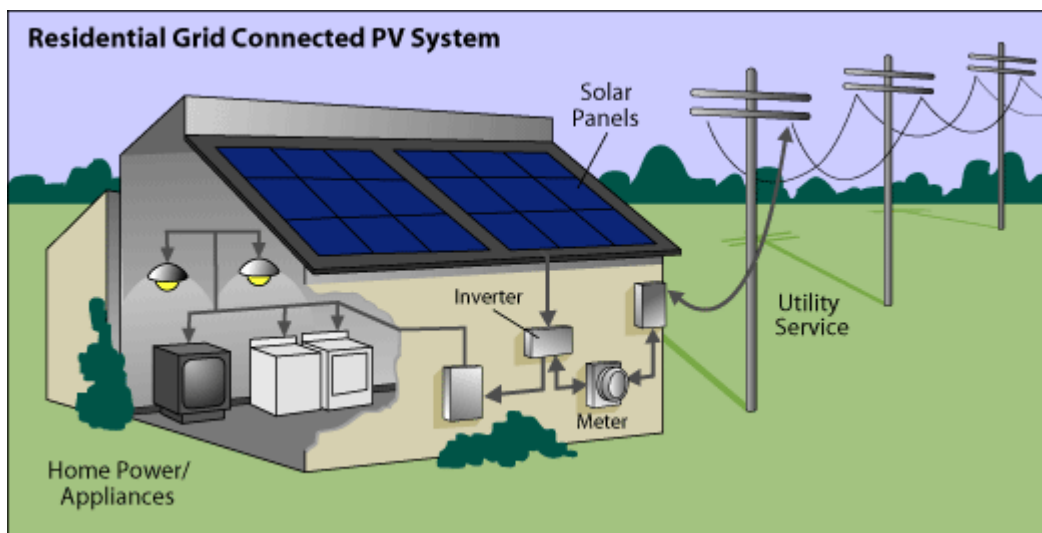


Εικόνα 1-9: Η κυματομορφή της τάσης ενός PWM αντιστροφέα μετά (πάνω) και πριν το φίλτρο εξόδου (κάτω)

1.4 Διεσπαρμένη παραγωγή και μικροδίκτυα.

Το παραδοσιακό μοντέλο μεταφοράς και κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας (Η.Ε.) είναι αυτό της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε

κάποιο σημείο και της μεταφοράς και της διανομής της από εκεί στους καταναλωτές. Η παραγωγή λαμβάνει χώρα σε κάποιο (μεγάλο συνήθως) σταθμό παραγωγής Η.Ε. από όπου θα διοχετευτεί στα καταναλωτικά κέντρα, τα οποία μπορεί να βρίσκονται αρκετά μακριά, μέσω γραμμών υψηλής τάσης. Σε αυτό το σημείο και με τη βοήθεια μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης που βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές θα γίνει διαθέσιμη για κατανάλωση. Επομένως αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει τελικά τους παραγωγούς (σταθμοί ΠΗΕ - Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας), τους καταναλωτές και το ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς που αναλαμβάνει να κάνει την σύζευξη μεταξύ τους. Τα τελευταία χρόνια όμως και ιδιαίτερα με την αυξανόμενη διεύρυνση στο ηλεκτρικό δίκτυο σταθμών παραγωγής ΑΠΕ το προηγούμενο μοντέλο αμφισβητείται ολοένα και περισσότερο. Πρόκειται για την λεγόμενη **δισπαρμένη παραγωγή** η οποία στηρίζεται στη δημιουργία μικρότερων μονάδων παραγωγής σε τόπους όπου υπάρχει διαθέσιμη η πρωταρχική πηγή ενέργειας και βρίσκεται κοντά σε τόπους κατανάλωσης όπως πόλεις και βιομηχανίες. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα σε μια τυπική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών "στη στέγη" ενός σπιτιού το οποίο είναι βέβαια διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται από τα Φ/Β αφού μετατραπεί σε εναλλασσόμενη μορφή με τη βοήθεια αντιστροφέα, καταναλώνεται από τις ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού (ανάλογα με την στιγμιαία ζήτηση) και η υπόλοιπη διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από όπου καθίσταται διαθέσιμη για κατανάλωση από οποιονδήποτε άλλον καταναλωτή του δικτύου. Προφανώς, όταν δεν υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β η οικία θα καλύψει τις ανάγκες τις εξολοκλήρου από το δίκτυο.



Εικόνα 1-10: Οικιακό διασυνδεδεμένο σύστημα φωτοβολταϊκών

Έτσι λοιπόν ένα δίκτυο που περιέχει μονάδες δισπαρμένης παραγωγής και πιθανώς μονάδες αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, αντλιοσταμειευτήρες κ.α.) το οποίο σχεδιάζεται ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο αποκαλείται **μικροδίκτυο**. Τα μικροδίκτυα μπορούν να

συνδέονται στο κύριο δίκτυο ισχύος ή μπορούν και να λειτουργούν αυτόνομα, όπως τα συστήματα ισχύος νησιωτικών μονάδων. Είναι μία ιδέα που βασίζεται στην ύπαρξη ενός συνόλου ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων τοποθετημένων μαζί με πηγές ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας μικρής κλίμακας. Οι πηγές ισχύος ποικίλλουν, συμπεριλαμβάνοντας ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες αλλά και γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, για την αντιμετώπιση της τοπικής ζήτησης για θερμότητα και ηλεκτρισμό.

Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο παραγωγής της, προσδίδει σημαντικό οικονομικό όφελος αφού με αυτόν τον τρόπο, οι απώλειες μεταφοράς που δεν είναι διόλου αμελητέες, ελαχιστοποιούνται. Επίσης άλλα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων είναι ότι μπορούν να ωφελήσουν το δίκτυο στηρίζοντάς το τις ώρες αιχμής, να απορροφήσουν ενεργό ή άεργο ισχύ όταν και αν αυτό απαιτείται και επίσης να βελτιώσουν την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής καθώς σε περίπτωση σφάλματος, κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, μπορούν να τροφοδοτήσουν μέρος των καταναλωτών. Βέβαια υπάρχουν και αρνητικοί παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως τα διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα, το αυξημένο κόστος του εξοπλισμού που απαιτείται για τις εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής κ.ά. Ένα πολύ σοβαρό όμως ζήτημα που προκύπτει, είναι η ενδεχόμενη μη συμβατότητα της υψηλής διείσδυσης των μικροδικτύων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε τέτοιου είδους προβλήματα που είναι πιθανό να προκληθούν, αναφέρεται ο κλάδος της Ποιότητας Ισχύος.

2. Ποιότητα ισχύος

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος ποιότητα ισχύος (power quality) αναφέρεται στην καταλληλότητα, ή καλύτερα στις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί η ηλεκτρική ισχύς που φτάνει στις ηλεκτρικές συσκευές του καταναλωτή ώστε αυτές να μπορούν να λειτουργήσουν αδιάλειπτα και με ασφάλεια. Πιο συγκεκριμένα αφορά στη μελέτη μιας σειράς ηλεκτρικών διαταραχών που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο με τη μορφή της **απόκλισης από τις ιδανικές τιμές των κυματομορφών ορισμένων ηλεκτρικών μεγεθών**. Τα ηλεκτρικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι η τάση, η συχνότητα (της τάσης) και το ρεύμα. Από τα προηγούμενα προκύπτουν αντίστοιχα και τα μεγέθη της ηλεκτρικής ισχύος καθώς και της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαταραχές αυτές είναι πολύ σημαντικές γιατί μπορούν να προκαλέσουν μια σειρά προβλημάτων όπως δυσλειτουργία, πρόωρη φθορά ή ακόμα και καταστροφή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, όπως οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές μιας οικίας, ή διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας σε μια επιχείρηση ή επίσης, θέματα ασφάλειας της ίδιας της ανθρώπινης ζωής. Τα προβλήματα αυτά προκαλούνται από ένα ευρύ φάσμα φαινομένων όπως φυσικά φαινόμενα (για παράδειγμα οι κεραυνοί) ή από διάφορου είδους διαταραχές από τη λειτουργία του εξοπλισμού των συστημάτων ισχύος.

2.2 Ηλεκτρική ισχύς σε καθαρά ημιτονοειδείς συνθήκες^[7]

Τα δίκτυα στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. Όλες οι διεγέρσεις είναι ημιτονοειδείς και της ίδιας κυκλικής συχνότητας ω rad/sec.
2. Οι διεγέρσεις έχουν εφαρμοστεί στο απώτερο παρελθόν. Συνεπώς οι αποκρίσεις που οφείλονται σε κάποιες αρχικές συνθήκες έχουν ήδη μηδενιστεί.

Επομένως στο πεδίο της παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και χρησιμοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας, τα περισσότερα προβλήματα που συναντώνται, αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης δικτύων στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση στη συχνότητα του δικτύου, η οποία είναι για την Ελλάδα και την Ευρώπη $f=50\text{Hz}$ ενώ για τη Βόρεια Αμερική και την Ιαπωνία $f=60\text{Hz}$.

Η ισχύς λοιπόν (η στιγμιαία ισχύς ή η ισχύς που παρέχεται σε ένα κύκλωμα την χρονική στιγμή t), στην μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση ορίζεται ως:

$$p(t)=u(t)\cdot i(t)$$

όπου αντίστοιχα $u(t)$ η τάση στα άκρα του κυκλώματος και $i(t)$ το ρεύμα που το διαρρέει, για τα οποία ισχύουν αντίστοιχα:

$$u(t)=V_{peak}\cdot\sin(\omega t+\theta_V), \quad i(t)=I_{peak}\cdot\sin(\omega t+\theta_I)$$

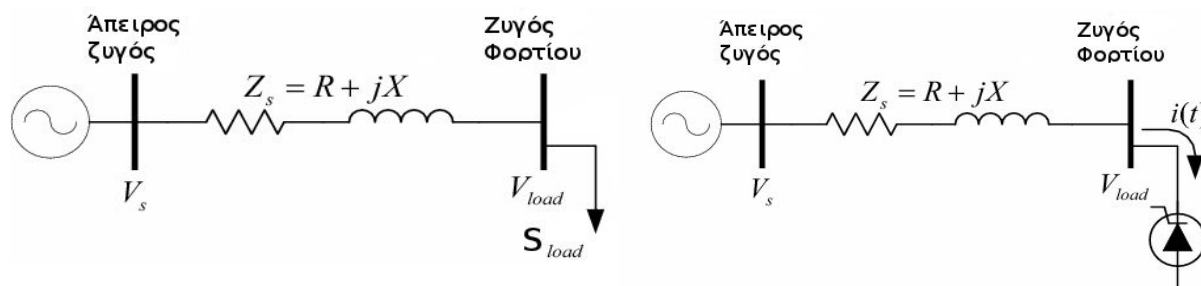
όπου $V_{RMS} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ και $I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$ οι ενδεικνύμενες ή ενεργές (rms) τιμές της τάσεως και του ρεύματος αντίστοιχα. Η φασική απόκλιση του ρεύματος από την τάση προκύπτει: $\varphi = \theta_V - \theta_I$. Στην συνέχεια, οι ημιτονοειδείς συναρτήσεις μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια παραστατικών μιγαδικών αριθμών (phasors) οι οποίοι ορίζονται ως εξής: $\hat{V} = V e^{j\varphi} = V \angle \theta_V$ δηλαδή ένας μιγαδικός αριθμός με μέτρο το μέτρο την ενεργό τιμή της ημιτονοειδούς συνάρτησης και γωνία την γωνία την αρχική της φάση. Συνεπώς, καταλήγουμε στον γνωστό ορισμό της μιγαδικής ισχύος (μετρούμενη σε KVA): $S = \hat{V} \cdot \hat{I}^* = VI \angle \varphi = P + jQ$ της οποίας το πραγματικό μέρος αποτελεί η πραγματική-ενεργός ισχύς (kW) και το φανταστικό η άεργος (kVar). Τέλος, ο συντελεστής ισχύος ορίζεται ως: $\Sigma I = \cos\varphi = P/S$. Η σημασία του συντελεστή ισχύος και άρα της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι καθοριστικής σημασίας γιατί μας δείχνει το είδος της φόρτισης στο στοιχείο που αναφέρεται η ισχύς. Έτσι πχ ένα φορτίο λέγεται **επαγωγικό** όταν όταν η γωνία φ είναι θετική (η τάση προηγείται του ρεύματος - απορροφά άεργο ισχύ) και **χωρητικό** όταν η φ είναι αρνητική (το ρεύμα προηγείται της τάσης - παράγει άεργο ισχύ).

Αν θέλουμε να δώσουμε μια φυσική σημασία στην ενεργό ισχύ μπορούμε να πούμε ότι καθορίζει πόση ενέργεια καταναλώνεται κάποια χρονική στιγμή. Η φαινόμενη (το μέτρο της μιγαδικής), δείχνει την *χωρητικότητα που πρέπει να έχει το ηλεκτρικό σύστημα για να διανείμει αυτή την ενέργεια* ενώ η άεργος ισχύς συνδέεται με την *αποθήκευση ενέργειας στα μαγνητικά πεδία του ηλεκτρικού δικτύου*. Η άεργος ισχύς παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η επαγωγική φύση των περισσοτέρων δικτύων συνεπάγεται μια πολύ μεγάλη απαίτηση ροής άεργου ισχύος. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε βιομηχανικό περιβάλλον όπου έχουμε μεγάλα επαγωγικά φορτία όπως οι μηχανές και οι μετασχηματιστές. Η ροή της άεργου ισχύος διαμέσου του μετρητή της ΔΕΗ δεν επηρεάζει την μέτρηση αλλά έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες ενεργειακές απώλειες σε όλη την γραμμή μέχρι την κατανάλωση. Εκτός όμως από αυτές τις επιπτώσεις η ροή της άεργου ισχύος προκαλεί πτώση στο μέγεθος της τάσης, λόγω του αυξημένου ρεύματος και της συνεπαγόμενης μεγάλης πτώσης τάσεως στις γραμμές μεταφοράς και στα υπόλοιπα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου μέχρι την τελική κατανάλωση. Η μείωση της άεργου ισχύος στο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση της μεθόδου "αντιστάθμισης" στον καταναλωτή, δηλαδή την τοποθέτηση πυκνωτών στον καταναλωτή με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο συντελεστής ισχύος.

2.2.1 Επέκταση του ορισμού της ηλεκτρικής ισχύος

Όταν η τάση και το ρεύμα δεν είναι ιδανικές στο δίκτυο, τότε εμφανίζεται και μια επιπλέον συνιστώσα ισχύος πέρα από τις κλασσικές P, Q. Οι ορισμοί της φαινόμενης ισχύος S, της ενεργού ισχύος P, και

της άεργης ισχύος Q στα συστήματα που τροφοδοτούνται με ημιτονοειδή σήματα έχουν γίνει αποδεκτοί από την κοινωνία του Power Engineering για περισσότερο από έναν αιώνα χωρίς επιφυλάξεις. Σήμερα όμως, όπως θα εξηγηθεί η αυξανόμενη χρήση μετατροπέων ισχύος, adjustable-speed drives, ηλεκτρονικές συσκευές, κ.α, έχει συντελέσει στην παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος. Γενικά, η πρόοδος και οι ευρείες χρήσεις των ηλεκτρονικών συσκευών και των μικροεπεξεργαστών σε πολλές εφαρμογές συμβάλλουν σημαντικά στη παραμόρφωση των παραπάνω κυματομορφών. Αυτό δημιούργησε την ανάγκη για μια πιο ακριβή μέθοδο για τη μέτρηση των διαφορετικών συνιστωσών της ισχύος σε περιβάλλον με αρμονικές. Όπως φαίνεται μια νέα "ισχύς" προκύπτει και η οποία ονομάζεται ισχύς παραμόρφωσης (distortion power) και μετριέται σε VA^[8].



Εικόνα 2-1: Αριστερά, παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, δεξιά, μη γραμμικά φορτία συμβάλλουν στην παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος

Από την μαθηματική ανάλυση fourier οποιαδήποτε περιοδική απόκλιση από την καθαρά ημιτονοειδή μορφή μιας κυματομορφής μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα άθροισμα από καθαρά ημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Η ονομαστική συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα. Μία ημιτονοειδής κυματομορφή με συχνότητα n φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη καλείται αρμονική συνιστώσα (ή διαταραχή). Ο λόγος μεταξύ της συχνότητας της αρμονικής συχνότητας και της θεμελιώδους συχνότητας καλείται τάξη της αρμονικής.

Έτσι λοιπόν, θα μπορούσαμε να αναπαραστήσουμε το παραμορφωμένο ρεύμα που τραβάει ένα φορτίο, ως:

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_{R1} + \mathbf{i}_{X1} + \mathbf{i}_D^{[12]} \text{ όπου:}$$

$$i_{R1} = \sqrt{2} I_{L1} \cos\theta_{I,1} \cdot \sin\omega t \text{ η πραγματική θεμελιώδης συνιστώσα}$$

$$i_{X1} = \sqrt{2} I_{L1} \sin\theta_{I,1} \cdot \sin\omega t \text{ η φανταστική θεμελιώδης συνιστώσα και}$$

$$i_D = \sqrt{2} \sum_2^n I_{Ln} \sin(n\omega t + \theta_{I,n}) \text{ το ρεύμα ανώτερων αρμονικών συνιστωσών}$$

με I_{1n} : η RMS τιμή της n-ιοστής συνιστώσας του ρεύματος

$\theta_{11,n}$: η διαφορά φάσης μεταξύ της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος

και της n-ιοστής συνιστώσας του ρεύματος. Αντίστοιχα η τάση θα είναι

της μορφής: $v(t) = \sqrt{2} V \cdot \sin\omega t$ ή υπάρχει φυσικά πιθανότητα να είναι και

αυτή παραμορφωμένη και να έχει τη μορφή:

$$v = \sqrt{2}(V_1 \cdot \sin(\omega t + \theta_V) + \sum_2^n V_n \sin(n\omega t + \theta_{V1,n}))$$

θα ισχύουν επομένως οι ακόλουθες σχέσεις:

$$P_L = V \cdot I_{RI} = V_1 \cdot I_{L1} \cdot \cos\phi_1 + \sum_2^n V_n \cdot I_{Ln} \cos(\phi_n) \text{ Πραγματική ισχύς φορτίου}$$

$$Q_L = V \cdot I_{XI} = V_1 \cdot I_{L1} \cdot \sin\phi_1 + \sum_2^n V_n \cdot I_{Ln} \sin(\phi_n) \text{ Άεργος ισχύς φορτίου}$$

$$D_L = \sum_{k \neq n} V_k \cdot I_{Ln} \cdot \sin(\theta_{V_k} - \theta_{I_n}) \text{ Ισχύς παραμόρφωσης}$$

$$S_L = VI_L = \sqrt{\sum_1^n I_{Ln}^2} = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2 + D_L^2} \text{ Φαινόμενη ισχύς φορτίου}$$

και ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (TPF true power factor) θα ορίζεται ως:

$$TPF = \frac{P_L}{S_L} = \frac{P_L}{\sqrt{P_L^2 + Q_L^2 + D_L^2}}$$

Ο προηγούμενος ορισμός του συντελεστή ισχύος αντιστοιχεί πλέον στον λεγόμενο συντελεστή μετατόπισης (displacement factor).

Ένας πολύ σημαντικός δείκτης που καταγράφει το ύψος της παραμόρφωσης μιας κυματομορφής είναι ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD total harmonic distortion). Το THD συχνά δίνεται σαν ποσοστό. Προφανώς, THD=0% σημαίνει μηδενική παραμόρφωση ενώ με την αύξησή του σημαίνει ότι η κυματομορφή απομακρύνεται από την ιδανική:

$$THD_M = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} M_k^2}{M_1^2}}$$

όπου M_n η ενεργός τιμή της συνιστώσας τάξεως n .

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι αποδεικνύεται ότι η RMS τιμή μιας παραμορφωμένης (με αρμονικές) κυματομορφής δίνεται από τον τύπο:

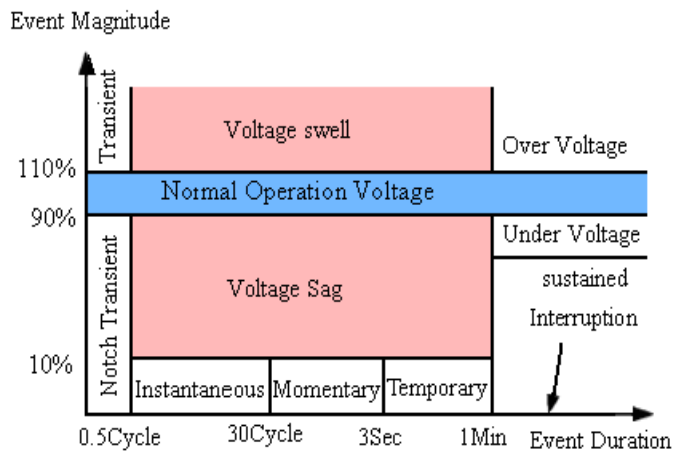
$$M_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} M_k^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD_M^2}$$

2.3 Κατηγοριοποίηση προβλημάτων ποιότητας ισχύος

Σύμφωνα με την συντονιστική επιτροπή των προδιαγραφών του Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), την International Electrotechnical Commission (IEC) αλλά και άλλες

αντίστοιχες επιτροπές έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση στα προβλήματα της ποιότητας ισχύος:

- Βυθίσεις (sags)
- Διακοπές (interruptions)
- Ασυμμετρία τάσης (voltage unbalance)
- Διακύμανση τάσης μη επαναλαμβανόμενη (voltage swells) - Υπέριταση (overvoltage)
- Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (transients)
- Υπόταση (undervoltage)
- Εγχοπές (notches)
- Επαναλαμβανόμενες διακυμάνσεις τάσης (voltage fluctuations, flicker)
- Θόρυβος (electrical noise)
- Μεταβολές συχνότητας (frequency variations)
- Αρμονικές (Harmonics)
- Δια-αρμονικές (interharmonics)



Εικόνα 2-2:Κατηγοριοποίηση προβλημάτων ποιότητας ισχύος, IEEE Std. 1159-1995.

Βυθίσεις

Βύθιση τάσης είναι η μικρής διάρκειας μείωση της ενεργού τιμής της τάσης ή του ρεύματος στη συχνότητα του δικτύου με διάρκεια από 0,5 κύκλο ως ένα λεπτό. Συμβαίνει κυρίως λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο ή λόγω της σύνδεσης μεγάλων κινητήρων. Βύθιση της τάσης παρατηρείται επίσης και κατά την προσωρινή λειτουργία ενός μετασχηματιστή στην περιοχή κορεσμού της καμπύλης λειτουργίας του, λόγω των μεγάλων ασύμμετρων ρευμάτων που προκαλούνται (π.χ. κατά την ενεργοποίηση του).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του φαινομένου της βύθισης τάσης είναι η διάρκεια του και το μέγεθος της τάσης. Για βυθίσεις τάσης που προκαλούνται από σφάλματα, το μέγεθος της τάσης εξαρτάται από την απόσταση του σφάλματος από το φορτίο, τις διασυνδέσεις του δικτύου καθώς και το πόσο δυνατό ή ασθενές είναι το δίκτυο (ισχύς βραχυκύκλωσης) στο PCC (point of common coupling - το σημείο όπου ενώνονται ηλεκτρικά το φορτίο, το σφάλμα και η παροχή ισχύος του δικτύου). Ο τύπος του σφάλματος και οι συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου είναι επίσης καθοριστικοί παράγοντες του μεγέθους της τάσης.

Η διάρκεια εξαρτάται κυρίως από το πόσο γρήγορα θα λειτουργήσει το σύστημα προστασίας του δικτύου προκειμένου να απομονωθεί το τμήμα του δικτύου όπου εμφανίστηκε το σφάλμα. Οι χρόνοι που υπεισέρχονται εδώ είναι τόσο ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος (δηλαδή ο τύπος προστασίας που χρησιμοποιείται: ηλεκτρονόμοι αποστάσεως, διαφορική προστασία, ηλεκτρονόμοι υπερρεύματος, ασφάλειες κτλ) καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών διακοπής του ρεύματος (διακόπτες ισχύος, ασφάλειες κτλ).

Από την πλευρά της εταιρίας ηλεκτρισμού, προσπάθεια μείωσης του αριθμού βυθίσεων τάσης συνεπάγεται προσπάθεια μείωσης του αριθμού σφαλμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με συχνότερη συντήρηση και επιθεώρηση του δικτύου και του εξοπλισμού. Η χρήση υπόγειων καλωδίων αντί για εναέριες γραμμές μειώνει την συχνότητα σφαλμάτων λόγω κεραυνών. Επίσης, βελτίωση των χρόνων λειτουργίας του συστήματος προστασίας μειώνει την διάρκεια των βυθίσεων τάσης. Αλλαγές στην τρόπο με τον οποίο συνδέεται το φορτίο με το δίκτυο μπορούν επίσης να μειώσουν την πτώση τάσης κατά την διάρκεια ενός σφάλματος (για παράδειγμα η σύνδεση από διαφορετικά σημεία του δικτύου).

Από την πλευρά των καταναλωτών, βοήθεια μπορεί να αναζητηθεί σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (για παράδειγμα οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας - UPS) ή υποστήριξης της τάσης (DVR).

Διακοπές

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές οι διακοπές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: μικρής διάρκειας (μικρότερης από 3 λεπτά) και μεγάλης διάρκειας (μεγαλύτερης από 3 λεπτά). Πρόκειται για πλήρη απώλεια της τάσης (κάτω του 0,1 α.μ.) σε ένα ή περισσότερους αγωγούς (φάσεις).

Οι διακοπές μεγάλης διάρκειας οφείλονται είτε σε κάποιο σοβαρό σφάλμα, το οποίο δεν καθάρισε με την λειτουργία του συστήματος προστασίας και χρειάζεται αποκατάσταση επιτόπου, είτε λόγω προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης στο δίκτυο.

Οι διακοπές μικρής διάρκειας προέρχονται από τη λειτουργία διακοπών αυτόματης επαναφοράς (reclosers) και επαναφορά του δικτύου μετά από σφάλμα. Η διαδικασία αυτή είναι συνηθισμένη σε δίκτυα διανομής και εφαρμόζεται διότι μεγάλο ποσοστό των σφαλμάτων δεν είναι μόνιμα και εξαφανίζονται μετά τη λειτουργία του συστήματος

προστασίας. Οι διακοπές μπορούν να θεωρηθούν ειδική περίπτωση βυθίσεων τάσης (όπου η τάση γίνεται μηδέν) και όσο αφορά στην επίδραση τους στα φορτία ισχύει ότι και για την επίδραση των βυθίσεων τάσης.

Σε εργοστασιακό περιβάλλον μία διακοπή μπορεί να προκαλέσει καταστροφική διακοπή της παραγωγικής αλυσίδας αυξάνοντας τον αριθμό των προϊόντων που απορρίπτονται ή των υλικών που απομακρύνονται. Σε μερικές περιπτώσεις, οι διακοπές μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο να καταστραφούν οι συσκευές ή ακόμα και τον τραυματισμό του προσωπικού.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την αποφυγή προβλημάτων από τις διακοπές είναι η εγκατάσταση συστημάτων UPS και ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Βελτίωση από τη μεριά του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας αφενός τη συχνότητα των σφαλμάτων και αφετέρου μειώνοντας τη διάρκεια των διακοπών. Μείωση της διάρκειας των διακοπών μπορεί να γίνει με αξιοποίηση των μοντέρνων συστημάτων προστασίας. Σχήματα τα οποία προβλέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αυξάνουν την αποτελεσματικότητα στον εντοπισμό του σφάλματος, επιταχύνουν τους χρόνους προστασίας αλλά και μειώνουν τον χρόνο αποκατάστασης σφαλμάτων.

Ασυμμετρία τάσης

Σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα παροχής, οι φασικές τάσεις των τριών γραμμών είναι ίσες σε μέγεθος και διαφέρουν ανά φάση μεταξύ τους κατά 120° . Ασυμμετρία τάσεως εμφανίζεται όταν υπάρχει διαφορά στην ενεργό τιμή της τάσης μεταξύ των φάσεων είτε επειδή η γωνία μεταξύ των φάσεων αποκλίνει από τις 120° . Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν η κατανάλωση ρεύματος είναι ασύμμετρα κατανεμημένη στις τρεις φάσεις ή κατά την διάρκεια σφαλμάτων πριν προλάβει να λειτουργήσει η προστασία.

Η ασυμμετρία των φάσεων επηρεάζει κυρίως τους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες στους οποίους προκαλεί υπερθέρμανση και επίσης επηρεάζει τον εξοπλισμό προστασίας των κυκλωμάτων. Επιπλέον της μειωμένης απόδοσης, της υπερθέρμανσης και της μείωσης του χρόνου ζωής της μόνωσης, οι επαγωγικοί κινητήρες που λειτουργούν σε κατάσταση ασυμμετρίας θα κάνουν πολύ θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, λόγω των κραδασμών από την στροφορμή και την ταχύτητα. Προφανώς σε τέτοιες περιπτώσεις η στροφορμή και η ταχύτητα θα είναι μικρότερη της κανονικής.

Η επίτευξη μηδενικού βαθμού ασυμμετρίας μεταξύ των φάσεων σε ένα σύστημα διανομής είναι προφανώς αδύνατη. Παρόλα αυτά, υπάρχουν τεχνικές βελτίωσης της συμμετρικότητας τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και σε επίπεδο κατανάλωσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του συντελεστή ασυμμετρίας της φάσεων και των επιπτώσεών της.

Διακυμάνσεις μη επαναλαμβανόμενες – Υπερτάσεις

Διακύμανση καλείται η προσωρινή αύξηση άνω του 10% της ενεργούς (RMS) τιμής της τάσης ή του ρεύματος στη συχνότητα του δικτύου, η οποία διαρκεί από 0,5 κύκλο έως 1 λεπτό. Τυπικές τιμές είναι από 1.1-1.8 α.μ.. Υπέρταση (μακράς διάρκειας καλείται η ανύψωση της τιμής της τάσης για άνω του 1 λεπτού και με τυπική τιμή από 1.1-1.2 α.μ..

Οι παροδικές υπερτάσεις είναι στιγμιαίες ανυψώσεις της τάσης (το αντίθετο των βυθίσεων). Οι ίδιοι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για κατηγοριοποίηση των βυθίσεων χρησιμοποιούνται και για την κατηγοριοποίηση των παροδικών ανυψώσεων. Οι υπερτάσεις που εμφανίζονται κατά την διάρκεια λειτουργίας ενός δικτύου μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα επικίνδυνες για τον εξοπλισμό του αλλά και για τα φορτία. Υπερτάσεις προκαλούνται από κεραυνούς (και μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα), ή λόγω προβλημάτων σε διακόπτες ισχύος.

Υπερτάσεις μεγαλύτερης διάρκειας εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μονοφασικών σφαλμάτων σε αγειώτα δίκτυα ή δίκτυα γειωμένα μέσω σύνθετης αντίστασης. Οι υπερτάσεις στη χειρότερη περίπτωση ισούνται με την πολική τάση του δικτύου, εμφανίζονται στις υγιείς φάσεις και διαρκούν όσο διαρκεί το σφάλμα.

Οι τρόποι επίλυσης θα μπορούσαν να είναι οι ίδιοι με αυτούς για τις βυθίσεις. Όμως λόγω της μικρής συχνότητας και έκτασης του φαινομένου στην πράξη δεν λαμβάνονται κάποια μέτρα αποκλειστικά για αυτό το πρόβλημα. Ενέργειες που γίνονται και για άλλες διαταραχές εξομαλύνουν και τα αποτελέσματα αυτών των διαταραχών.

Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα

Μεταβατικά ονομάζουμε τα φαινόμενα μεταξύ δύο διαδοχικών σταθερών καταστάσεων μέσα σε χρονικό διάστημα μικρό σε σχέση με την υπό εξέταση χρονική κλίμακα (συνήθως από 50ns έως και 50ms) . Μπορεί να περιλαμβάνει καταστροφικά υψηλές τιμές ρεύματος ή και τάσης. Τα μεταβατικά συνήθως περιλαμβάνουν συχνότητες μη φυσιολογικές, οι οποίες μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 5MHz.

Πηγές αυτών των φαινομένων είναι οι κεραυνοί - κακές καιρικές συνθήκες, διακοπτικές δραστηριότητες στο δίκτυο, προβλήματα στο δίκτυο διανομής που μπορεί να οδηγήσουν σε δημιουργία ηλεκτρικών τόξων, ατυχήματα ή ανθρώπινα λάθη καθώς επίσης και σε καταστροφή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Υπόταση

Η υπόταση αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία η τιμή της τάσης κυμαίνεται από 0.8-0.9 α.μ. για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός λεπτού. Η υπόταση είναι αποτέλεσμα χαμηλής τάσης διανομής εξαιτίας υψηλού φόρτου στο δίκτυο, φαινόμενο το οποίο οδηγεί σε σημαντική πώση τάσης και μπορεί να προκληθεί με την ζεύξη ενός μεγάλου φορτίου ή με την απόζευξη πυκνωτών.

Είναι πιθανό να προκληθούν προβλήματα στις ηλεκτρικές συσκευές

και ιδιαίτερα στους ηλεκτρικούς κινητήρες όπως υπερθέρμανση, δυσλειτουργία, πρόωρη καταστροφή ή και διακοπή λειτουργίας.

Εγκοπές

Οι εγκοπές είναι περιοδικές διαταραχές της τάσης με διάρκεια μικρότερη του 0,5 κύκλου. Προκαλούνται κυρίως από συσκευές με ηλεκτρονικά ισχύος, κατά τη μεταγωγή του ρεύματος από τη μία φάση στην άλλη. Η διάρκεια του βραχυκυκλώματος είναι συνάρτηση της επαγωγής του συστήματος και του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος. Οι προκύπτουσες συχνότητες που σχετίζονται με το φαινόμενο μπορεί να είναι πολύ υψηλές και η μέτρησή τους με συσκευή ανάλυσης αρμονικών συνιστωσών είναι δυσχερής.

Επαναλαμβανόμενες διακυμάνσεις τάσης – Φλίκερ

Οι συστηματικές διακυμάνσεις τάσης σε μία περιβάλλουσα ή σειρά τυχαίων μεταβολών τάσης, με πλάτος που συνήθως δεν ξεπερνά το 0.9–1.1 α.μ., συχνά καλούνται τρεμοπαίξιμο (flicker) ή διακύμανση (fluctuation). Το φλίκερ, είναι μία οπτική ενόχληση λόγω αστάθειας της έντασης του φωτός. Η διακύμανση του πλάτους της τάσης είναι συνήθως σε επίπεδο χαμηλότερο του 3% της παρεχόμενης τάσης και δεν έχει κάποια αξιοπρόσεκτη επίδραση στον εξοπλισμό. Αυτή η διακύμανση ωστόσο μπορεί να προκαλέσει ενόχληση στα μάτια. Το επίπεδο της ενόχλησης εξαρτάται από την συχνότητα και το πλάτος της αλλαγής της έντασης του φωτός και από τον παρατηρητή (δεν αντιλαμβάνονται όλοι την ίδια ενόχληση στην ίδια διακύμανση της τάσης).

Κύρια πηγή δημιουργίας του φαινομένου της διακύμανσης της τάσης είναι τα ηλεκτρικά τόξα των ηλεκτρικών κλιβάνων, οι μηχανές συγκόλλησης και παρόμοια “βαριά” φορτία που καταναλώνουν ρεύματα με μεγάλη διακύμανση. Φλίκερ μπορεί να εμφανιστεί με την παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών σε μία συχνότητα κοντά στην θεμελιώδη ή και σε αρμονική.

Οι διακυμάνσεις τάσεως προκαλούνται όταν τα φορτία καταναλώνουν ρεύματα που έχουν σημαντικές αιφνίδιες ή περιοδικές διακυμάνσεις. Το κυμαινόμενο ρεύμα που καταναλώνεται από την παροχή προκαλεί πρόσθετες μειώσεις τάσεως στο σύστημα τροφοδοσίας, που οδηγούν σε διακυμάνσεις της παρεχόμενης τάσης. Τα φορτία που παρουσιάζουν συνεχείς, γρήγορες διακυμάνσεις (όπως ηλεκτρικοί κάμινοι, ηλεκτροσυγκολλητές, εγκαταστάσεις με συχνές εκκινήσεις κινητήρων, μονάδες κλιματισμού, ανεμιστήρες, μηχανισμοί κινητήρων με κυκλική λειτουργία, ελασματοουργεία, μηχανήματα με μεγάλες αλλαγές ταχύτητας των κινητήρων, πριόνια και μηχανήματα διάλυσης αυτοκινήτων) είναι λοιπόν εκείνα που πιθανότατα θα προκαλέσουν διακυμάνσεις τάσεως.

Οι συχνές, γρήγορες διακυμάνσεις σε ρεύματα φορτίου αποδίδονται στις λειτουργίες εκκίνησης κινητήρων, όπου το ρεύμα του κινητήρα συνήθως είναι 3–5 φορές το ονομαστικό ρεύμα για μία σύντομη χρονική

περίοδο. Εάν ένας αριθμός κινητήρων τίθεται σε λειτουργία την ίδια ώρα, ή αν ο ίδιος κινητήρας ξεκινά και σταματά επανειλημμένα, η συχνότητα των αλλαγών της τάσεως μπορεί να προκαλέσει μαρμαρυγή (τρεμοπαίξιμο) στις εγκαταστάσεις φωτισμού, που θα είναι ορατή με γυμνό μάτι.

Θόρυβος

Ο θόρυβος στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι μια χαμηλού πλάτους αλλά υψηλής συχνότητας διαταραχή. Είναι δυνατό να δημιουργηθεί τόσο από υψηλής ισχύος διαταραχές όσο και από κανονική λειτουργία ηλεκτρολογικού εξοπλισμού αλλά και από τυχόν δυσλειτουργία ή κακή συντήρηση. Μπορεί να οφείλεται επίσης σε απομακρυσμένους κεραυνούς, ζεύξεις και αποζεύξεις φορτίων, ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.α.

Μεταβολές συχνότητας

Αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται σπάνια στο ηλεκτρικό δίκτυο, οι μεταβολές της συχνότητας είναι πιο συχνές σε υποστηρικτικά συστήματα ηλεκτροδότησης (back-up) όπως μικρής ισχύος ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Μεταβολές στη συχνότητα μπορούν να δημιουργούνται εάν το τοπικό Η/Π ζεύγος διαθέτει προβληματικό ή μη κατάλληλο ρυθμιστικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου της ταχύτητας. Αυτή η διαταραχή μπορεί επίσης να προκληθεί με την απόζευξη ενός πολύ μεγάλου φορτίου (στιγμιαία αύξηση συχνότητας στο σύστημα μέχρι την εξισορρόπηση) ή γεννήτριας (στιγμιαία μείωση συχνότητας στο σύστημα).

Αρμονικές

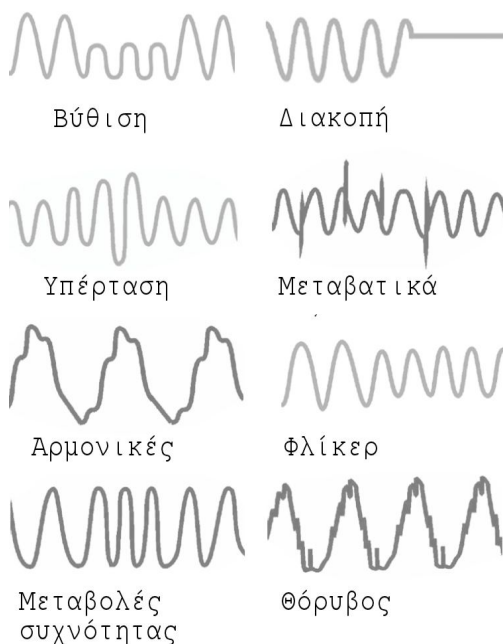
Αρμονικές καλούνται τα ημιτονοειδή ρεύματα ή τάσεις με συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου. Διαταραγμένες περιοδικές κυματομορφές αναλύονται σε άθροισμα της θεμελιώδους και των αρμονικών που δημιουργούνται από τις μη γραμμικές χαρακτηριστικές συστημάτων ισχύος και φορτίου.

Δια-αρμονικές

Τάσεις ή ρεύματα που έχουν συχνότητα η οποία δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας με την οποία το σύστημα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί καλούνται δια-αρμονικές ή ενδιάμεσες αρμονικές.

Οι ενδιάμεσες αρμονικές είτε έχουν διακριτές συχνότητες είτε εμφανίζονται σε ζώνη συχνοτήτων και μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα όλων των τάξεων τάσης. Οι συνήθεις πηγές της διαταραχής των ενδιάμεσων αρμονικών είναι στατικοί μετατροπείς συχνότητας, κυκλομετατροπείς (cycloconverters), επαγωγικοί κινητήρες και συσκευές εκκενώσεως τόξου. Οι επιπτώσεις των ενδιάμεσων αρμονικών δεν είναι ακόμα πλήρως

κατανοητές για αυτό και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. Έχει αποδειχθεί πάντως ότι επηρεάζουν τις γραμμές μεταφοράς και προκαλούν οπτική αστάθεια (flicker) σε οθόνες και αλλά οπτικά μέσα, όπως σωλήνες καθοδικών ακτίνων (CRTs).



Εικόνα 2-3:κυματομορφές της τάσης των διαταραχών που αναφέρθηκαν

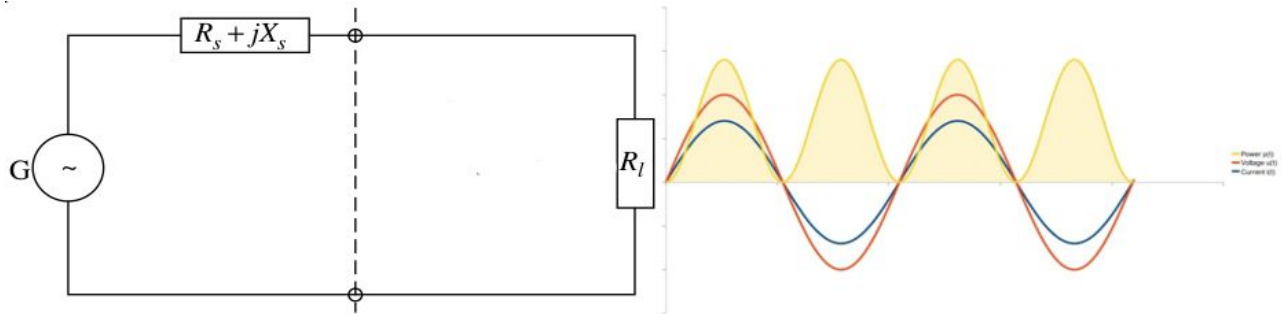
2.4 Αρμονικές

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί περαιτέρω και με περισσότερη λεπτομέρεια το φαινόμενο των αρμονικών ως πρόβλημα του κλάδου της ποιότητας ισχύος. Επίσης θα δοθεί έμφαση στον τρόπο με τον οποίο εισάγονται οι αρμονικές σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, στα προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν καθώς και με ποιούς τρόπους μπορούν να περιοριστούν. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα των αρμονικών δεν αποτελεί ούτε κατά διάνοια κάτι πρωτοφανές αλλά αντιθέτως υπάρχει από τότε που άρχισε να εδραιώνεται η χρήση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος. Βέβαια, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια με την ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση των ηλεκτρονικών ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο το πρόβλημα των αρμονικών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

2.4.1 Μηχανισμός δημιουργίας των αρμονικών

Η ηλεκτρική ενέργεια όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγεται κανονικά σε σταθερές συχνότητες (50Hz ή 60Hz) και η παραγόμενη τάση της γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ημιτονοειδής. Όταν αυτή η τάση της γεννήτριας τροφοδοτήσει ένα γραμμικό φορτίο (με γραμμική

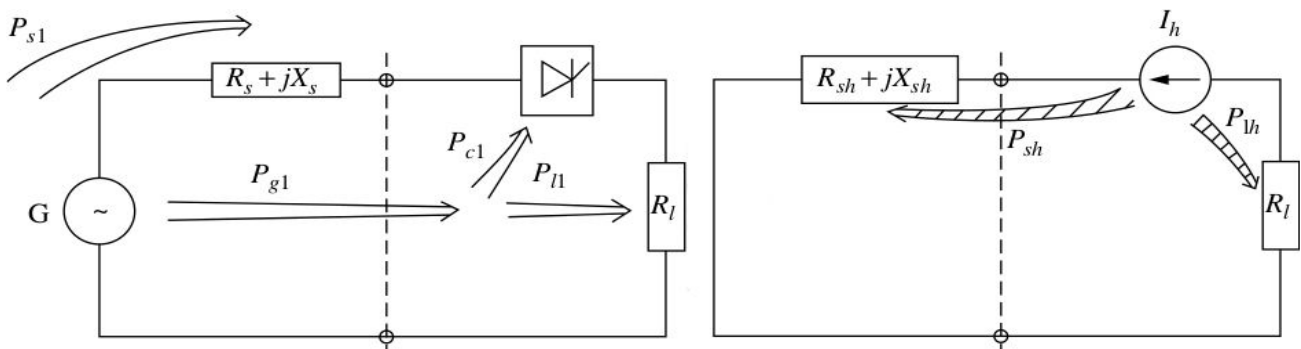
χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης), το ρεύμα που θα διαρρέυσει το φορτίο θα είναι συνεπακόλουθα γραμμικό και ανάλογο με το είδος του φορτίου (επαγωγικό, χωρητικό, ωμικό) θα καθυστερεί, θα προηγείται ή θα είναι αντίστοιχα συμφασικό (εικόνα 2-4)^[7].



Εικόνα 2-4: Στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin συστήματος γεννήτριας με γραμμικό φορτίο σε σύνδεση διαμέσου μιας γραμμής με σύνθετη αντίσταση, η τάση στα άκρα του φορτίου είναι ημιτονοειδής καθώς και το ρεύμα που θα διαρρέυσει το φορτίο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποια επιπλέον πτώση τάσης, στο δεξί διάγραμμα φαίνονται οι κυματομορφές: της ηλεκτρικής ισχύος (κίτρινη), της τάσης (κόκκινη) και του ρεύματος (μπλε)

Αν αντιθέτως, εφαρμοστεί μία ημιτονοειδής τάση σε ένα μη γραμμικό φορτίο το ρεύμα που θα το διαρρέυσει θα είναι προφανώς μη γραμμικό (εξαρτώμενο πάντα από τη μη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του). Αυτό το μη ημιτονοειδές ρεύμα λόγω της παρουσίας της σύνθετης αντίστασης θα δημιουργήσει επιπλέον μία μη ημιτονοειδή πτώση τάσης στο ζυγό του φορτίου και επομένως θα παραμορφώσει την τάση (εικόνα 2-5). Με αυτό τον τρόπο λοιπόν εισάγονται αρμονικές στην τάση λόγω των μη γραμμικών φορτίων.

Η γεννήτρια παρέχει ισχύ P_{g1} στο ΣΚΣ, από αυτήν ένα μέρος της P_{11} καταναλώνεται από το φορτίο ενώ ένα σχετικά μικρότερο τμήμα της P_{c1} μετατρέπεται σε ισχύ σε διαφορετικές συχνότητες στο διακοπτικό στοιχείο όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

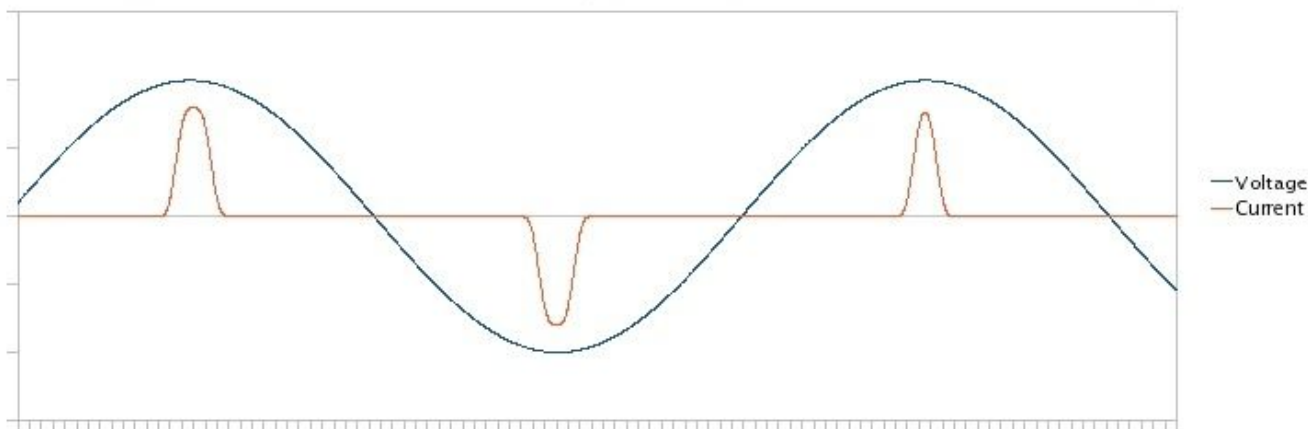


Εικόνα 2-5: Μηχανισμός δημιουργίας των αρμονικών, δεξιά αρμονικό κύκλωμα^[10]

Επίσης η γεννήτρια παρέχει ακόμα και την ισχύ P_{s1} που καταναλώνεται από το σύστημα μεταφοράς αλλά και παραγωγής.

Επομένως, εφόσον έχει θεωρηθεί ότι η αρχική τάση που παρέχει η γεννήτρια είναι ημιτονοειδής, παρέχει ισχύ μόνο στην θεμελιώδη

συχνότητα και άρα μπορούμε να σχηματίσουμε το λεγόμενο *αρμονικό κύκλωμα* όπου η γεννήτρια βραχυκυκλώνεται, η σύνθετη αντίσταση της γραμμής αντικαθίσταται από την αρμονική σύνθετη αντίσταση και το διακοπτικό στοιχείο αντικαθίσταται με μια αρμονική πηγή ρεύματος. Η αρμονική πηγή ρεύματος δημιουργεί τα ίδια αποτελέσματα στην τάση που δημιουργούσε και το μη γραμμικό ηλεκτρικό στοιχείο με την διαφορά όμως ότι στο κύκλωμα δεν υπάρχει η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης καθώς δεν μας ενδιαφέρει για την ανάλυση των αρμονικών (σε αυτό το στάδιο τουλάχιστον). Στην ουσία πρόκειται για μια αναπαράσταση του κυκλώματος όπου ρέουν μόνο αρμονικά ρεύματα και στο σημείο σύνδεσης με το φορτίο υπάρχουν μόνο αρμονικές τάσης. Όπως φαίνεται και από το προηγούμενο διάγραμμα η συνολική απώλεια ενέργειας αποτελείται από την ενέργεια στη θεμελιώδη συχνότητα που καταναλώθηκε στο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς και την ενέργεια λόγω της έγχυσης των αρμονικών στο δίκτυο η οποία καταναλώνεται και αυτή στο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς P_{sh} . Ένα τμήμα από την ενέργεια λόγω της έγχυσης των αρμονικών στο δίκτυο P_{lh} θα καταναλωθεί τελικά από το φορτίο αν και είναι γενικά ανεπιθύμητη καθώς όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα στα φορτία.



Εικόνα 2-6: Παράδειγμα φορτίου που τραβάει μη ημιτονοειδές ρεύμα

2.4.2 Πηγές των αρμονικών

Έχει αναφερθεί αρκετές φορές ότι οι πιο σημαντικές πηγές των αρμονικών και συγκεκριμένα όσον αφορά στα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος. Από αυτή την οπτική γωνία εξετάζονται οι αρμονικές που θεωρείται ότι εγχύονται σε ένα δίκτυο και μολύνουν την τάση του δικτύου. Πρόκειται επομένως για μια θεώρηση έγχυσης των αρμονικών από "κάτω προς τα πάνω", από τους τελικούς καταναλωτές του δικτύου δηλαδή μέχρι τα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου. Δεν πρέπει όμως να αμελήσουμε να αναφέρουμε ότι υπάρχουν και άλλοι τρόποι με τους οποίους δημιουργούνται ή ακόμη ενισχύονται, οι αρμονικές σε ένα

δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα επιπλέον πηγές αρμονικών αποτελούν τα επόμενα^[9]:

- Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές: Οι αρμονικές οφείλονται στις οδοντώσεις του πυρήνα και στις ατέλειες των μαγνητικών κυκλωμάτων τους. Γενικά οι ηλεκτρικές μηχανές σχεδιάζονται έτσι ώστε οι αρμονικές χαμηλής τάξης ειδικότερα να αλληλοεξουδετερώνονται. Ανάλογα με τη μηχανή αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέχρι περίπου την 11η τάξη. Σημειώνεται ότι λόγω συμμετρίας στις μηχανές, εμφανίζονται άρτιες τάξεις αρμονικών.
- Ρεύματα μαγνήτισης των M/Σ : Οι αρμονικές οφείλονται στο μαγνητικό κορεσμό των πυρήνων και στη μαγνητική υστέρηση.
- Σιδηροσυντονισμός: Οι αρμονικές οφείλονται σε ισχυρό μη γραμμικό φαινόμενο προκαλούμενο από την αλληλεπίδραση μη γραμμικής επαγωγικής αντίδρασης (για παράδειγμα ένας μετασχηματιστής) με τη χωρητικότητα του συστήματος.
- Μη γραμμικές μετατροπές στο δίκτυο: ανορθωτές, μετατροπείς, ελεγκτές τάσης, μετατροπείς συχνότητας κ.ά.
- Τριφασικά φορτία : εισάγουν κυρίως αρμονικές περιττής τάξεως (5η, 7η, 11η, 13η, 17η αρμονική).
- Συσκευές που συνδυάζουν ημιαγωγούς και συστήματα διακοπής (για εξοικονόμηση ενέργειας).
- Συσκευές ελέγχου των κινητήρων σε εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας έλξης (π.χ. ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι).
- Συσκευές μετατροπής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσεως.
- Ηλιακά και αιολικά συστήματα μικρής ισχύος με τους αντίστοιχους μετατροπείς ισχύος από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα για τη σύνδεση των πηγών με τα συστήματα διανομής.
- Συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Η χρήση συστοιχιών πυκνωτών προκαλεί παραγωγή αρμονικών λόγω συντονισμού, όπως επίσης και η χρήση πηνίων αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση χωρητικών φορτίσεων (π.χ. μεγάλων γραμμών μεταφοράς). Άλλος λόγος δημιουργίας αρμονικών στα ανωτέρω συστήματα είναι η χρήση θυρίστορ, περιλαμβάνονται στις μεθόδους διόρθωσης του συντελεστή ισχύος.
- Συσκευές φόρτισης συσσωρευτών. Απαιτούν χρήση ανορθωτών και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα σε ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με συσσωρευτές.
- Συσκευές άμεσης μετατροπής ενέργειας (π.χ. μαγνητο-υδροδυναμική μετατροπή, κύτταρα καυσίμου, κλπ), που απαιτούν μετατροπείς από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα.
- Κυκλομετατροπείς (cycloconverters) που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων και μεγάλων ροπών, κυρίως σε

βιομηχανικές εφαρμογές.

- Στοιχεία θέρμανσης PBM (Pulse Burst-Modulated), που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους κλιβάνους.
- Κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου, μηχανήματα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου, λαμπτήρες αερίου.

2.4.3 Προβλήματα που δημιουργούν οι αρμονικές

Ο εξοπλισμός αποκρίνεται διαφορετικά κατά την εφαρμογή σε αυτόν αρμονικής τάσης και εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο της ηλεκτρικής συσκευής. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι περισσότεροι τύποι οικιακών θερμοσιφώνων και θερμοαστρών δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου. Από την άλλη, τα τυλίγματα των επαγωγικών κινητήρων υπερθερμαίνονται από τις αρμονικές, προκαλώντας με αυξημένο ρυθμό μείωση της αποδοτικότητας των μονώσεων, όπως και μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να δώσουν αντιστοίχως μεγαλύτερα ρεύματα από αυτά της θεμελιώδους συνιστώσας και για αυτό μπορεί εύκολα να υποτιμηθεί ο βαθμός αύξησης της θερμότητας στον κινητήρα (στην αρχική μελέτη θεωρήθηκε ότι θα φτάσει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο με αποτέλεσμα καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα). Η λειτουργία κάποιων συσκευών βασίζεται σε μία ακριβή κυματομορφή τάσης με ελάχιστες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα αυτές οι συσκευές να δυσλειτουργούν παρουσία αρμονικών. Πολλές από τις αρμονικές που διαρρέουν το δίκτυο οφείλονται στην παραμόρφωση που εισάγουν μονοφασικά φορτία, όπως παρατηρείται σε κτίρια που στεγάζουν γραφεία, και μπορεί να προκαλέσουν διαρροή ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό που ξεπερνούν την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Σε συνθήκες χωρίς αρμονικές, ο ουδέτερος μεταφέρει πολύ μικρά ρεύματα, και κατά συνέπεια έχει γίνει πλέον πρακτική να τοποθετούνται αγωγοί στον ουδέτερο που να μπορούν να μεταφέρουν ολόκληρο ή πιθανά το μισό από την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος.

Στο σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, οι μετασχηματιστές των υποσταθμών και οι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι αυτοί που επηρεάζονται περισσότερο. Οι μετασχηματιστές επηρεάζονται από παραμορφωμένη κυματομορφή ρεύματος που μπορεί να προκαλέσει επιπλέον θέρμανση και να οδηγήσει σε μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι πυκνωτές επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη κυματομορφή της τάσης, που αν είναι σημαντικά παραμορφωμένη μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση του διηλεκτρικού μέσου στον πυκνωτή, με κίνδυνο να οδηγήσει σε έκρηξη. Οι περισσότεροι μηχανικοί στις εργοστασιακές εγκαταστάσεις ενδιαφέρονται μόνο για προβλήματα στην παρεχόμενη ισχύ τα οποία γίνονται άμεσα αντιληπτά, αφού οδηγούν σε άμεση δυσλειτουργία ή αστοχία του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει παρατηρηθεί ότι η επίδραση των αρμονικών στον εξοπλισμό μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση και μείωση της διάρκειας ζωής (ή την διάρκεια ασφαλούς λειτουργίας, δηλαδή μετά απαιτείται συντήρηση ή επισκευή) σε μέγεθος

μέχρι και το μισό της αναμενόμενης, με προφανείς οικονομικές επιπτώσεις. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα στο σύστημα, οι αρμονικές μπορούν να περνούν απαρατήρητες εκτός αν τύχει να γίνει κάποια προκαθορισμένη μέτρηση στην θερμοκρασία της συσκευής ή στην κυματομορφή τάσης που τροφοδοτείται. Τέλος οι αρμονικές μπορούν να επιφέρουν στα φορτία τις ακόλουθες επιπτώσεις^[9,12]:

- Οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός κίνησης υπερθερμαίνονται λόγω της επιπρόσθετης φόρτισης που υφίστανται.
- Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν δεν είναι πλέον ίσο με μηδέν (περίπτωση συμμετρικών φορτίων). Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδέτερου να μην είναι εντός των αποδεκτών ορίων τις περισσότερες φορές.
- Υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών κινδυνεύουν να καταστραφούν, σε περιπτώσεις όπου ο κλάδος στον οποίο συνδέονται, εμφανίζει ίδια συχνότητα με κάποιες από τις αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του συγκεκριμένου κλάδου ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα να αυξάνει κατά πολύ το ρεύμα που τον διαρρέει. Έτσι το πλάτος των αρμονικών αυξάνεται (φαινόμενο συντονισμού resonance).
- Τα μέσα ζεύξης και προστασίας φθείρονται και είναι πιθανό να λειτουργήσουν ανεπιθύμητα.
- Η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των γεννητριών καθίσταται αναξιόπιστη.
- Σημειώνονται λανθασμένες καταγραφές ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.
- Γίνεται σπατάλη ενέργειας με αποτέλεσμα οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υψηλότεροι.
- Η ύπαρξη αρμονικών σε συχνότητες μεγαλύτερες του 1kHz δυσχεραίνει τη χρησιμοποίηση του δικτύου για τη μεταφορά υψίσυχνων τηλεπικοινωνιακών σημάτων τα οποία εξυπηρετούν την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και του κέντρου ελέγχου του Ηλεκτρικού Συστήματος.
- Επίσης, η ύπαρξη ανώτερων αρμονικών μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση σε γειτονικές συσκευές, που δεν συνδέονται άμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο (μέσω ακτινοβολίας).

2.4.4 Αντιμετώπιση των αρμονικών^[10]

Η αντιμετώπιση των αρμονικών είναι ένα δύσκολο πρόβλημα. Οι κυριότερες λύσεις που προτείνονται είναι η εξάλειψή τους με τη βοήθεια φίλτρων ενεργών ή παθητικών. Σε μακροπρόθεσμο επίπεδο όμως έχει καταστεί σαφές ότι παράλληλα με την εγκατάσταση φίλτρων πολύ σημαντική θα ήταν η βελτίωση του ηλεκτρικού δικτύου όπως για παράδειγμα η χρήση υπόγειων καλωδίων με μικρότερες τιμές σύνθετων

αντιστάσεων, η τοποθέτηση των μη γραμμικών φορτίων όσο τον δυνατό πιο κοντά στην πηγή, η ομαδοποίηση και ξεχωριστή τροφοδοσία των μη γραμμικών φορτίων από άλλα γραμμικά ευαίσθητα φορτία, η έγκαιρη και σωστή συντήρηση των μετασχηματιστών κ.α. Ας μην ξεχνάμε ότι με ένα δίκτυο σε καλή λειτουργία δεν αντιμετωπίζονται μόνο οι αρμονικές αλλά παράλληλα μπορούν να βελτιωθούν και άλλα προβλήματα της ποιότητας ισχύος. Ο πιο συνήθης τρόπος αποκοπής των αρμονικών με φίλτρα είναι η εγκατάσταση φίλτρων, συνήθως σε σειρά, που απορροφούν τα ανεπιθύμητα αρμονικά ρεύματα παρέχοντας στην έξοδό τους μια καλύτερη ποιότητα τάσης. Το μειονέκτημα αυτών των παθητικών φίλτρων (κίνδυνος υπερφόρτισης, εισαγωγή νέων συχνοτήτων συντονισμού) οδήγησε στην ανάπτυξη των ενεργών φίλτρων, όπου το ρεύμα ελέγχεται πλήρως και προσαρμόζεται στην υπάρχουσα παραμόρφωση τάσης και ρεύματος. Οι κυριότερες κατηγορίες φίλτρων είναι οι ακόλουθες:

Παθητικά φίλτρα:

Τα φίλτρα απόσβεσης αρμονικών είναι συστήματα τα οποία παγιδεύουν τις αρμονικές και δεν τις επιτρέπουν να διεισδύσουν στο δίκτυο. Αποτελούνται από συνδυασμό πηνίων και πυκνωτών και αντιστάσεων, ώστε να συντονίζονται (να ελαχιστοποιούν δηλαδή τη σύνθετη αντίστασή τους) σε επιλεγμένες συχνότητες. Μπορεί να λάβει τη μορφή μιας απλής αυτεπαγωγής στη γραμμή ή μπορεί να περιλαμβάνει μια σειρά παράλληλων συντονισμένων φίλτρων για την εξάλειψη των αρμονικών. Τα παθητικά φίλτρα αρμονικών επίσης χωρίζονται με βάση τον τρόπο που συνδέονται με το φορτίο.

α) **σε σειρά:** Εδώ το φίλτρο τοποθετείται σε σειρά με το φορτίο και χρησιμοποιεί παράλληλες συνιστώσες, δηλαδή παράλληλα πηνία και πυκνωτές. Το φίλτρο αυτό απορρίπτει την είσοδο αρμονικών ρεύματος στο φορτίο.

β) **παράλληλα:** Το φίλτρο είναι τοποθετημένο παράλληλα με το φορτίο και τα στοιχεία τοποθετούνται σε σειρά. Το φίλτρο σε παράλληλη σύνδεση απορροφάει τις αρμονικές του ρεύματος έτσι ώστε να μην περάσουν στο φορτίο.

Με βάση τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του παθητικού φίλτρου, υπάρχουν οι ακόλουθοι τύποι:

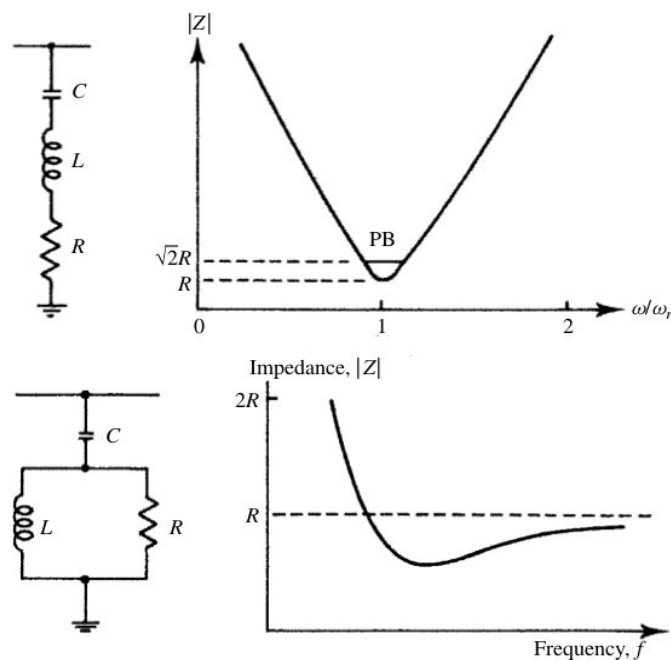
Το **ζωνοπερατό** φίλτρο, είναι ένα κοινό παθητικό φίλτρο που έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά με έναν αντιστάτη.

Το **υψιπερατό** φίλτρο έχει μία αντίσταση συνδέεται παράλληλα με μια αυτεπαγωγή. Αυτό βοηθά στη εξάλειψη αρμονικών υψηλότερων συχνοτήτων.

Ένα φίλτρο **τύπου-C** χρησιμοποιείται για πολύπλοκα φορτία, όπως κυκλομετατροπείς και καμίνους ηλεκτρικού τόξου και αποτελεί μια ειδική παραλλαγή υψιπερατού φίλτρου. Αυτό το φίλτρο παρέχει στο φορτίο άεργο ισχύ και βοηθάει στην αποφυγή σχηματισμού παράλληλων κυκλωμάτων συντονισμού με το φορτίο.

Τα **αποσυντονισμένα** φίλτρα είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν

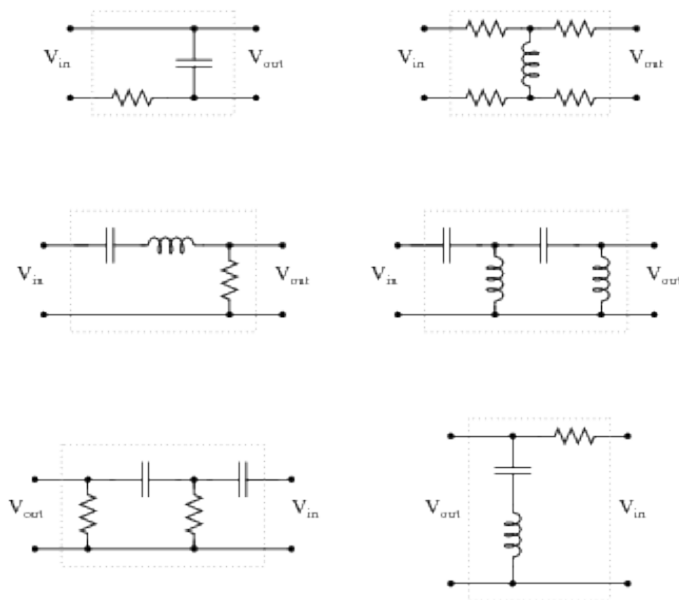
ρεύματα σε συχνότητες κοντινές σε αυτές των ρευμάτων αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Ο λόγος που σχεδιάζονται κατ' αυτόν τον τρόπο είναι για να μπορούν να αποκόπτουν ένα εύρος ρευμάτων αρμονικών (στην περιοχή των συχνοτήτων που ενδιαφέρει), περιορίζοντας ταυτόχρονα περισσότερες από μία αρμονικές και μειώνοντας συγχρόνως την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD-I %). Είναι φίλτρα που απαιτούν ιδιαίτερη τεχνογνωσία κατά το σχεδιασμό τους, καθώς δε συντονίζονται απόλυτα στις αρμονικές που εμφανίζονται στο εκάστοτε δίκτυο κι έτσι δεν παρουσιάζεται κίνδυνος εμφάνισης πολύ υψηλών ρευμάτων στους βρόχους που συνδέονται. Στην περίπτωση λοιπόν που τοποθετείται αποσυντονισμένο φίλτρο σε κάποιο σημείο του δικτύου, αυτό εμφανίζει μία πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού του, με αποτέλεσμα τα ρεύματα τόσο σε αυτήν όσο και σε κοντινές συχνότητες στη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου να διέρχονται όλα από τον εν λόγω κλάδο (αποκοπή). Έτσι τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν ένα εύρος αρμονικών ρευμάτων και όχι μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος. Μειονέκτημά τους όμως είναι ότι έτσι δεν μπορούν να φιλτράρουν το 100% της αρμονικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να παραμένουν έπειτα και κάποιες αρμονικές στο δίκτυο.



Εικόνα 2-6: Στο πάνω τμήμα της εικόνας φαίνεται ένα παθητικό μονο-συντονισμένο φίλτρο σε σειρά και δίπλα η απόκριση συχνότητάς του. Στο κάτω αντίστοιχα ένα παθητικό φίλτρο δεύτερης τάξης

Τα **συντονισμένα φίλτρα**^[11] είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν ρεύματα σε συχνότητες ίδιες με αυτές των αρμονικών ρευμάτων που εμφανίζονται στο δίκτυο. Αποτελούνται από βαθμίδες πυκνωτών και πηνίων συνδεδεμένων εν σειρά. Η κάθε βαθμίδα έχει τη δική της συχνότητα συντονισμού και μάλιστα τέτοια που να αποκόπτει μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος. Με τα συντονισμένα φίλτρα αποκοπής αρμονικών

επιτυγχάνεται άριστη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο καθώς αποκόπτουν ακριβώς τις αρμονικές (5η, 7η, 11η...). Οι συχνότητες συντονισμού των συντονισμένων φίλτρων βρίσκονται πάρα πολύ κοντά (σχεδόν ακριβώς) στις αντίστοιχες συχνότητες των αρμονικών ρευμάτων που αποκόπτουν. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων να είναι υπερβολικά μικρές και έτσι να δημιουργούνται υψηλά ρεύματα αρμονικών που οδηγούν τις πυκνωτικές διατάξεις του φίλτρου σε μεγάλη καταπόνηση. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αντισταθμίζουν εύκολα την άεργο ισχύ σε δυναμικά φορτία και ενέχουν τον κίνδυνο απορρόφησης αρμονικών ρευμάτων από τη μεριά της υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος, τα καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικά στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και τελικά την εγκατάστασή τους στη βιομηχανία. Παράλληλα, βασικά τους πλεονεκτήματα αποτελούν η άριστη αποκοπή των αρμονικών του δικτύου, σε ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό που πετυχαίνεται με τα αποσυντονισμένα φίλτρα, καθώς και το γεγονός ότι παράλληλα με τον καθαρισμό των αρμονικών αντισταθμίζουν και την άεργο ισχύ του δικτύου.

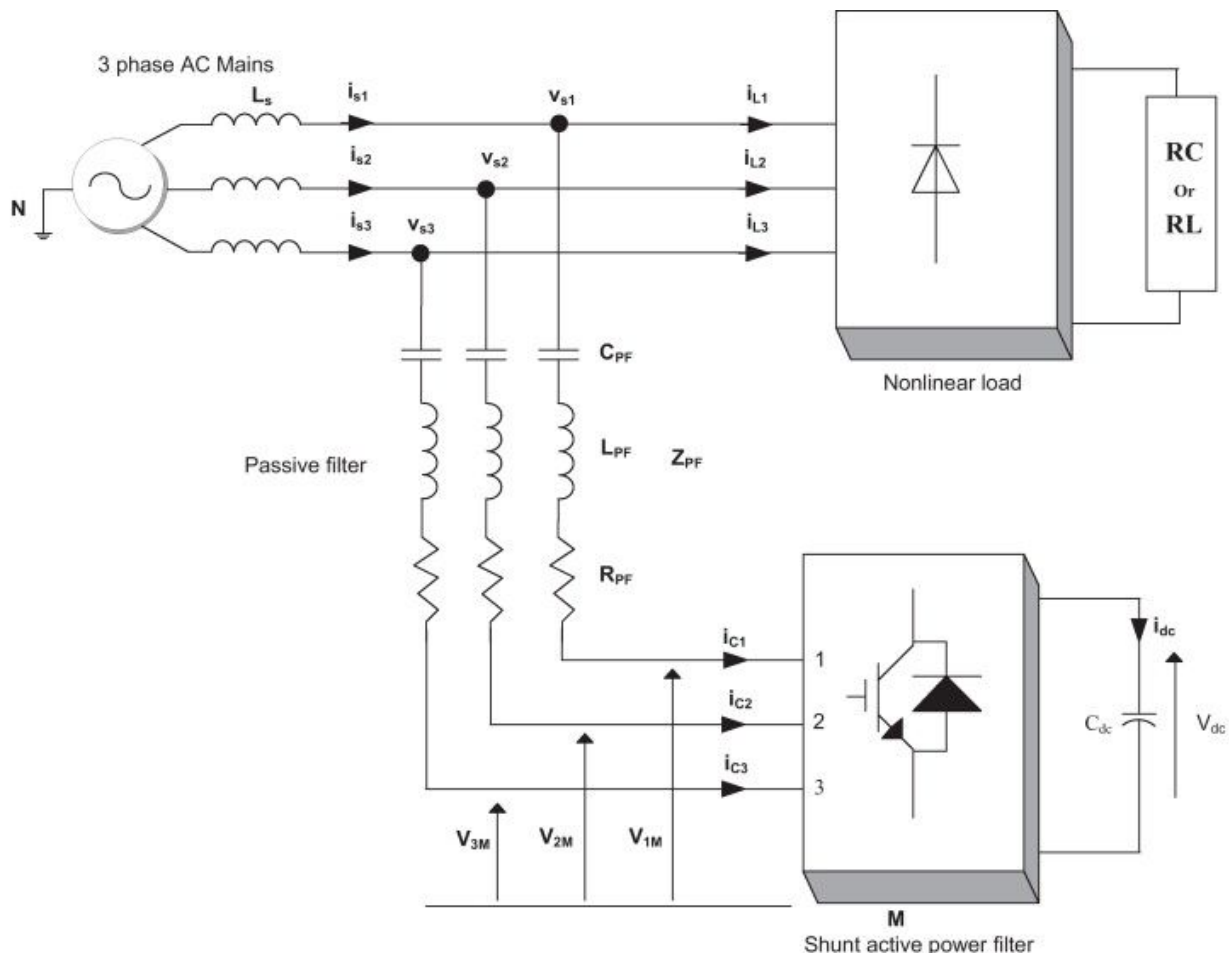


Εικόνα 2-7: Διάφορες τοπολογίες παθητικών φίλτρων

Τα **ενεργά φίλτρα**^[6] αποτελούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που ανιχνεύουν την παρουσία της τάσης και αρμονικές ρεύματος και διοχετεύουν αρμονικές αντιστάθμισης για την μείωση με αυτόν τον τρόπο της αρμονικής παραμόρφωσης. Το ενεργό φίλτρο χρησιμοποιεί μηχανισμούς ανάδρασης, και ελέγχει την τάση και το ρεύμα συνεχώς μειώνοντας έτσι αποτελεσματικά τις αρμονικές. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ο μη αντισταθμισμένος συντελεστής ισχύος είναι κοντά στη μονάδα και επομένως δεν απαιτείται τόσο αντιστάθμιση άεργου όσο μείωση της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD). Είναι ιδιαίτερα ακριβές λύσεις και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι

απαιτήσεις σε εξάλειψη αρμονικών είναι αυξημένες όπως όταν υπάρχει μεγάλο περιεχόμενο σε μη γραμμικά φορτία, ή όταν οι απαιτήσεις για καλή ποιότητα τάσης και ρεύματος είναι ιδιαίτερα αυξημένες ($THD_v < 3\%$), ή όταν υπάρχει δυναμική μεταβολή της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης, ή ταχέως μεταβαλλόμενα μη γραμμικά φορτία (για παράδειγμα στα νοσοκομεία, ακτίνες X) ή ακόμα όταν υπάρχει ευαίσθητος ηλεκτρονικός εξοπλισμός ο οποίος απαιτεί αυξημένη ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος για τη σωστή λειτουργία του.

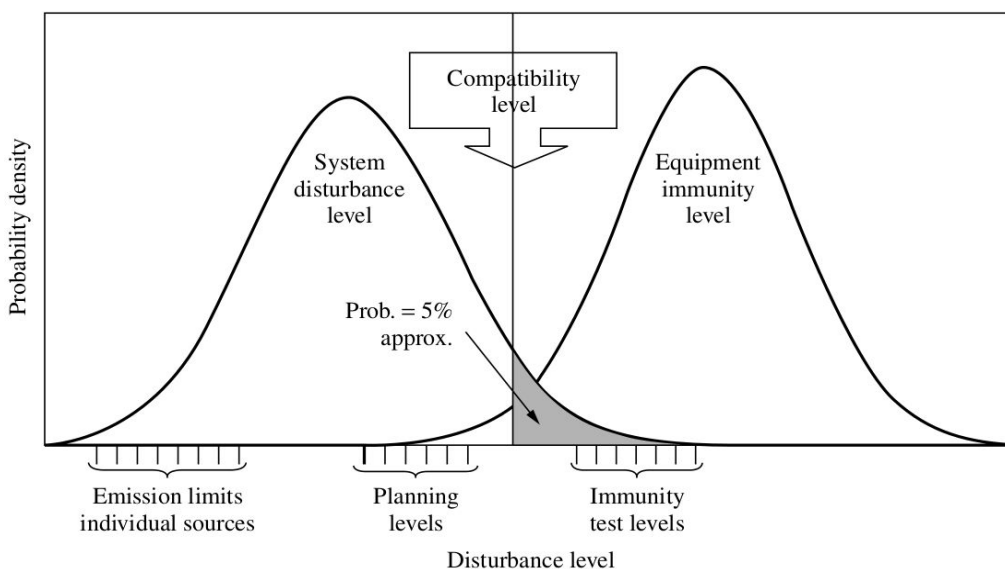
Το βασικότερο πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων είναι ότι πετυχαίνουν ολοκληρωτική αποκοπή των αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο μειώνοντας σχεδόν ολοκληρωτικά την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση ενώ παράλληλα είναι εύκολα στην εγκατάσταση και δεν πιάνουν ιδιαίτερο χώρο (σε αντίθεση με τα παθητικά). Ακόμη δεν υπερφορτίζονται, ενώ η δυναμική αλλαγή στην Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του δικτύου δεν επηρεάζει τη λειτουργία τους. Το μεγαλύτερό τους μειονέκτημα αποτελεί το κόστος τους το οποίο είναι αρκετά αυξημένο σε σχέση με τα παθητικά.



Εικόνα 2-7: Συνδυασμός παθητικού και ενεργού φίλτρου παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο για την εξάλειψη των αρμονικών

2.5 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (emc) ως έννοια της ποιότητας ισχύος

Όπως γνωρίζουμε η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί εμπορικό προϊόν και για αυτόν ακριβώς το λόγο για να διατεθεί στο καταναλωτικό κοινό πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις με σκοπό να μην δημιουργεί προβλήματα στις ηλεκτρικές συσκευές του καταναλωτή. Αντίστοιχα, οι ηλεκτρικές συσκευές που συγκεκριμένα προορίζονται για την κατανάλωση της ανωτέρω ενέργειας είναι αναγκαίο να πληρούν και αυτές κάποιες άλλες προϋποθέσεις έτσι ώστε να μην δημιουργούν προβλήματα στο δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση λοιπόν γίνεται λόγος για κανονισμούς που δεσμεύεται να τηρεί ο παραγωγός - διανομέας της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στην δεύτερη ο κατασκευαστής μια ηλεκτρικής συσκευής. Η εναρμόνιση των ανωτέρω δύο είναι επιτακτική και σε διεθνές επίπεδο (και ιδιαίτερα λόγω παγκοσμιοποίησης) με την έννοια ότι μια ηλεκτρική συσκευή, οπουδήποτε και αν κατασκευάζεται, πρέπει από τη μία πλευρά να λειτουργεί ασφαλώς σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό δίκτυο (ακόμα και αν απαιτείται μετατροπή συχνότητας - τάσης) και από την άλλη πλευρά να μη προξενεί προβλήματα ποιότητας ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πρόκειται λοιπόν για τεχνικούς κανονισμούς, πρότυπα, τα οποία μπορούν να θεσπίζονται τόσο σε εθνικό επίπεδο από εθνικούς οργανισμούς όπως ο ΕΛΟΤ για την Ελλάδα^[43], όσο και σε διεθνές.



Εικόνα 2-8: Η εναρμόνιση των διαταραχών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με το περιθώριο απρωσίας των ηλεκτρικών διατάξεων^[10]

Οι κυριότεροι οργανισμοί (διεθνείς ή ευρωπαϊκοί) που διαμορφώνουν τα πρότυπα που αφορούν την ποιότητα ισχύος είναι:

1. IEC (International Electrotechnical Commission)
2. ISO (International Organization for Standardization)
3. CEN (European Committee for Standardization)

4. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)
5. IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)

Σύμφωνα με το υπουργείο ανάπτυξης και το Κείμενο της Οδηγίας EMC 89/336/ΕΟΚ για την προσέγγιση των νομοθεσιών των Κρατών Μελών σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ως ατρωσία ορίζεται η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα της λειτουργίας του παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής ενώ ως Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον, χωρίς να προκαλεί απαράδεκτες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε ευρίσκεται στο περιβάλλον αυτό. Από την πλευρά της παραγωγής και της διανομής στη χώρα μας, το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 50160, το οποίο έχει εκδοθεί και στη χώρα μας ως Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50160/25.05.2000 καθορίζει ορισμένα όρια μέσα στα οποία είναι αποδεκτή η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον κάθε καταναλωτή.

Επίσης, διάφορες τεχνικές αναφορές όπως οι IEC 61000-3-6 & 61000-3-7 ορίζουνε τρεις θεμελιώδης παραμέτρους:

- Επίπεδα εκπομπής, τα οποία ανταποκρίνονται στον βαθμό "ρύπανσης" του δικτύου, που παράγεται από κάθε μεγάλο καταναλωτή
- Επίπεδα συμβατότητας, τα οποία ανταποκρίνονται στον βαθμό "ρύπανσης" στον οποίο όλες οι συσκευές θα πρέπει να ανθίστανται επιτυχώς.
- Επίπεδα σχεδιασμού, πρέπει να είναι σαφώς χαμηλότερα από τα επίπεδα συμβατότητας, τα οποία πρέπει να οριοθετηθούν σαν στόχος από τον διανομέα της ισχύος.

3. Πρότυπα προδιαγραφών και ορίων της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος και κανονισμοί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (emc)

3.1 Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Για την διαδικασία της μέτρησης και της πιστοποίησης της ποιότητας ισχύος είναι αναγκαία δύο διαφορετικά είδη προτύπων: πρότυπα για τις μεθόδους μέτρησης και πρότυπα που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης τάσης και του ρεύματος. Στα σύγχρονα όργανα που μετρούν την ποιότητα ισχύος, οι κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης υπόκεινται σε δειγματοληψία για να υπολογιστούν στη συνέχεια οι παράμετροι της ποιότητας ισχύος και οι παράμετροι αυτές μπορούν να υπολογιστούν με διαφορετικούς τρόπους καταλήγοντας σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι λοιπόν ιδιαίτερα σημαντικό τα όργανα μέτρησης να ακολουθούν τις μεθόδους υπολογισμού που επιβάλλουν τα αναγνωρισμένα πρότυπα, ιδίως όταν πρόκειται να συγκριθούν αποτελέσματα που έχουν προκύψει από διαφορετικά όργανα. Τα πρότυπα που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος **θέτουν τα επιτρεπτά όρια μέσα στα οποία πρέπει να κυμανθούν οι διάφορες διαταραχές της ποιότητας ισχύος**. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται κάποια από τα πρότυπα που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από διπλανά τους προβλήματα ποιότητας ισχύος. Σημειώνεται ότι όπως και είναι λογικό, τα πρότυπα αναθεωρούνται και ενημερώνονται, οπότε πλάι τους σημειώνεται η ημερομηνία που εκδόθηκαν ενώ παράλληλα πρέπει να αναφερθεί ότι για κάποια από αυτά ενδέχεται να κυκλοφορούν και επόμενες εκδόσεις.

Φαινόμενα	Πρότυπα
Κατηγοριοποίηση ποιότητας ισχύος	IEC 61000-2-5:1995, IEC 61000-2-1:1990 IEEE 1159:1995
Μεταβατικά φαινόμενα	IEC 61000-2-1:1990, IEC 816:1984 IEEE c62.41:1991 IEEE 1159:1995
Βύθιση, διακύμανση τάσης, διακοπή	IEC 61009-2-1:1990, IEEE 1159:1995
Αρμονικές	IEC 61000-2-1:1990, IEC 61000-4-7:1997, IEC 61000-3-2: 2004, IEEE 519:1992, IEC61727: 2004, IEC61000-03-12: 2004
flicker	IEC 61000-4-15:1997

3.2 Πρότυπα ποιότητας τάσης

Τα σημαντικότερα πρότυπα που προσδιορίζουν τα κύρια

χαρακτηριστικά της τάσης που παρέχεται στους καταναλωτές είναι τα ακόλουθα:

- **EN 50160 : 1999**^[13], Χαρακτηριστικά της τάσης που παρέχεται από το δημόσιο δίκτυο διανομής. Το πρότυπο αυτό καθορίζει τις μέγιστες τιμές ή μεταβολές των χαρακτηριστικών της τάσης που παρέχει το δίκτυο διανομής χαμηλής και μέσης τάσης στους καταναλωτές, σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Εφαρμόζεται μόνο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, που συμπεριλαμβάνεται ο σωστός χειρισμός των μονάδων προστασίας στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο. Μη κανονικές συνθήκες όπου δεν εφαρμόζεται το πρότυπο είναι : ακραίες καιρικές συνθήκες και φυσικές καταστροφές, ανάμειξη τρίτων παραγόντων, ενέργειες από δημόσιες αρχές, έλλειψη ενέργειας λόγω εξωτερικών παραγόντων. Παρακάτω παρατίθεται δύο πίνακες που συνοψίζουν τα όρια της τάσης που οφείλει να παρέχει το δίκτυο στους καταναλωτές, σύμφωνα με το EN 50160.

- **IEEE 519-1992**^[14], Συνιστώμενες πρακτικές και απαιτήσεις για τον έλεγχο των αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα. Ο οδηγός αυτός βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους τύπους μετατροπών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και το εμπόριο. Αναφέρεται στα προβλήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο αρμονικών και την άεργο αντιστάθμιση των μετατροπών. Θέτει όρια για διαταραχές στο εναλλασσόμενο δίκτυο διανομής που επιδρούν και σε άλλο εξοπλισμό.

- **IEEE P1564**, Προτείνει μεθόδους υπολογισμού διαφόρων χρήσιμων δεικτών για τη βύθιση τάσης.

- **IEEE 1366-2003**, Ο οδηγός προσδιορίζει κάποιους δείκτες και παράγοντες αξιοπιστίας που μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα διανομής, υποσταθμούς και κυκλώματα.

3.2.1 Πρότυπο EN 50160^[13]

Το πρότυπο EN50160 καλύπτει τις περιπτώσεις τριφασικών δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης ορίζοντας κριτήρια για την συχνότητα, το πλάτος, την κυματομορφή, το τρεμοπαίξιμο του φωτός (flicker) την συμμετρική φόρτιση των φάσεων κλπ. Ορίζει ένα μέγιστο επίπεδο απόκλισης για κάθε προσδιορισμένη παράμετρο από την ονομαστική της τιμή γύρω στο 5%. Οι περισσότερες παράμετροι χαρακτηρίζονται από:

- Μία συγκεκριμένη περίοδο μετρήσεως τους (συνήθως διάστημα μίας εβδομάδας).
- Το χρονικό διάστημα στο οποίο έγινε η μέτρησή τους.
- Ένα ατομικό κατώφλι της τιμής τους.

Μη κανονικές συνθήκες όπου δεν εφαρμόζεται το πρότυπο είναι: ακραίες καιρικές συνθήκες και φυσικές καταστροφές, ανάμειξη τρίτων παραγόντων, ενέργειες από δημόσιες αρχές, έλλειψη ενέργειας λόγω εξωτερικών παραγόντων.

Αποσκοπώντας στον έλεγχο του μεγίστου επιπέδου απόκλισης του 5% το πρότυπο ορίζει για κάθε παράμετρο τουλάχιστον δύο τελεστές N και Nn. N είναι ο αριθμός που εκφράζει το πόσες φορές έχει ελεγχθεί μία παράμετρος σχετική με την ποιότητα ισχύος (με δεδομένο ότι η ονομαστική τάση Un βρίσκεται εντός του ορίου του +/-15%). Nn είναι ο αριθμός των περιπτώσεων κατά τις οποίες μία παράμετρος σχετική με την ποιότητα ισχύος δεν ήταν εναρμονισμένη με τα όρια που επιβάλλει το πρότυπο (με δεδομένο ότι η ονομαστική τάση Un βρίσκεται πάντα εντός του +/-15%). Αυτός ο λόγος Nn/N ορίζει την εναρμόνιση ή όχι με το πρότυπο. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η απαίτηση του προτύπου ικανοποιείται όταν:

$$\frac{N_n}{N} \leq 5\%$$

(εξαίρεση αποτελεί η συχνότητα και τα σήματα τάσεων).

Παρακάτω δίνονται ορισμένοι ορισμοί σύμφωνα με το πρότυπο, που θα χρησιμοποιηθούν και στην υπόλοιπη εργασία:

Σημεία Παροχής

Είναι τα σημεία στα οποία ο πελάτης συνδέεται στη δημόσια γραμμή. Το σημείο αυτό μπορεί να διαφέρει, για παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί ως το σημείο του μετρητή ή ως το σημείο σύνδεσης στην δημόσια γραμμή.

Τάση παροχής

Είναι η RMS τιμή της τάσης στο σημείο παροχής σε συγκεκριμένη ώρα, μετρημένη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Ονομαστική τάση γραμμής

Είναι η τάση που προσδιορίζει μια γραμμή και με την οποία σχετίζονται βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Συμφωνημένη τάση παροχής

Κανονικά η συμφωνημένη τάση παροχής είναι ίση με την ονομαστική τάση, όμως αν ο προμηθευτής της ενέργειας και ο πελάτης διαπραγματεύονται ένα σημείο παροχής του οποίου η τάση διαφέρει από την ονομαστική, τότε η τάση αυτή λέγεται συμφωνημένη τάση παροχής Uc.

Χαμηλή τάση

Ο όρος χαμηλή τάση περιλαμβάνει τις τάσεις παροχής των οποίων η ονομαστική τιμή δεν ξεπερνά τα 1000V (RMS τιμή).

Κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Η κατάσταση λειτουργίας ενός δικτύου διανομής που παρέχει ικανοποίηση της απαίτησης σε ενέργεια, εκτελεί εξάλειψη των διαταραχών με αυτόματα συστήματα προστασίας χωρίς την ύπαρξη ειδικών καταστάσεων οφειλόμενων σε εξωγενείς επιδράσεις.

Αρμονικές τάσης

Είναι μια ημιτονοειδής τάση με συχνότητα ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας της πρώτης αρμονικής της τάσης τροφοδοσίας. Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να εκτιμηθούν με δύο τρόπους:

- **Εεχωριστά:** Χρησιμοποιώντας τα πλάτη τους (U_h) σε σχέση με το πλάτος της πρώτης αρμονικής U_1 όπου h ο αύξων αριθμός της κάθε αρμονικής.
- **Συγκεντρωτικά:** Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD.

Το πρότυπο EN 50160 καθορίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της τάσης παροχής στο σημείο της παροχής του καταναλωτή στα δημόσια δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης και κάτω από ομαλές συνθήκες λειτουργίας.

Χαρακτηριστικά χαμηλής τάσης για τις Αρμονικές τάσεις

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, το 95% των ανά 10min μέσων τιμών της ενεργού τιμής της τάσης μιας αρμονικής σε ένα διάστημα μιας εβδομάδας δεν πρέπει να ξεπερνά τις τιμές του παρακάτω πίνακα. Γενικά ο ολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης THD, που καλύπτει όλες τις αρμονικές μέχρι την 40η δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή του **8%**.

Περιττές αρμονικές				Άρτιες αρμονικές	
≠3k		=3k			
Τάξη	U_h [%]	Τάξη	U_h [%]	Τάξη	U_h [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6...24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Τέλος παρουσιάζεται ένας πίνακας που συνοψίζει τα όρια της τάσης που οφείλει να παρέχει το δίκτυο στους καταναλωτές, σύμφωνα με το EN 50160.

Χαρακτηριστικά της παρεχόμενης τάσης	Όρια		Παράμετροι μετρήσεων		
	Χαμηλή τάση	Μέση τάση	Βασική ποσότητα	Μέσο χρονικό διάστημα	Διάρκεια παρατήρησης
συχνότητα (σύνδεσης στο δίκτυο)	50Hz ±1% (49.5-50.5 Hz) 50Hz +4%/-6% (47-52 Hz)		μέση τιμή	10 s	1 εβδομάδα (95% / 100%)
συχνότητα (απομονωμένα συστήματα)	50Hz ±2% (49-51 Hz) 50Hz ±15% (42.5-57.5 Hz)		μέση τιμή	10s	1 εβδομάδα (95% / 100%)
μεταβολές τάσης	UN ±10%	Uc ±10%	RMS	10 min	1 εβδομάδα
γρήγορες μεταβολές τάσης	<5% UN	<4% UC	RMS		1 ημέρα
flicker	$P_{1t} \leq 1$				1 εβδομάδα
βυθίσεις (10ms-1min, URMS< 90% UN)	Ενδεικτικά: 10-1000 το χρόνο, βάθος<60%		RMS		1 χρόνος
Μικρές διακοπές (<3min, URMS < 1% UN)	ενδεικτικά: 10-κάποιες εκατοντάδες το χρόνο, το 70% να διαρκεί <1s		RMS, διάρκεια		1 χρόνος
μεγάλες διακοπές (>3min, URMS< 1%UN)	ενδεικτικά: 10-50 το χρόνο		RMS, διάρκεια		1 χρόνος
προσωρινές υπερτάσεις	<1.5kV	<1.7 ή <2kV (ανάλογα τη σύνδεση ουδετέρου)	RMS		
μεταβατικές υπερτάσεις	<6kV, διάρκεια < μς έως ms		peak		
ασυμμετρία	Αναλογία αρνητικής/θετικής συνιστώσας < 2%		RMS ανά 10 min		1 εβδομάδα
αρμονική παραμόρφωση	THD(έως 40η αρμονική) <8%		RMS	10 min	1 εβδομάδα
ενδιάμεσες αρμονικές	Δεν υπάρχουν διευκρινίσεις προς το παρόν				

Συμπερασματικά, από τη μία πλευρά το πρότυπο EN 50160 ορίζει κάποιες απτά μετρούμενες παραμέτρους για την ποιότητα ισχύος ενώ από την άλλη δίνει στον καταναλωτή βασικά δικαιώματα. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160 ο πελάτης-καταναλωτής μπορεί να παραπονεθεί εάν η ηλεκτρική ενέργεια που του παρέχεται στο σημείο διανομής δεν συμφωνεί με τα δεδομένα του προτύπου. Σε περίπτωση που ο πελάτης-καταναλωτής δεν μείνει ικανοποιημένος από την παρεχόμενη προς αυτόν ισχύ μπορεί να αλλάξει εταιρία διανομής (σε όποιες χώρες είναι αυτό δυνατό).

3.3 Πρότυπα ποιότητας ρεύματος

Τα γενικά πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που ισχύουν για οικιακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται και για τους αντιστροφείς Φωτοβολταϊκών. Τα βασικότερα πρότυπα εκπομπών είναι τα εξής:

- IEC 61000-3-2: Όρια για τις εκπομπές αρμονικών ρευμάτων (εξοπλισμός που απορροφά ρεύμα $\leq 16A$ ανά φάση).
- IEC 61000-3-12: Όρια για αρμονικά ρεύματα που παράγονται από εξοπλισμό που συνδέεται στο δίκτυο χαμηλής τάσης και απορροφά ρεύμα $>16A$ και $\leq 75A$ ανά φάση.
- CISPR11/EN55011: Βιομηχανικός, επιστημονικός και ιατρικός εξοπλισμός-Χαρακτηριστικά διαταραχών από ραδιοσυχνότητες-Όρια και μεθοδολογίες μετρήσεων.
- EN 55022: Όρια και μεθοδολογίες για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών των διαταραχών από ραδιοσυχνότητες εξοπλισμού τεχνολογίας πληροφοριών (information technology).
- EN 61000-6-3: Γενικό πρότυπο: Πρότυπο εκπομπών για οικιακά, εμπορικά και ελαφρά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Σημειώνεται ότι η εξαγωγή ορίων αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος προϋποθέτει γενικά τη γνώση της αρμονικής σύνθετης αντίστασης του δικτύου, Z_n . Η διαδικασία εκτίμησης της Z_n είναι γενικά επίπονη και δικαιολογείται μόνο για μεγάλες σχετικά εγκαταστάσεις. Στην περίπτωση των δικτύων ΧΤ, λόγω του μεγάλου πλήθους και μικρού κατά κανόνα μεγέθους των συσκευών που συνδέονται σε αυτά, δεν είναι εφικτή η ειδική κατά περίπτωση εξέταση της προκαλούμενης παραμόρφωσης της τάσης. Για αυτό τον λόγο θεσπίζονται όρια αρμονικών εκπομπών με τα οποία οι ηλεκτρικές διατάξεις πρέπει να συμμορφώνονται. Ειδική ανά περίπτωση εξέταση των επιπτώσεων στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης προβλέπεται από τους κανονισμούς για μεγάλες σχετικά συσκευές και διατάξεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πρότυπα ορίων των εκπομπών αρμονικών ρεύματος για ηλεκτρικές συσκευές που συνδέονται στα δίκτυα ΧΤ.

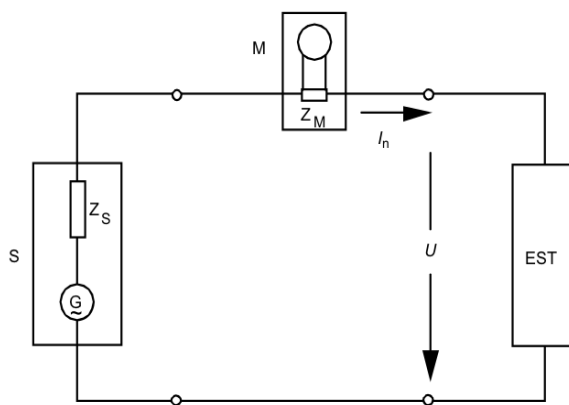
3.3.1 Πρότυπο IEC 61000-03-02^[15]

Στο πρότυπο IEC 61000-03-02 τίθενται όρια εκπομπών αρμονικών ρεύματος για συσκευές που συνδέονται στη χαμηλή τάση και έχουν ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας έως 16A ανά φάση. Επιπλέον, γίνεται περιγραφή του περιβάλλοντος του πειράματος για συγκεκριμένες συσκευές όπως κλιματιστικά, πλυντήρια, λάμπες, σκούπες και επαγωγικές εστίες. Όρια για αρμονικές εκπομπές του ρεύματος (εφαρμόζεται σε εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα έως 16 A ανά φάση). Το πρότυπο κατατάσσει τις συσκευές σε 4 Κλάσεις: Η Κλάση Α είναι γενικής εφαρμογής και αφορά

όλες τις συσκευές, εκτός εκείνων που κατατάσσονται στις άλλες κλάσεις. Η Κλάση Β αφορά τα φορητά εργαλεία, η Κλάση Γ τις συσκευές φωτισμού και η Κλάση Δ τις συσκευές των οποίων η ένταση μεταβάλλεται βηματικά, με ορισμένη μορφή που καθορίζεται στο Πρότυπο. Τα όρια της Κλάσεως Α είναι τα αυστηρότερα και αφορούν κυρίως τις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, μέσω των οποίων γίνεται η σύνδεση των συσκευών με το δίκτυο. Οι απαιτήσεις αυτές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ο οποίος δίνει τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές των αρμονικών του ρεύματος εξόδου .

Περιττές αρμονικές		Άρτιες αρμονικές	
Τάξη n	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση (A)	Τάξη n	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \cdot \frac{8}{n}$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq n \leq 3$	$0.15 \cdot \frac{15}{n}$		

Η πειραματική διάταξη για την μέτρηση των αρμονικών εκπομπών που προτείνεται από το πρότυπο παριστάνεται επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3-1: Η πειραματική διάταξη που προτείνεται στο πρότυπο IEC 61000-3-2 για δοκιμές εκπομπών.

Όπου:

S: Πηγή τροφοδοσίας (power supply source)

M: Μετρητικό σύστημα (measurement equipment)

EUT: Εξοπλισμός υπό δοκιμή (equipment under test)

U: Μετρούμενη τάση (test voltage)

Z_M: Σύνθετη αντίσταση εισόδου του υπό δοκιμή εξοπλισμού (input impedance of measurement equipment)

Z_s: Εσωτερική σύνθετη αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας (internal impedance of supply source)

I_n: Αρμονική ρεύματος τάξης n (harmonic component of order n of the line current)

G: Τάση της πηγής τροφοδοσίας ανοικτού βρόχου (open-loop voltage of the supply source)

3.3.2 Πρότυπο IEC 61000-03-12^[35]

Αντίστοιχα με το IEC61000-03-12 αυτό το πρότυπο αναφέρεται σε εξοπλισμό που συνδέεται στη χαμηλή τάση και το ρεύμα λειτουργίας του είναι στο διάστημα >16A και ≤75A ανά φάση. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει το όρια αρμονικών εκπομπών που τίθενται.

Τάξη	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	>13	THD
Τιμή (A)	4	21.6	2	10.7	1.3	7.2	1	3.8	0.8	3.1	0.7	2		23%

3.3.3 Πρότυπο IEC 61727^[17]

Το πρότυπο αυτό αναφέρεται χαρακτηριστικά στις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς για την σύνδεσή τους στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα για τις αρμονικές συνιστώσες δίνονται τα παρακάτω όρια.

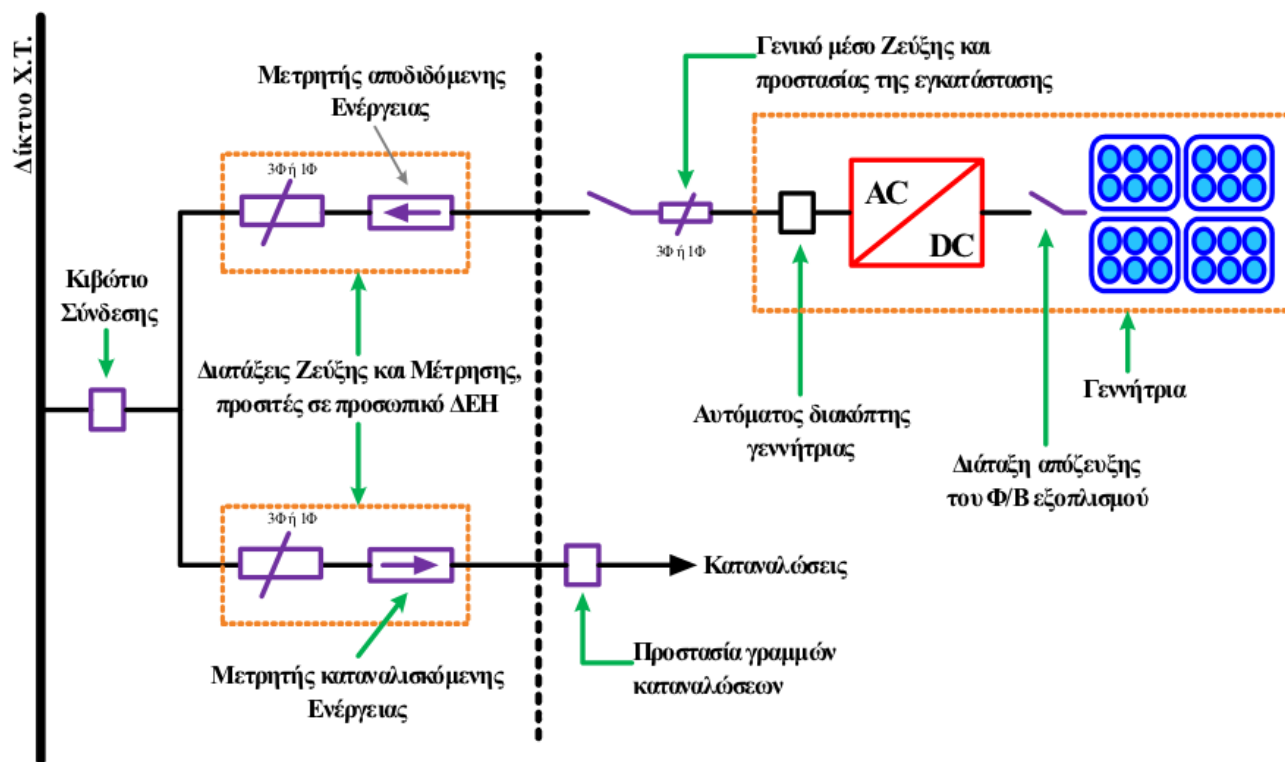
Τάξη αρμονικών n (περιττές αρμονικές) ^α	Όρια παραμόρφωσης ^β
THD	5%
3 ^η έως 9 ^η	<4.0%
11 ^η έως 15 ^η	<2.0%
17 ^η έως 21 ^η	<1.5%
23 ^η έως 33 ^η	<0.6%
Τάξεις πάνω από την 33 ^η	<0.3%

α: Οι άρτιες αρμονικές περιορίζονται στο 25% των ανωτέρω ορίων για τις περιττές.

β: Τα όρια δίνονται ως ποσοστό της ονομαστικής θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος.

3.3.4 Όρια αρμονικών της ΔΕΗ για την σύνδεση φωτοβολταϊκών αντιστροφέων έως 10kW στη χαμηλή τάση^[20].

Πέρα από τις προδιαγραφές του IEC 61000.03.02, στην Ελλάδα, ο Διαχειριστής Δικτύου επιβάλλει ως απαραίτητη προϋπόθεση για τη σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στα δίκτυα διανομής, **την επίτευξη Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος εξόδου της εγκατάστασης μικρότερο ή οριακά ίσο με 5%**, Συντελεστή Ισχύος (Power Factor, PF) μεγαλύτερο από 0.95 για επαγωγική και χωρητική συμπεριφορά υπό ισχύ άνω του 50% της ονομαστικής και μέγιστη τιμή εγγεόμενου συνεχούς ρεύματος (εφόσον οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς δεν διαθέτουν χαμηλόσυχο μετασχηματιστή) το πολύ ίση με το 0.5% του ονομαστικού ρεύματος της εγκατάστασης. Σκοπός των δύο τελευταίων προδιαγραφών είναι η οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος (μέσω του περιορισμού των απωλειών στους αγωγούς του δικτύου) και η αποφυγή εμφάνισης φαινομένων κορεσμού στους μετασχηματιστές του δικτύου.



Εικόνα 3-2: Σύνδεση οικιακών Φ/Β συστημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο Χ.Τ.

Σε χώρες με μεγαλύτερη εμπειρία στον τομέα των Φ/Β συστημάτων, τα όρια των προαναφερθέντων τεχνικών προδιαγραφών είναι περισσότερο αυστηρά σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω της αυξημένης διείσδυσης των εν λόγω συστημάτων στην ενεργειακή τους τροφοδότηση. Σημειώνεται ότι τα προβλεπόμενα όρια από το πρότυπο IEC 61727 βασίστηκαν σε σημαντικό

βαθμό σε κανονισμούς που αναπτύχθηκαν από την εκτεταμένη εφαρμογή Φ/Β συστημάτων στη Γερμανία.

3.4 Μετρήσεις ποιότητας ισχύος

Οι μετρήσεις στον κλάδο της ποιότητας ισχύος, είναι απαραίτητες για την συλλογή στοιχείων που υποδεικνύουν την αποδεκτή ή μη λειτουργία ενός δικτύου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν και να αποφευχθούν εγκαίρως σοβαρά προβλήματα που θα μπορούσαν να είναι ιδιαίτερος ζημιογόνα ή και επικίνδυνα για τη λειτουργία του δικτύου ή ακόμα και για την ασφάλεια του καταναλωτή. Οι μετρήσεις, ανάλογα με τον στόχο τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μετρήσεις για μικρό χρονικό διάστημα και τις μετρήσεις μεγάλης διάρκειας. Στην πρώτη περίπτωση, οι μετρήσεις για μικρό χρονικό διάστημα γίνονται συνήθως στα πλαίσια μελετών για την επίλυση προβλημάτων ποιότητας ισχύος ή σε περίπτωση αλλαγών για την εκτίμηση του αντίκτυπου στην ποιότητα ισχύος του δικτύου (πχ η εγκατάσταση πυκνωτών σε ένα υποσταθμό). Στην δεύτερη περίπτωση, οι μετρήσεις μεγάλης διάρκειας γίνονται με μόνιμα εγκαταστημένες μετρητικές συσκευές και αφορούν κυρίως τις εταιρίες ηλεκτρισμού καθώς επίσης και τους μεγάλους καταναλωτές ή καταναλωτές με ειδικές απαιτήσεις (νοσοκομεία, αεροδρόμια κ.α).

3.4.1 Πρότυπα μέτρησης αρμονικών^[16]

Τα σημαντικότερα πρότυπα που αναφέρονται στις μεθόδους μέτρησης των αρμονικών είναι:

- **EN 61000-4-30:2003, IEC 61000-4-30:2003**, Ορίζει τις μεθόδους μέτρησης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων για τις παραμέτρους της ποιότητας ισχύος στα εναλλασσόμενα συστήματα 50/60 Hz. Οι παράμετροι που καθορίζει είναι οι μεταβολές συχνότητας, flicker, βυθίσεις και διακυμάνσεις τάσης, διακοπές, ασυμμετρίες, μεταβατικά φαινόμενα, αρμονικές και ενδιάμεσες αρμονικές τάσης και ρεύματος. Ανάλογα με τον σκοπό των μετρήσεων όλα ή μέρος των παραπάνω φαινομένων μπορεί να μετρηθούν. Το πρότυπο αυτό ορίζει τις μεθόδους μέτρησης αλλά δε θέτει όρια. Το πρότυπο αυτό έχει ορίσει δύο διαφορετικές κλάσεις ακρίβειας για τα όργανα με τα οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, την κλάση A και την κλάση B. Τα όργανα κλάσης A είναι μεγαλύτερης ακρίβειας και χρησιμοποιούνται για συμβατικές μετρήσεις που πιστοποιούν τη συμμόρφωση ή όχι με τα όρια των προτύπων. Τα όργανα κλάσης B χρησιμοποιούνται περισσότερο για στατιστικές έρευνες όπου δεν είναι απαραίτητη πολύ μεγάλη ακρίβεια. Στην κλάση B δεν ορίζονται μέθοδοι υπολογισμού όπως στην κλάση A, αλλά ο κατασκευαστής του κάθε οργάνου πρέπει να αναφέρει λεπτομερώς τη μέθοδο μέτρησης που χρησιμοποιείται.

- **EN 61000-4-7 : 2002 (IEC 61000-4-7 :2002)**, Γενικός οδηγός για μετρήσεις και χρήση οργάνων που αφορούν αρμονικές και ενδιάμεσες

αρμονικές. Αφορά χρήση οργάνων που έχουν σκοπό να μετρήσουν τις συνιστώσες του φάσματος με συχνότητα έως 9 kHz που υπερτίθενται στη θεμελιώδη συχνότητα του συστήματος. Το πρότυπο διαχωρίζει ανάμεσα σε αρμονικές, ενδιάμεσες αρμονικές και άλλες συνιστώσες του φάσματος και χρησιμοποιείται για μετρήσεις είτε στο δίκτυο είτε σε μεμονωμένες συσκευές του εξοπλισμού. Για τη μέτρηση αρμονικών χρησιμοποιείται ένα παράθυρο διαστήματος 10 κύκλων. Στο διάστημα αυτό, εφαρμόζεται ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT - Discrete Fourier Transform) και προκύπτει ένα φάσμα συχνοτήτων ανά 5Hz, δηλαδή ανάμεσα στις συχνότητες των αρμονικών (ακέραια πολλαπλάσια των 50Hz) εμφανίζονται εννιά επιπλέον τιμές.

• **IEEE 1159-1995**, Προτεινόμενη πρακτική για Καταγραφή Ποιότητας Ισχύος.

3.4.2 Διαδικασία μέτρησης αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα με βάση το DERLab^[18]

Το DERLab είναι η ένωση κορυφαίων εργαστηρίων και ερευνητικών ιδρυμάτων στον τομέα των διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων εξοπλισμού και συστημάτων. Αναπτύσσει κοινές απαιτήσεις και τα κριτήρια ποιότητας για τη σύνδεση και τη λειτουργία των κατανεμημένων πηγών ενέργειας^[37]. Η διαδικασία μέτρησης των αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα που ακολουθείται στην εργασία αυτή υποδεικνύεται από το DERLab.

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να αξιολογηθεί η έγχυση αρμονικών του φωτοβολταϊκού μετατροπέα στο δίκτυο. Τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

- προσομοιωτής φωτοβολταϊκής γεννήτριας ή τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος σε περίπτωση κατά την οποία δεν χρησιμοποιούνται οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών (DC πλευρά)
- μία μετρητική διάταξη για τη μέτρηση των αρμονικών στην AC πλευρά (power analyzer)
- προσομοιωτής δικτύου (grid simulator)

Πιο αναλυτικά αυτά απαιτούν τα εξής:

α) η τάση δοκιμής θα πρέπει να είναι η ονομαστική τάση του εξοπλισμού. Στην περίπτωση που η τάση ποικίλει, η τάση δοκιμής θα είναι 230 V ή 400 V για μονοφασικά ή τριφασικές παροχές αντιστοίχως. Η τάση δοκιμής πρέπει να διατηρείται εντός $\pm 2,0\%$ και η συχνότητα εντός $\pm 0,5\%$ της ονομαστικής.

β) Στην περίπτωση τριφασικής παροχής, η γωνία μεταξύ της θεμελιώδους τάση σε κάθε ζεύγος των φάσεων μιας τριφασικής πηγή πρέπει να είναι $120^\circ \pm 1,5^\circ$.

γ) Οι αρμονικές της τάσης δοκιμής δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις ακόλουθες τιμές με το υπό δοκιμή εξοπλισμό συνδεδεμένο όπως και στην

κανονική λειτουργία:

0,9% για την αρμονική 3^{ης} τάξης,

0,4% για την αρμονική 5^{ης} τάξης,

0,3% για την αρμονική 7^{ης} τάξης,

0,2% για την αρμονική 9^{ης} τάξης,

0,2% για τις άρτιες αρμονικές τάξεως 2^η έως 10^η,

0,2% για τις αρμονικές τάξεων 11^η έως 40^η.

δ) Η μέγιστη τιμή (peak) της τάσης δοκιμής πρέπει να κινείται στο διάστημα μεταξύ 1.40 και 1.42 φορές την rms τιμή της και πρέπει να επιτευχθεί εντός 87 ° και 93 ° μετά τη μηδενισμό. (Η απαίτηση αυτή δεν ισχύει όταν ελέγχεται εξοπλισμός κατηγορίας A ή B).

Προετοιμασία:

Ο μετατροπέας συνδέεται στην DC πλευρά των Φ/Β (ή σε ένα προσομοιωτή φωτοβολταϊκών ή σε ένα τροφοδοτικό DC) και από την πλευρά AC παράλληλα με τον προσομοιωτή δικτύου. Είναι δυνατόν ακόμη, να συνδεθεί σε ένα μονοφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης, εφόσον αυτό πληρεί τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν (αναφερόμενοι στο σημείο σύνδεσης του αντιστροφέα). Πριν από την έναρξη της δοκιμής (με τον μετατροπέα αποσυνδεδεμένο), ελέγχεται η συμμόρφωση του πραγματικού ηλεκτρικού συστήματος με τις απαιτήσεις (θα πρέπει να ελεγχθεί και να τεκμηριώνεται στην έκθεση δοκιμής). Επίσης, είναι αναγκαίο η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της δοκιμής να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο σταθερή, έτσι, όταν αυτό δεν είναι δυνατό με τα Φ/Β, ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί ένας προσομοιωτή Φ/Β ή ένα τροφοδοτικό DC.

Διαδικασία:

Εφόσον όλες τα προηγούμενα έχουν ελεγχθεί, ο μετατροπέας τίθεται σε λειτουργία και μετρώνται οι αρμονικές ρεύματος στην έξοδό του, με τη βοήθεια μιας κατάλληλης μετρητικής διάταξης (power analyzer).

Είναι απαραίτητη η καταγραφή του THD του ρεύματος και των αρμονικών ρεύματος από την δεύτερη έως και την τριακοστή ένατη τάξη και ο έλεγχος της συμμόρφωσης με τα πρότυπο IEC 61000.03.02 ή IEC 61000.03.12.

Επιπλέον, το THD της τάσης στην οποία συνδέεται ο αντιστροφέας πρέπει να παραμείνει κάτω από το 3% κατά τη διάρκεια όλων των δοκιμών.

Εάν είναι δυνατόν, μετρώνται και καταγράφονται η κυματομορφή του ρεύματος και της τάσης στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος. Καταγράφονται, το THD ρεύματος και οι αρμονικές ρεύματος από τη δεύτερη έως την τριακοστή ένατη για τιμές ισχύος εξόδου διαδοχικά ίσες με 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100%, (120%) της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα (αν το τροφοδοτικό DC το επιτρέπει). Το 120% ισχύος εξόδου δοκιμάζεται μονάχα εάν ο μετατροπέας επιτρέπει αυτή την κατάσταση λειτουργίας.

3.5 Αρμονικές στο εύρος συχνοτήτων 2kHz-150kHz

Μια έλλειψη παρατηρείται στα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών στο εύρος συχνοτήτων 2kHz-150kHz. Για παράδειγμα στο IEC61000.03.02 γίνεται λόγος μόνο μέχρι την 39^η αρμονική δηλαδή $39 \cdot 50 = 1950\text{Hz}$. Αυτό το ζήτημα αποκτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον εφόσον η διακοπτική συχνότητα των αντιστροφών βρίσκεται σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Αυτό το κενό εγείρει θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, εξαιτίας της αντίστοιχης απουσίας προτύπων ατρωσίας στο ίδιο εύρος συχνοτήτων.

Το πρότυπο CISPR11/EN55011 εξετάζει ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές στο εύρος συχνοτήτων 9kHz-150kHz, αλλά αναφέρεται σε βιομηχανικές και ιατρικές συσκευές. Για υψηλότερες συχνότητες χρησιμοποιείται το EN 55022, που εξετάζει ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές στο εύρος 150kHz-300MHz. Τέλος, το EN 61000-6-3 μελετά τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές στο εύρος συχνοτήτων 0Hz-400GHz, αναφέρεται κυρίως σε βιομηχανικές και κτιριακές εγκαταστάσεις, χωρίς όμως να γίνεται αναφορά στις συχνότητες 2kHz-150kHz.

4. Θεωρητική ανάλυση των αρμονικών

4.1 Ανάλυση των αρμονικών

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των αρμονικών είναι η ανάλυση fourier. Θα εξεταστούν επομένως σήματα των οποίων η παραμόρφωση είναι περιοδική και θα τα θεωρήσουμε ως επαλληλικά σημάτων με διαφορετικά πλάτη και φασικές γωνίες αλλά πολλαπλάσιες συχνότητες. Στην παρούσα εργασία, η φασική γωνία κάθε συνιστώσας θα δηλώνεται σχετικά ως προς την αρχική φάση της θεμελιώδους. Αυτό κρίνεται απαραίτητο ιδιαίτερα για την μελέτη ηλεκτρικών δικτύων όπου μπορούν να υπάρχουν πολλές πηγές αρμονικών και οι γωνίες των θεμελιωδών συνιστωσών των πηγών αυτών, να εμφανίζουν διαφορά φάσης. Επίσης γίνεται ανάλυση τόσο στις αρμονικές του ρεύματος όσο και της τάσης σε κάθε κόμβο του υπό μελέτη ηλεκτρικού δικτύου. Συνέπεια του προηγούμενου είναι για κάθε κόμβο να αναφέρεται η γωνία της θεμελιώδους και οι σχετικές με την θεμελιώδη γωνίες τόσο για την τάση στον κόμβο όσο για το ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για την κατανομή των αρμονικών και στην ουσία αποσυνδέεται το πρόβλημα από το σε ποιό σημείο του δικτύου βρίσκεται η πηγή των αρμονικών αλλά και από τη γωνία ισχύος του υπό μελέτη κόμβου. Ιδιαίτερα για τις αρμονικές ρεύματος οι οποίες εγγέονται σε ένα κόμβο του δικτύου έχει σημασία να μπορούμε να παρατηρήσουμε οποιαδήποτε σχετική μεταβολή λόγω αλληλεπίδρασης με γειτονικές πηγές, με φορτία αλλά και με άλλα ζητήματα του δικτύου (όπως η παραμόρφωση της τάσης στο δίκτυο). Πρέπει να αναφερθεί ότι οι γωνίες των αρμονικών δεν αποτελούν από μόνες τους πρόβλημα για τον κλάδο της ποιότητας ισχύος. Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν πολλές πηγές αρμονικών σε ένα δίκτυο και υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους, οι γωνίες ενδιαφέρουν από την άποψη ότι θα καθορίσουν την χειρότερη περίπτωση αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο.

Σύμφωνα με την μαθηματική ανάλυση fourier το μη ημιτονοειδές ρεύμα μπορεί να αναλυθεί ως σειρά fourier ως εξής:

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \cdot e^{jn\omega_0 t}$$

Βεβαίως το παραμορφωμένο ρεύμα πρέπει αναγκαστικά να είναι περιοδικό, πρέπει δηλαδή να ισχύει η σχέση: $i(t) = i(t+T)$, όπου T η περίοδος.

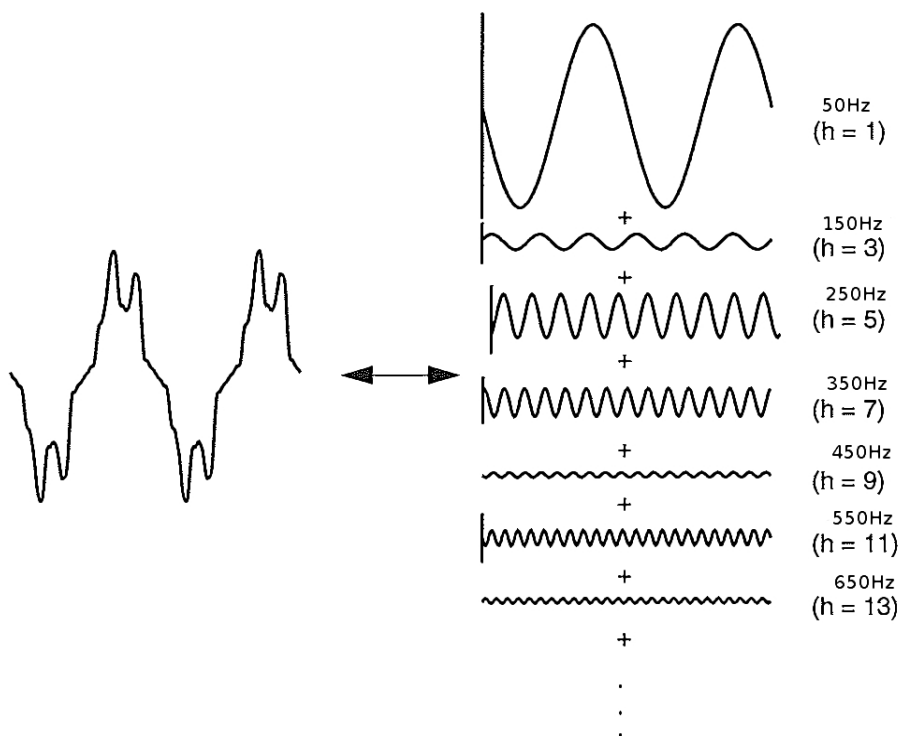
Από την ανωτέρω σειρά εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι οι συντελεστές a_n για $n > 0$ προκύπτουν συζυγείς αυτών για $n < 0$. Δηλαδή ισχύει $a_{-n} = a_n^*$, επομένως μπορούμε να σχηματίσουμε τη σειρά fourier μόνο για θετικές συχνότητες ($n > 0$) ομαδοποιώντας τους όρους για αντίθετες συχνότητες^[9]:

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot e^{jn\omega_0 t}$$

Κάθε όρος τη σειράς καλείται αρμονική και όπως φαίνεται από τον

ανωτέρω τύπο έχει συχνότητα ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους ω_0 n φορές (n -τάξης).

Ο μετασχηματισμός fourier ενός σήματος το μεταφέρει από το πεδίο του χρόνου στο οποίο εκφράζεται αρχικά στο πεδίο των συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας ονομάζεται φάσμα και στην ουσία αντιστοιχείται κάθε συχνότητα με το πλάτος καθώς και με τη γωνία του υπό επαλληλία σήματος που υπήρχε στο αρχικό. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει είτε για συνεχή είτε για διακριτά σήματα και το φάσμα μπορεί να είναι συνεχές ή διακριτό. Για την μελέτη και την καταγραφή των πραγματικών σημάτων όπως των κυματομορφών του ρεύματος και της τάσης σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούνται διακριτά - ψηφιακά σήματα. Σημειωτέον, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας του μετρούμενου σήματος, τόσο καλύτερη προσέγγισή του θα επιτυγχάνεται, πράγμα που σημαίνει ότι ο υπολογισμός των αρμονικών θα είναι ακριβέστερος. Για τον υπολογισμό των αρμονικών από μια παραμορφωμένη κυματομορφή, στον Η/Υ, έχει προταθεί και χρησιμοποιείται κατά κόρον ο πολύ αποδοτικός αλγόριθμος fft (fast fourier transform)^[38].



Εικόνα 4-1: Αποσύνθεση μιας παραμορφωμένης κυματομορφής στη θεμελιώδη και τις αρμονικές της^[12]

4.2 Γραφική αναπαράσταση των αρμονικών

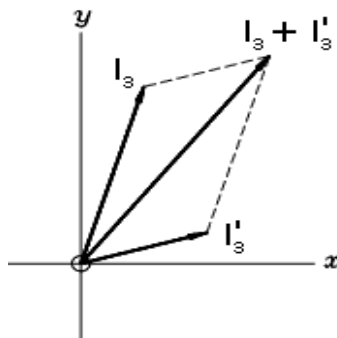
Όπως έχει αναλυθεί, για την αναπαράσταση των αρμονικών αρκεί ο προσδιορισμός:

- της τάξης της n
- του πλάτους της M_n
- της σχετικής γωνίας της με την θεμελιώδη θ_{Mn}

Επομένως για την γραφική αναπαράστασή τους απαιτούνται δύο φάσματα, το φάσμα των πλατών και το φάσμα των φασικών γωνιών. Και στις δύο περιπτώσεις ο διακριτός άξονας των χ αντιστοιχεί στην τάξη και εκτείνεται μέχρι τη συχνότητα που έχει γίνει ο υπολογισμός και ο συνεχής άξονας των y στα πλάτη ή τις γωνίες αντίστοιχα. Συχνά προκύπτει η ανάγκη, στην περίπτωση του φάσματος των πλατών, για χρήση λογαριθμικού άξονα y για λόγους καλύτερης γραφικής απεικόνισης.

4.2.1 Αναπαράσταση των αρμονικών ως διανύσματα

Η θεώρηση των αρμονικών ως διανύσματα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόησή τους καθώς και στη διευκόλυνση των πράξεων μεταξύ τους. Αν μία αρμονική δηλαδή αντιστοιχιστεί με ένα διάνυσμα που έχει πλάτος το πλάτος της αρμονικής και γωνία τη φασική της γωνία μπορεί με απλό τρόπο να αθροιστεί με κάποια άλλη ίδιας τάξης με το κλασσικό διανυσματικό άθροισμα. Προφανώς κάτι τέτοιο θα είχε νόημα μόνο για τις αρμονικές ίδιας τάξης. Με αυτή τη μέθοδο μπορούμε εύκολα να αθροίσουμε διανυσματικά τις αρμονικές από διαφορετικές πηγές αρμονικών που συνδέονται παράλληλα στον ίδιο κόμβο ενός δικτύου και να τις αντικαταστήσουμε με μία ισοδύναμη πηγή αρμονικών που θα επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα απλοποιώντας έτσι το πρόβλημα.



Εικόνα 4-2: Διανυσματικό άθροισμα αρμονικών

4.3 Κυκλώματα αρμονικών σε δίκτυα Χ.Τ.

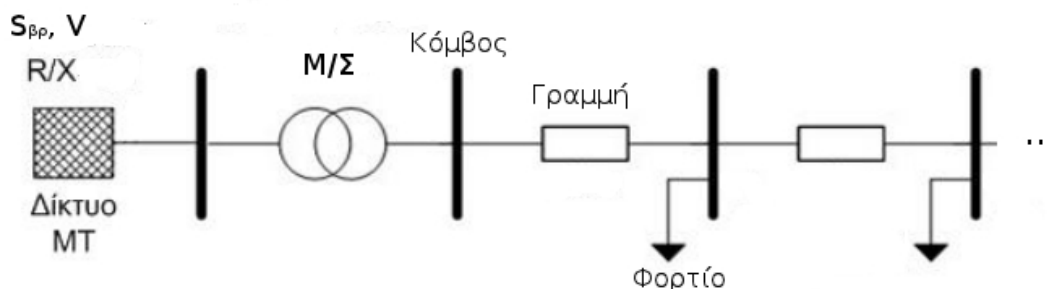
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια μαθηματική ανάλυση με σκοπό να μελετηθούν οι αρμονικές σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης. Σκοπός είναι η μαθηματική κατανόηση, με κυκλωματικούς όρους, του τρόπου με τον οποίο ένα δίκτυο χαμηλής τάσης είναι δυνατόν να επηρεαστεί από ένα μη

γραμμικό φορτίο και να εμφανίσει παραμορφωμένη τάση (όσον αφορά στο αρμονικό περιεχόμενο). Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο βέβαια, θα επηρεαστεί η τάση στο υπό μελέτη δίκτυο αν στη θέση του μη γραμμικού φορτίου θεωρήσουμε ένα φωτοβολταϊκό αντιστροφέα ο οποίος εγχέει ισχύ στο δίκτυο. Ακόμα καλύτερα και για καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας θα ήταν σκόπιμο παράλληλα με τον υποτιθέμενο Φ/Β αντιστροφέα να θεωρήσουμε και ένα φορτίο. Έτσι με αυτό τον απλό τρόπο κάθε κόμβος του δικτύου διαθέτει μια πηγή αρμονικών και ένα γραμμικό φορτίο.

4.3.1 Κυκλωματική αναπαράσταση απλού δικτύου χαμηλής τάσης

Ένα συμμετρικό τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο μονοφασικό. Στο σημείο όπου γίνεται η μετατροπή της μέσης τάσης στη χαμηλή (στο μετασχηματιστή) και στην ουσία ξεκινάει το δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο thevenin για την αναπαράσταση του δικτύου. Το ισοδύναμο αυτό θα αποτελείται από μία πηγή τάσης, μια σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης στο συγκεκριμένο σημείο του δικτύου, στη συνέχεια την σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή και τέλος τα στοιχεία του δικτύου χαμηλής τάσης: κόμβοι, γραμμές, φορτία.

Δύο κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με μία γραμμή. Επειδή μελετώνται δίκτυα χαμηλής τάσης και τα μήκη των γραμμών δεν είναι μεγάλης κλίμακας, οι γραμμές μπορούν να αναπαρασταθούν απλά ως σύνθετες αντιστάσεις. Επίσης, τα γραμμικά φορτία μπορούν να αναπαρασταθούν και αυτά ως σύνθετες αντιστάσεις. Οι σύνθετες αντιστάσεις του Μ/Σ και η σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης είναι σε σειρά και για αυτό το λόγο μπορούν να προστεθούν.



Εικόνα 4-3: Αναπαράσταση δικτύου χαμηλής τάσης

4.3.2 Εφαρμογή με ένα κόμβο έγχυσης αρμονικών στο δίκτυο

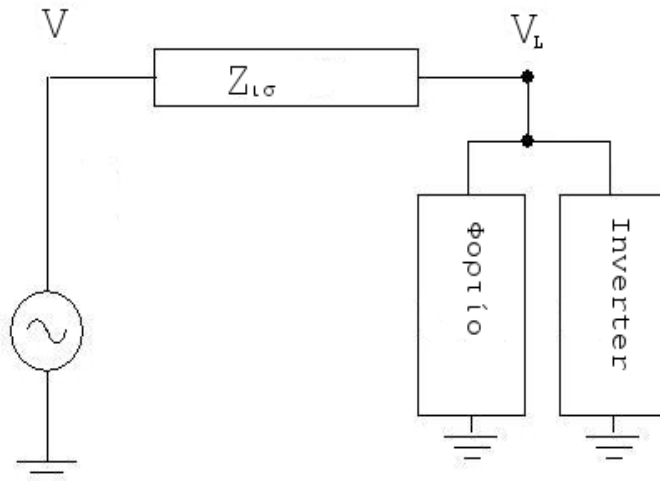
Ανάλυση αρμονικού κυκλώματος:

Για την ανάλυση ενός απλού αρμονικού κυκλώματος θεωρούμε ένα απλό δίκτυο χαμηλής τάσης με ένα κόμβο. Πιο συγκεκριμένα θα θεωρηθεί ένα γραμμικό φορτίο σε σύνδεση με μία πηγή τάσης μέσω μιας σύνθετης αντίστασης η οποία αναπαριστά τη συνολική σύνθετη αντίσταση: σύνθετη αντίσταση M/Σ , σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης και σύνθετη αντίσταση της γραμμής (αφού μπορεί να απέχει ο κόμβος από τον M/Σ).

Η πηγή τάσης θεωρείται ιδανική, δηλαδή δεν περιέχει αρμονικό περιεχόμενο και είναι συγκεκριμένα της μορφής:

$$V(t) = \sqrt{2} V_{RMS} \cdot \sin(\omega t)$$

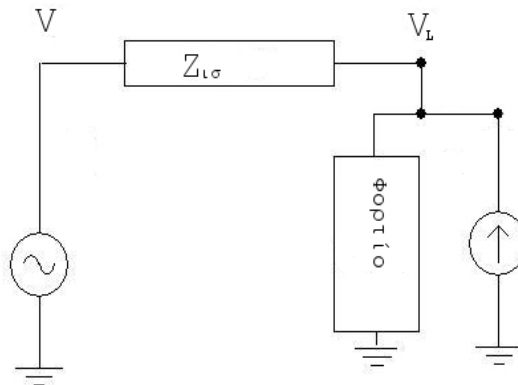
Στο φορτίο συνδέουμε παράλληλα μια μη γραμμική διάταξη (π.χ. ένας Φ/Β αντιστροφέας) η οποία εγχύει ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Όπως αναμένεται, το ρεύμα του αντιστροφέα περιέχει αρμονικό περιεχόμενο. Για την απλοποίηση της συγκεκριμένης ανάλυσης θα θεωρηθεί ότι η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος του αντιστροφέα είναι συμφασική με την τάση του φορτίου. Το φορτίο είναι γραμμικό και για αυτό το λόγο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια σύνθετη αντίσταση Z_{load} .



Εικόνα 4-4: Απλή αναπαράσταση ενός δικτύου χαμηλής τάσης με ένα κόμβο

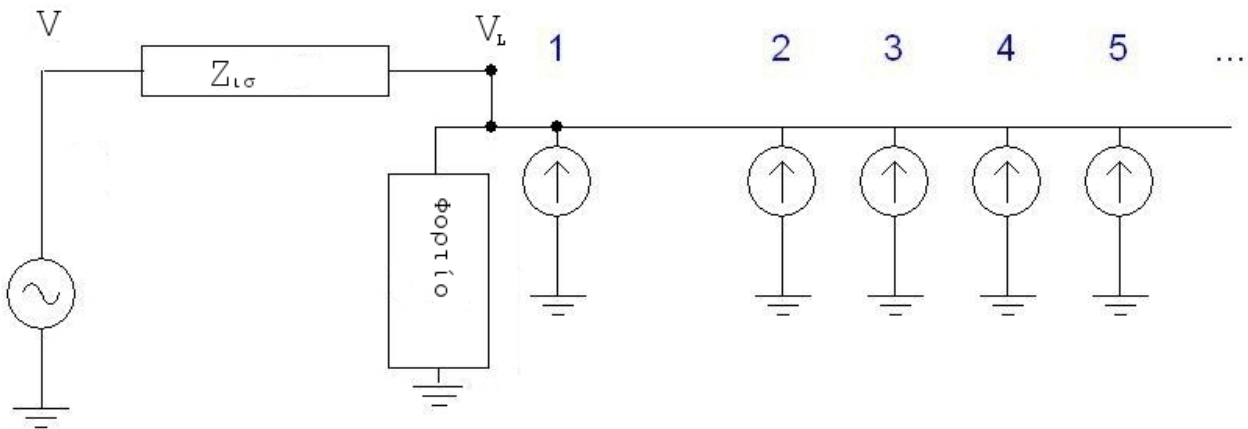
Η συσκευή μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια γεννήτρια ρεύματος και εφόσον δεν είναι ιδανική μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα της θεμελιώδους και των αρμονικών της δηλαδή:

$$\tilde{I}_{inv} = \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{I}_n$$



Εικόνα 4-5: Ο αντιστροφέας αντικαθίσταται από μία πηγή ρεύματος

Στη συνέχεια μπορούμε να αντικαταστήσουμε τη μη ιδανική πηγή ρεύματος με τις ακόλουθες ιδανικές χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα πλάτη, συχνότητες και φασικές γωνίες οι οποίες αναφέρονται στην θεμελιώδη. Σημειώνεται ότι οι σύνθετες αντιστάσεις του κυκλώματος εξαρτώνται από τη συχνότητα. Έτσι μπορούν εκφράζονται συναρτήσει της τάξης της αρμονικής που μελετάται.



Εικόνα 4-6: Αντικατάσταση της μη ιδανικής πηγής ρεύματος από επαλληλία ιδανικών

Για την ανάλυση του παραπάνω αρμονικού κυκλώματος χρησιμοποιείται η αρχή της επαλληλίας με σκοπό να υπολογιστεί η τάση που θα έχει το φορτίο μετά την ένταξη της συσκευής. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας μηδενίζονται διαδοχικά όλες οι διεγέρσεις σε ένα κύκλωμα κρατώντας μία τη φορά σε λειτουργία. Υπολογίζεται η τάση στο σημείο που ενδιαφέρει για κάθε διεγέρση και η συνολική τάση στο σημείο θα προκύψει το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών που υπολογίστηκαν.

Σημείωση: μηδενισμός για μία πηγή ρεύματος σημαίνει ανοιχτοκύκλωσή της ενώ για μία πηγή τάσης βραχυκύκλωσή της.

Λύνοντας το κύκλωμα για τη θεμελιώδη συχνότητα των 50Hz, προκύπτει:

$$V_{load}^1 = \frac{Z_{load}}{Z_{ισ} + Z_{load}} V^1 + \frac{Z_{ισ} Z_{load}}{Z_{ισ} + Z_{load}} I_1$$

Αντίστοιχα στις πολλαπλάσιες συχνότητες 100, 150, ... για $n=2, 3, \dots$ η τάση στο φορτίο γίνεται (οι σύνθετες αντιστάσεις εξαρτώνται και αυτές από την συχνότητα):

$$V_{load}^n = \frac{Z_{load}(n)}{Z_{ισ}(n) + Z_{load}(n)} V^n + \frac{Z_{ισ}(n) Z_{load}(n)}{Z_{ισ}(n) + Z_{load}(n)} I_n$$

Όμως αφού η πηγή τάσης θεωρήθηκε ιδανική: $V^n = 0$ για $n > 1$ και τελικά:

$$V_{load}^n = \frac{Z_{ισ}(n) Z_{load}(n)}{Z_{ισ}(n) + Z_{load}(n)} I_n \text{ για } n > 1$$

γεγονός που αποδεικνύει ότι η τάση στο φορτίο θα εμφανίσει αρμονικές.

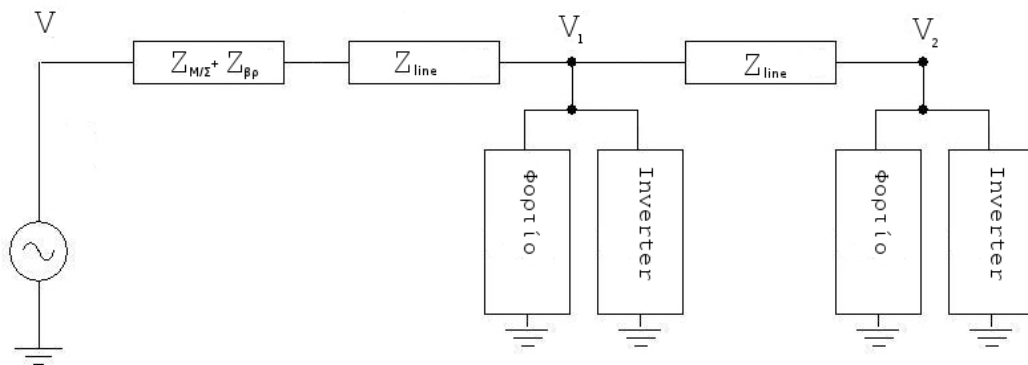
Στους παραπάνω τύπους φαίνεται καθαρά ότι η τάση στα άκρα του φορτίου πλέον περιέχει αρμονικό περιεχόμενο και μάλιστα είναι σε άμεση εξάρτηση από τις αρμονικές που εγχύει ο αντιστροφέας (πηγή αρμονικών) καθώς επίσης και από τις αρμονικές σύνθετες αντιστάσεις της γραμμής και του φορτίου. Με αυτό τον τρόπο φαίνεται η διαδικασία με την οποία "μολύνεται" η τάση σε ένα αρχικά ιδανικό δίκτυο. Ακόμη εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πλάτος των αρμονικών τάσης μπορεί να αυξομειώνεται ανάλογα με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της γραμμής καθώς και του φορτίου για σταθερές αρμονικές ρεύματος. Το ζήτημα που τίθεται τελικά είναι η ελαχιστοποίηση του μέτρου του δεύτερου όρου του ανωτέρω τύπου, με οποιονδήποτε τρόπο είναι αυτό δυνατό, αφού έτσι θα επιτυγχάνονταν άμεσα ελαχιστοποίηση των μέτρων των αρμονικών της τάσης.

$$\min \left| \frac{Z_{ισ}(n) Z_{load}(n)}{Z_{ισ}(n) + Z_{load}(n)} I_n \right| = \min \left| \frac{Z_{ισ}(n) Z_{load}(n)}{Z_{ισ}(n) + Z_{load}(n)} \right| \cdot |I_n|$$

Βέβαια η εξαγωγή μιας τέτοιας σχέσης σε ένα τόσο απλό δίκτυο όπως το παραπάνω είναι απλή ενώ σε ένα πιο σύνθετο δίκτυο θα ήταν πολύ πιο σύνθετη.

4.3.3 Διερεύνηση αρμονικού κυκλώματος με περισσότερες πηγές αρμονικών

Στη συνέχεια θα εξεταστεί ένα δίκτυο XT όπως το προηγούμενο αλλά με δύο κόμβους στη σειρά προκειμένου να προσδιοριστούν οι αρμονικές της τάσης σε κάθε σημείο.

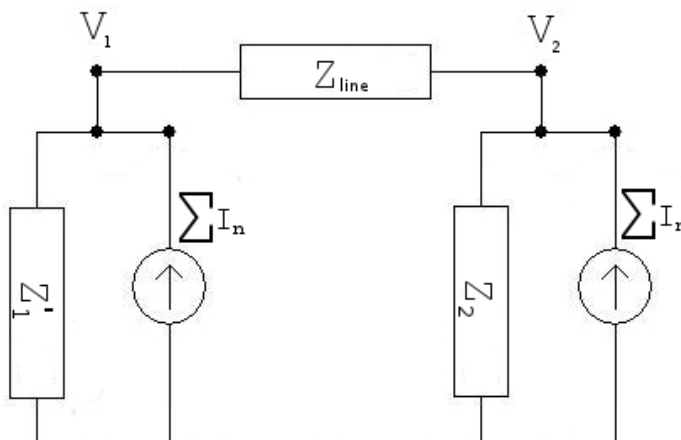


Εικόνα 4-7: Δίκτυο χαμηλής τάσης με δύο κόμβους

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση γίνεται ανάλυση του αρμονικού κυκλώματος με χρήση τη αρχής της επαλληλίας. Η πηγή τάσης εδώ μπορεί να μηδενιστεί καθ' όλη την ανάλυση εφόσον εξετάζονται συχνότητες μεγαλύτερες της θεμελιώδους. Επίσης, οι αντιστάσεις $Z_{M/\Sigma} + Z_{\beta\rho}$, Z_{line} και Z_1 αντικαθίστανται από την ισοδύναμη συνολική αντίσταση:

$$Z_1' = \frac{(Z_{M/\Sigma} + Z_{\beta\rho} + Z_{line}) \cdot Z_1}{(Z_{M/\Sigma} + Z_{\beta\rho} + Z_{line}) + Z_1}$$

Το αρμονικό κύκλωμα θα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 4-8: Αρμονικό κύκλωμα

Οι αρμονικές τάσης V_1^n προκύπτουν:

$$V_1^n = \frac{Z_1' \cdot (Z_{line} + Z_2)}{Z_1' + Z_{line} + Z_2} I_{n_1} + \frac{Z_1' \cdot Z_2}{Z_1' + Z_{line} + Z_2} I_{n_2} \text{ για } n > 1$$

Όπου ο πρώτος όρος οφείλεται μόνο στη διέγερση της πηγής του πρώτου κόμβου ενώ ο δεύτερος στη διέγερση της πηγής μόνο του δεύτερου.

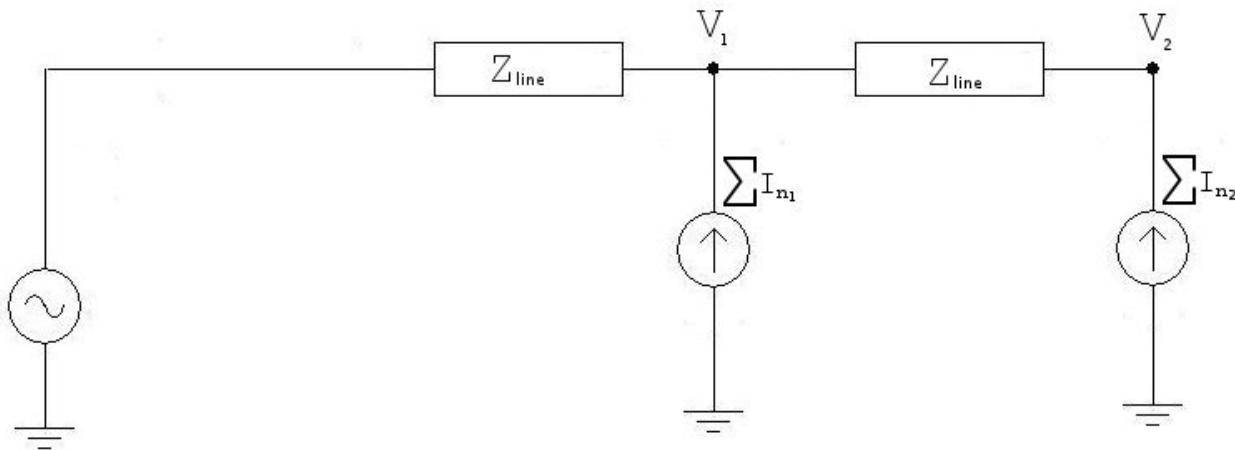
Ενώ η τάση V_2 αντίστοιχα:

$$V_2^n = \frac{Z_2 \cdot Z_1'}{Z_1 + Z_2 + Z_{line}} \cdot I_{n_1} + \frac{Z_2 \cdot (Z_1' + Z_{line})}{Z_2 + Z_1' + Z_{line}} \cdot I_{n_2} \text{ για } n > 1$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις είναι φυσικά συναρτήσεις της τάξης πράγμα το οποίο δεν φαίνεται στους παραπάνω τύπους για λόγους καλύτερης παρουσίασης.

Εάν από τις εκφράσεις για τις αρμονικές της τάσης συναρτήσει των αρμονικών του ρεύματος και των σύνθετων αντιστάσεων των φορτίων και των γραμμών θεωρήσουμε ότι τα μέτρα των αρμονικών του ρεύματος είναι σταθερά, προκύπτει πάλι το συμπέρασμα ότι το ύψος της παραμόρφωσης της τάσης θα είναι άμεσα εξαρτώμενο από τα φορτία (όσο, μεγαλύτερη κατανάλωση ενεργού ισχύος τόσο μικρότερη αντίσταση) καθώς επίσης και από το μέτρο των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών.

Ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται είναι η διερεύνηση του σημείου στο οποίο σε ένα απλό ακτινικό δίκτυο θα αναμένεται οι αρμονικές συνιστώσες στην τάση, να είναι υψηλότερες. Έστω λοιπόν το ακόλουθο ακτινικό δίκτυο χαμηλής τάσης με δύο κόμβους.



Εικόνα 4-9: Απλουστευμένο δίκτυο χαμηλής τάσης με δύο κόμβους

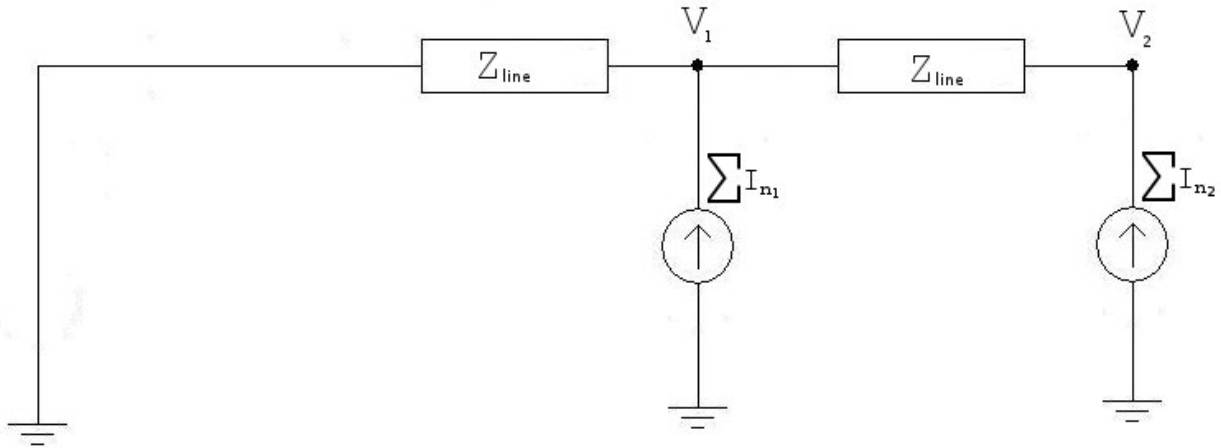
Για την απλούστευση του προβλήματος θα αμεληθούν τα φορτία αλλά και η σύνθετη αντίσταση λόγω ισχύος βραχυκύκλωσης και η σύνθετη αντίσταση M/Σ .

Εάν εκφραστούν τάσεις V_1 και V_2 με χρήση της αρχής της επαλληλίας (V η τάση του δικτύου) θα προκύψει:

$$V_1 = V + Z_{line} \cdot I_1 + Z_{line} \cdot I_2$$

$$V_2 = V + Z_{line} \cdot I_1 + 2Z_{line} \cdot I_2$$

Το αρμονικό κύκλωμα είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 4-10: Αρμονικό κύκλωμα της εικόνας 3-9

Οι αρμονικές τάσεις V_1^n και V_2^n με χρήση της αρχής της επαλληλίας θα είναι:

$$V_1^n = Z_{line} \cdot I_{n1} + Z_{line} \cdot I_{n2}$$

$$V_2^n = Z_{line} \cdot I_{n1} + 2Z_{line} \cdot I_{n2}$$

Εάν γίνει η παραδοχή ότι οι φασικές γωνίες και τα πλάτη για κάθε τάξη αρμονικών ρεύματος της καθεμίας πηγής αρμονικών είναι ίσες μεταξύ τους προκύπτει:

$$V_1^n = 2 \cdot Z_{line} \cdot I_n$$

$$V_2^n = 3 \cdot Z_{line} \cdot I_n$$

Γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι: $|V_2^n| = \frac{3}{2} \cdot |V_1^n|$

Δηλαδή το μέτρο των αρμονικών της τάσης στο σημείο 2 είναι μεγαλύτερο από το μέτρο των αρμονικών της τάσης στο σημείο 1.

Επίσης, το ρεύμα στη πρώτη γραμμή (μεταξύ της σύνδεσης με τα δίκτυο και του σημείου που αντιστοιχεί στην τάση V_1) θα είναι $2I_n$ ενώ αντίστοιχα στη δεύτερη γραμμή I_n . Αυτό ισχύει και για τις θεμελιώδεις συνιστώσες του ρεύματος.

Ο ορισμός της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης για το ρεύμα είναι:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1}$$

Έτσι για το THD του ρεύματος που διαρρέει την πρώτη γραμμή του κυκλώματος ισχύει:

$$THD_{line1} = \frac{\sqrt{(2 \cdot I_{2,2})^2 + (2 \cdot I_{2,3})^2 + \dots}}{2 \cdot I_{2,1}} = \frac{2 \cdot \sqrt{I_{2,2}^2 + I_{2,3}^2 + \dots}}{2 \cdot I_{2,1}} = THD_{line2}$$

Για την ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης V_2 αντίστοιχα ισχύει (στον επόμενο τύπο, ο πρώτος δείκτης της τάσης αφορά στην τάση ποιου κόμβου αναφερόμαστε ενώ ο δεύτερος στην τάξη της αρμονικής):

$$THD_{V2} = \frac{\sqrt{V_{2,2}^2 + V_{2,3}^2 + \dots}}{V_{2,1}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot V_{1,2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \cdot V_{1,3}\right)^2 + \dots}}{V_{2,1}} = \frac{\frac{3}{2} \cdot \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{1,3}^2 + \dots}}{V_{2,1}}$$

Το μέτρο των θεμελιωδών συνιστωσών των τάσεων V_1 και V_2 λογικά διαφέρει. Μάλιστα η ανύψωση της τάσης V_2 θα είναι μεγαλύτερη από αυτή της V_1 . Ωστόσο, σε ένα πραγματικό δίκτυο μπορούμε να ισχυριστούμε με βεβαιότητα ότι η εν λόγω διαφορά θα είναι σχετικά μικρή (συγκρινόμενη με τον παράγοντα $3/2$ που προκύπτει στον αριθμητή της προηγούμενης σχέσης). Ο λόγος για τον οποίο ισχύει αυτό είναι ο επόμενος:

Η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων V_1 και V_2 , όπως αποδείχτηκε προηγουμένως, περιέχει τον παράγοντα V ο οποίος σε ένα ιδανικό δίκτυο χαμηλής τάσης είναι 230V. Η τάση σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου δεν επιτρέπεται (από τον διαχειριστή του δικτύου) να υπερβαίνει το 110% την ονομαστικής ή αντίστοιχα να πέφτει κάτω από το 90% της ονομαστικής. Με αυτό το σκεπτικό η ανύψωση της τάσης στη χειρότερη περίπτωση θα περιορίζεται στην προηγούμενη τιμή. Επομένως, εξετάζοντας τη χειρότερη περίπτωση, η σχέση που θα είχαν οι δύο θεμελιώδεις συνιστώσες θα ήταν: $|V_{2,1}| = 1.1 \cdot |V_{1,1}|$ και με αυτό το δεδομένο εξάγεται το συμπέρασμα ότι:

$$THD_{V2} = \frac{\frac{3}{2} \cdot \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{1,3}^2 + \dots}}{|1.1 \cdot V_{1,1}|} = 1.36 \cdot \frac{\sqrt{V_{1,2}^2 + V_{1,3}^2 + \dots}}{|V_{1,1}|} = 1.36 \cdot THD_{V1} \Rightarrow$$

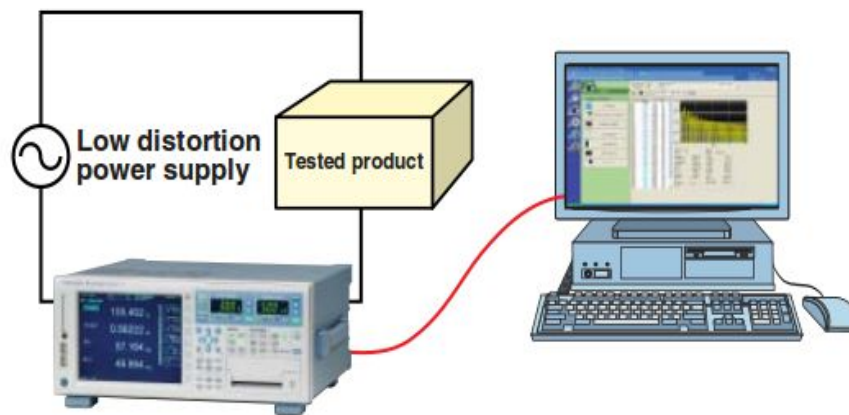
$$THD_{V2} > THD_{V1}$$

Επαγωγικά μπορεί ναδειχθεί ότι ισχύουν τα ίδια και σε ένα ακτινικό δίκτυο με περισσότερους κόμβους. Το συμπέρασμα επομένως είναι ότι: σε ένα ακτινικό δίκτυο ΧΤ με ίσα μήκη γραμμών και ίδιες πηγές αρμονικών, η ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης στον πιο απομακρυσμένο κόμβο θα είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στον κοντινότερο στη σύνδεση με το δίκτυο μέσης τάσης ενώ η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που διαρρέει τις γραμμές διατηρείται σταθερή. Το εν λόγω συμπέρασμα θα διερευνηθεί περαιτέρω με τις προσομοιώσεις δικτύων ΧΤ στο κεφάλαιο 6.

5. Μετρήσεις αρμονικών σε αντιστροφείς μικροδικτύου

5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τις μετρήσεις των αρμονικών χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής ισχύος (power analyzer) Yokogawa WT3000. Το εν λόγω μετρητικό έχει την δυνατότητα να μετράει ταυτόχρονα έως και 4 κυματομορφές ρεύματος και τάσης ενώ παράλληλα υπολογίζει τον μετασχηματισμό fourier (fft) των κυματομορφών αυτών. Μπορεί να λειτουργήσει είτε αυτόνομα είτε σε σύνδεση με Η/Υ. Στα εργαστηριακά πειράματα που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WTviewer το οποίο επιτυγχάνει την σύνδεση, τον έλεγχο των παραμέτρων μέτρησης του οργάνου αλλά και την απευθείας αποθήκευση των δεδομένων που καταγράφονται σε κατάλληλη μορφή στον Η/Υ.



Εικόνα 5-1: Ο εργαστηριακός αναλυτής ισχύος Yokogawa WT3000 και το περιβάλλον εργασίας και μετρήσεων μέσω του WTviewer

Η ακρίβεια του οργάνου ανέρχεται στο 0.02% στις μετρήσεις ισχύος ενώ πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι έχει την δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης όλων των απαραίτητων παραμέτρων που υποδεικνύονται από το πρότυπο IEC61000-03-02 για την μέτρηση των αρμονικών εκπομπών (χρονικό παράθυρο υπολογισμού του fft, συχνότητα δειγματοληψίας, κ.ά.)^[21]. Τέλος, στα πειράματα που διεξήχθησαν έγινε καταγραφή των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης (πλάτη και φασικές γωνίες) ενώ όπου κρίνονταν απαραίτητο καταγράφονταν και οι αντίστοιχες κυματομορφές.

5.2 Αντιστροφέας Sunny Boy 1100^[22]

Ο Sunny boy 1100 grid-connect inverter, είναι ένας αντιστροφέας για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών με ένα δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο που έχει εγκατασταθεί

στο εργαστήριο ΣΗΕ έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Input Characteristics	
Recc maximum PV power	1350 Wp
Maximum DC power	1210 W
Maximum DC voltage	400 V
PV-voltage range, MPPT	139V - 400V
Maximum input current	10 A
DC voltage ripple	< 10 %
Max number of strings parallel	2
DC disconnection	Snap cable connections
Thermally monitored varistors	Yes
Ground fault monitoring	Yes
Reverse polarity protection	Short circuit diode
Output Characteristics	
Max AC power	1100 W
Nominal AC power	1000 W
THD of grid current	< 4%
Default range of AC voltage	198 V - 260 V
Possible range of AC voltage	180 V - 265 V
AC frequency	49.5 Hz - 50.2 Hz
Possible range of AC frequency	45.5 Hz - 54.5 Hz
Phase shift	1
Short circuit proof	Yes, current control
Connection to utility	AC plug
Maximum Efficiency	93%
Mechanical Characteristics	
Dimensions	320W x 320H x 180D mm
Weight	21 kg

Εικόνα 5-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Sunny Boy 1100

Ο Sunny boy είναι ένας αντιστροφέας ισχύος DC/AC πηγής τάσης. Χρησιμοποιείται όπως προείπαμε για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο δίκτυο. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα βλέπουμε πως η τάση εισόδου του πρέπει να κυμαίνεται από 139-400 volt συνεχούς τάσης ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος γνωστή ως Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T).

Ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στην έξοδο του με το εργαστηριακό μικροδίκτυο και κατ' επέκταση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην έξοδό του μετράει την ονομαστική τάση για την οποία έχει προγραμματιστεί και εφόσον η συχνότητα βρίσκεται στα επιθυμητά όρια, είναι ανά πάση στιγμή έτοιμος να λειτουργήσει μετατρέποντας την τάση εισόδου των Φ/Β σε εναλλασσόμενη. Ταυτόχρονα θα πρέπει η τάση εισόδου του να είναι μεγαλύτερη των 180 Volt, ώστε να εξασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν συνεχείς διακοπές της διαδικασίας.

Η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα περνά από ένα φίλτρο για προστασία από υπερτάσεις καθώς και από ένα βαθυπερατό φίλτρο για εξομάλυνση του ρεύματος εισόδου. Έπειτα ακολουθεί ένας μετατροπέας

DC/DC ο οποίος χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της τεχνικής μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών (M.P.P.T).

Η τάση αυτή, τροφοδοτεί μια γέφυρα που αποτελείται από τέσσερα διπολικά τρανζίστορ ελεγχόμενα από την πύλη (IGBT) τα οποία λειτουργούν με φέρουσα συχνότητα $f_s=16$ kHz. Στην γέφυρα αυτή το ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας 50Hz με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται πριν φτάσει στην έξοδο του αντιστροφέα περνά από ένα μετασχηματιστή απομόνωσης για την ηλεκτρική απομόνωση της DC από την AC πλευρά. Τέλος, έχουμε και την παρεμβολή ενός βαθυπερατού φίλτρου στην έξοδο, για την εξουδετέρωση των υψίσυχνων αρμονικών που παράγονται από τον αντιστροφέα, καθώς επίσης και για την προστασία από υπερτάσεις του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως η λειτουργία της γέφυρας καθώς και ο χρονισμός σύνδεσης – αποσύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο ελέγχεται πλήρως από ψηφιακά κυκλώματα.

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100 είναι ένας αντιστροφέας μονόδρομης ροής ισχύος, καθώς επιτρέπει μονό ροή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά προς το δίκτυο, και όχι το αντίστροφο.

Έχει τη δυνατότητα να υλοποιήσει έλεγχο της ισχύος εξόδου του και σύμφωνα με τη συχνότητα του δικτύου. Ερμηνεύοντας την αύξηση της συχνότητας στο δίκτυο ως ένδειξη πλεονάζουσας ενεργού ισχύος, ο αντιστροφέας μειώνει την ισχύ εξόδου. Ο έλεγχος αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε απομονωμένα δίκτυα όπου και η συχνότητα ελέγχεται από αντιστροφέα ισχύος ή μια σύγχρονη γεννήτρια. Έτσι επιτυγχάνεται η συνεργασία των μονάδων αυτών στη βάση της αρνητικής κλίσης ενεργού ισχύος – συχνότητας^[40].

5.3 Μετρήσεις αρμονικών του αντιστροφέα sunny boy 1100 σύμφωνα με τον οργανισμό DERlab

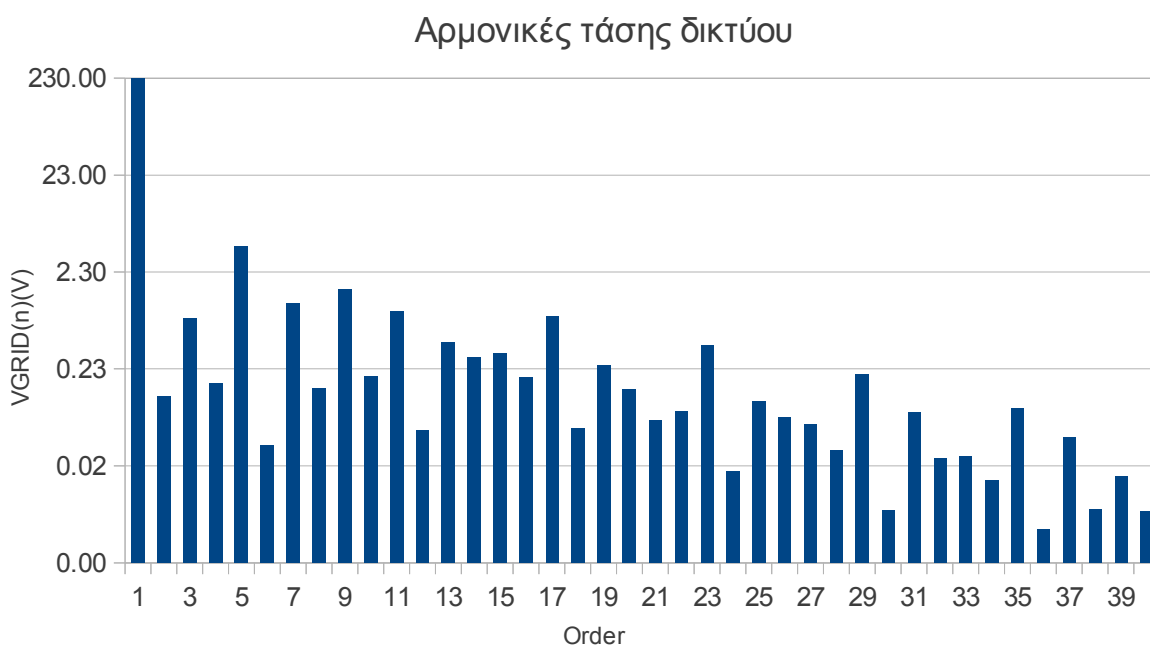
Οι μετρήσεις των αρμονικών του αντιστροφέα έγιναν για τιμές ενεργού ισχύος εξόδου διαδοχικά ίσες με 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 81.4% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα. Εφόσον δεν ήταν διαθέσιμο κάποιο DC τροφοδοτικό μεγάλης ισχύος αλλά ούτε και κάποιος προσομοιωτής Φ/Β γεννήτριας αναγκαστικά χρησιμοποιήθηκε η Φ/Β συστοιχία που διαθέτει το εργαστήριο ΣΗΕ η οποία όμως μπορεί να τροφοδοτήσει τον αντιστροφέα με ισχύ τέτοια ώστε να αποδίδει στην έξοδό του ισχύ 814W. Αυτή είναι η και η υψηλότερη ισχύς που καταγράφηκε μετά από πολυήμερες καταγραφές. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι μετρήσεις πάρθηκαν τον μήνα Σεπτέμβριο γεγονός που εξασφαλίζει μια πολύ αποδοτική λειτουργία των Φ/Β πλαισίων αφού συνδυάζει πολύ καλές συνθήκες ηλιοφάνειας αλλά παράλληλα όχι

υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μειώνουν αισθητά την απόδοση τους.

Από την AC πλευρά ο αντιστροφέας συνδέθηκε στο μονοφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης (του εργαστηρίου ΣΗΕ) το οποίο φυσικά πριν από την έναρξη της δοκιμής (με τον μετατροπέα αποσυνδεδεμένο), ελέγχθηκε και συμμορφώνεται με τις ακόλουθες απαιτήσεις οι οποίες αναφέρθηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

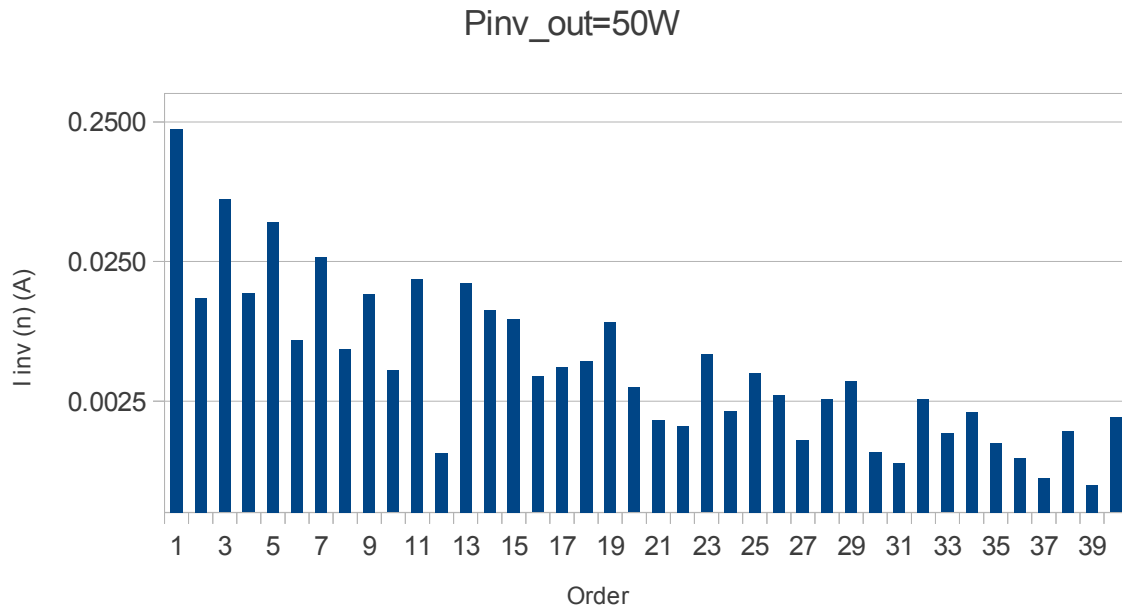
- Το THD της τάσης παρέμεινε καθ' όλη τη διαδικασία κάτω του 3%
- η τάση δοκιμής διατηρήθηκε μεταξύ 225.4V έως 234.6V και η συχνότητα μεταξύ 49.75Hz έως 50.25Hz.
- Οι αρμονικές της τάσης δεν υπερβαίνουν τα όρια.
- Η μέγιστη τιμή (peak) της τάσης δοκιμής κινούνταν στο διάστημα μεταξύ 1.40 και 1.42 φορές την rms τιμή της και επιτυγχάνονταν εντός 87 ° και 93 ° μετά τη μηδενισμό.

Παρακάτω φαίνεται το γράφημα των αρμονικών της τάσης του δικτύου. Σημειώνεται ότι η κλίμακα του άξονα y είναι λογαριθμική στα γραφήματα πλατών καθώς αυτό εξυπηρετεί στην καλύτερη επισκόπηση των δεδομένων.

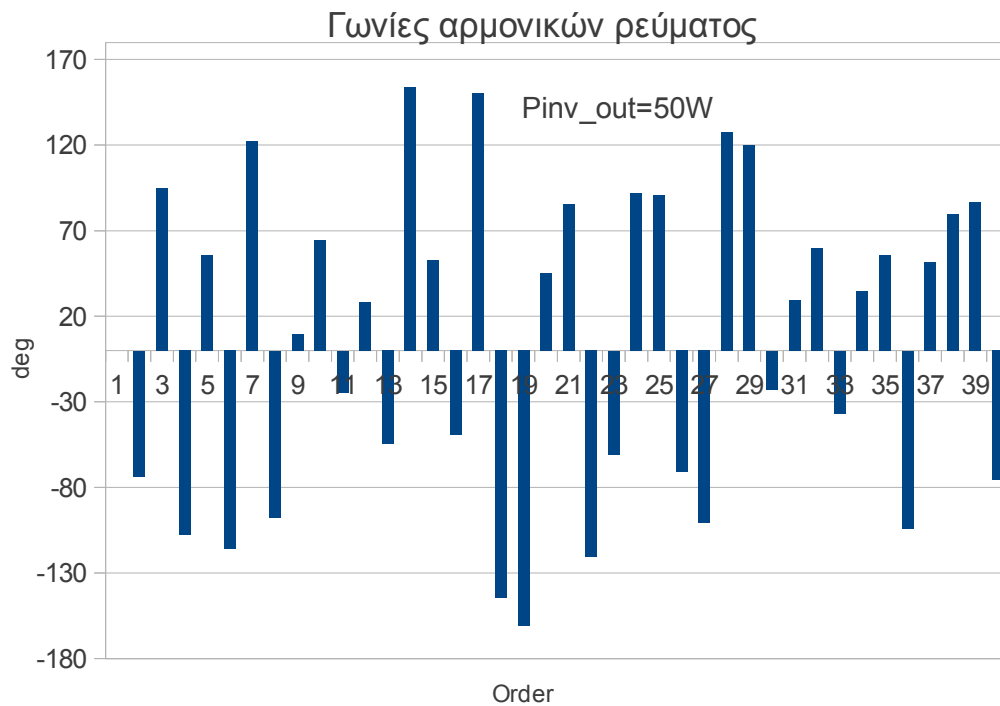


Γράφημα 5-1: Μέτρηση των αρμονικών της τάσης του δικτύου πριν τη σύνδεση του Φ/B inverter $THD_V=2.168\%$ Μέσος όρος μετρήσεων 30 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

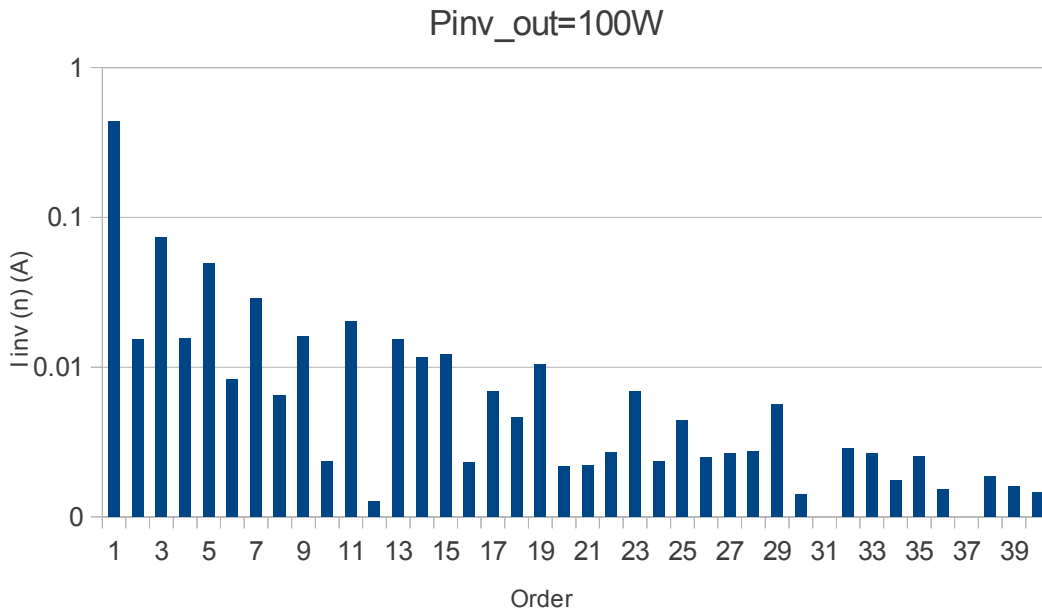
Στη συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα που προαναφέρθηκαν με τις μετρήσεις αρμονικών ρεύματος του αντιστροφέα για τις διάφορες τιμές ισχύος εξόδου που καταγράφηκαν. Για κάθε τιμή ενεργού ισχύος καταγράφηκαν τα πλάτη των αρμονικών του ρεύματος μέχρι την 40^η τάξη καθώς επίσης και οι φασικές τους γωνίες (σχετικές ως προς την θεμελιώδη). Οι τιμές των αρμονικών που καταγράφηκαν προκύπτουν μέσα στα όρια που θέτει το πρότυπο IEC61000.03.02 καθώς και το IEC61727.



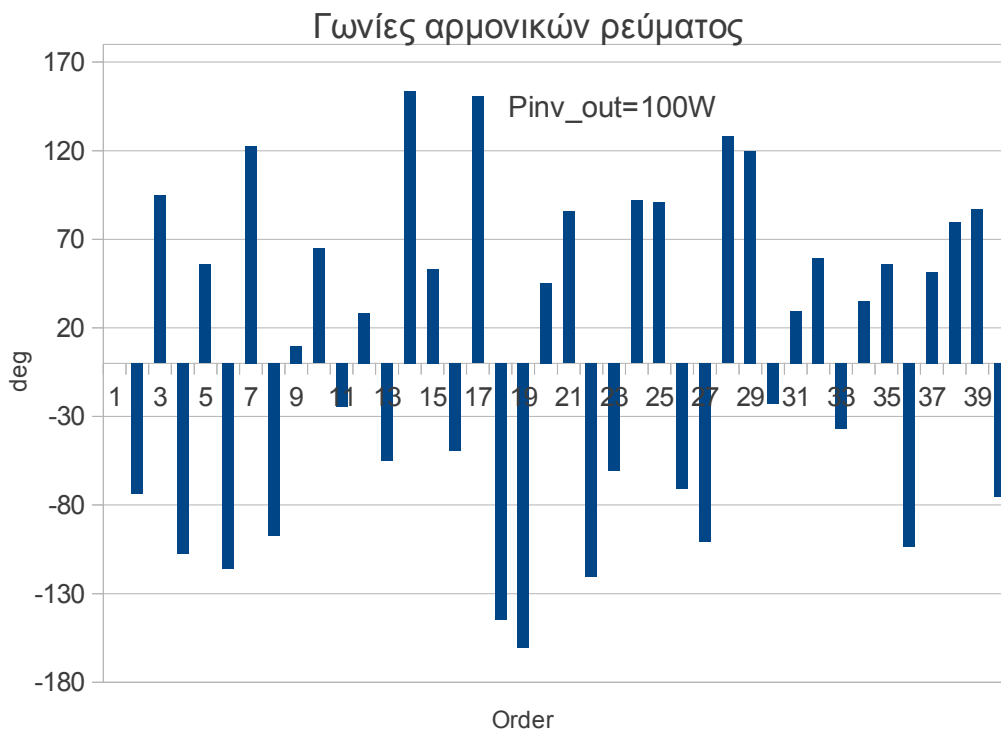
Γράφημα 5-2: $THD_I=45.3\%$, $THD_V=2.61\%$ Μέσος όρος μετρήσεων 1 λεπτού, 74 μετρήσεις/λεπτό



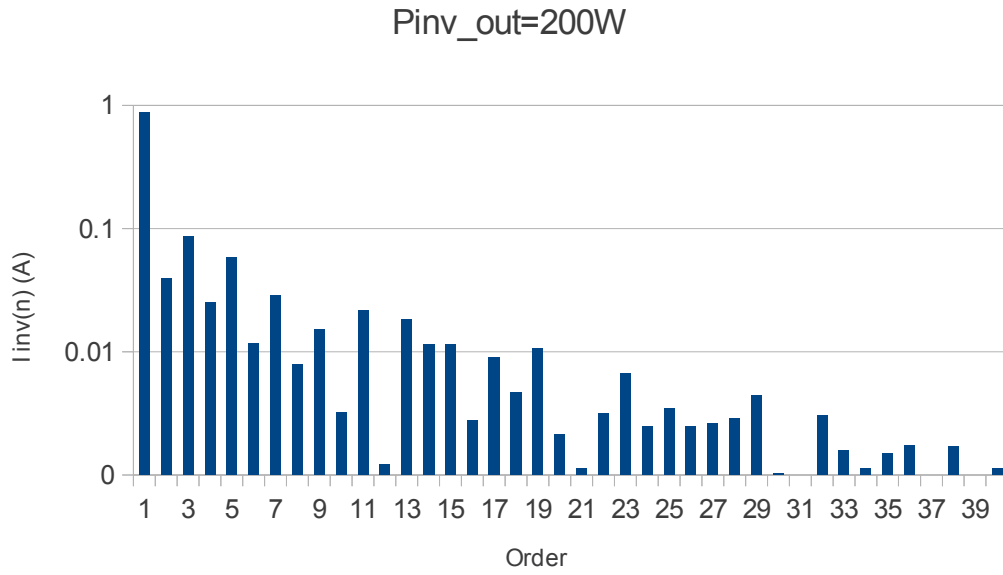
Γράφημα 5-3: Μέσος όρος μετρήσεων 1 λεπτού, 74 μετρήσεις/λεπτό



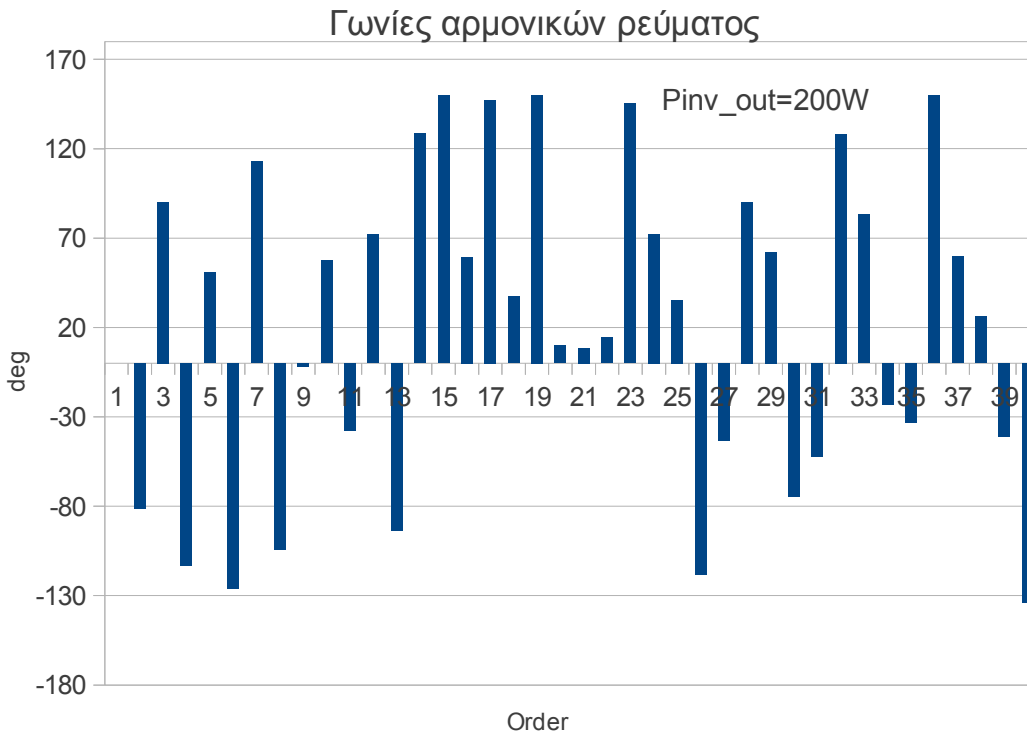
Γράφημα 5-4: THD_I=**24.01%**, THD_V=2.56% Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό



Γράφημα 5-5: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

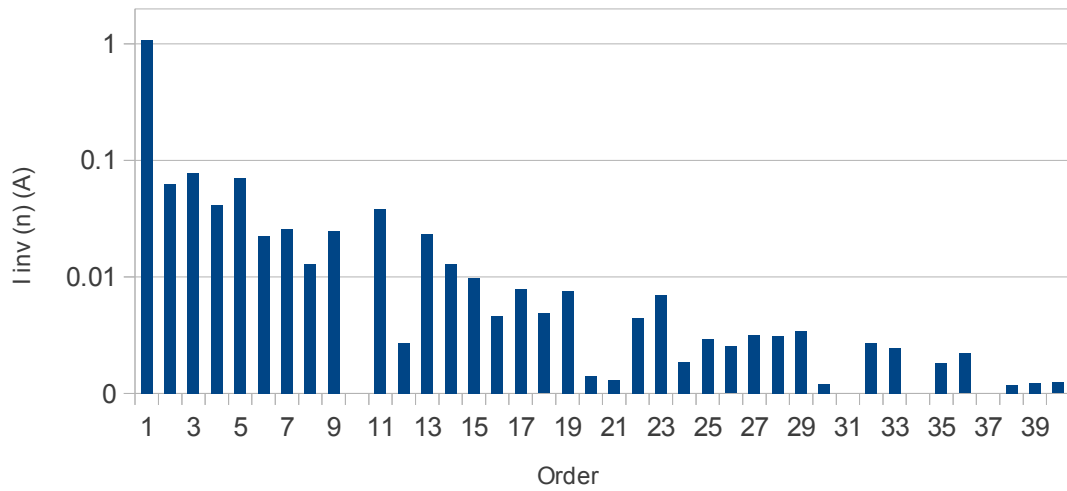


Γράφημα 5-6: $THD_I=14.57\%$, $THD_V=2.70\%$ Μέσος όρος μετρήσεων 2.5 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

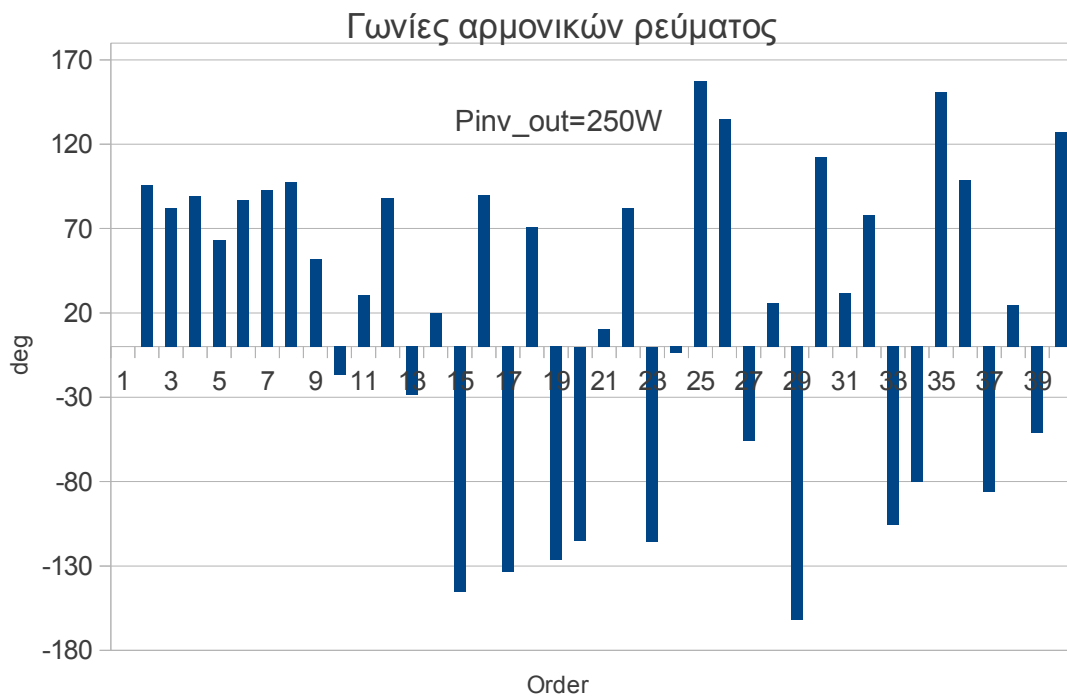


Γράφημα 5-7: Μέσος όρος μετρήσεων 2.5 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

P_{inv_out}=250W

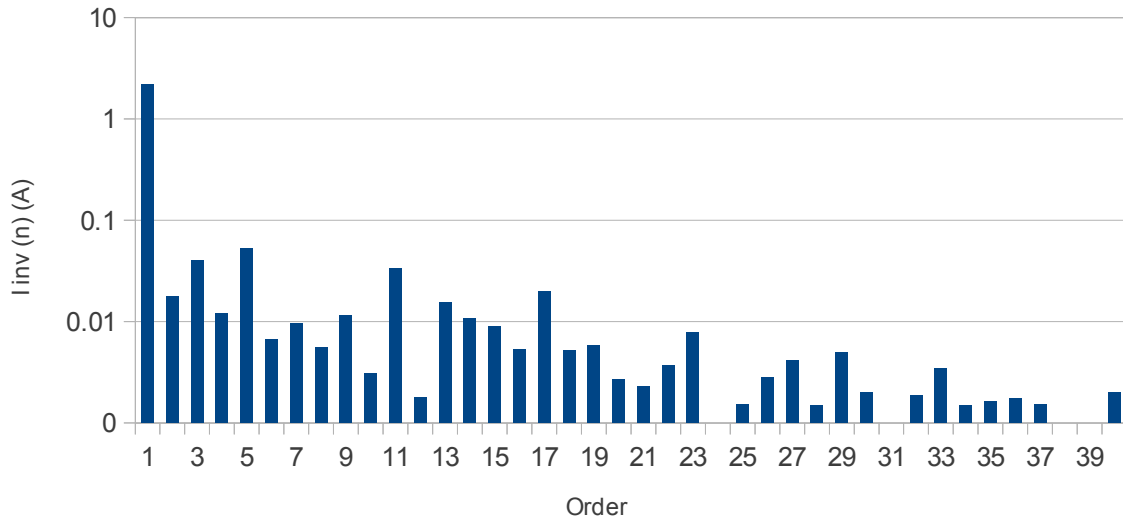


Γράφημα 5-8: $THD_I=12.47\%$, $THD_V=2.67\%$: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό



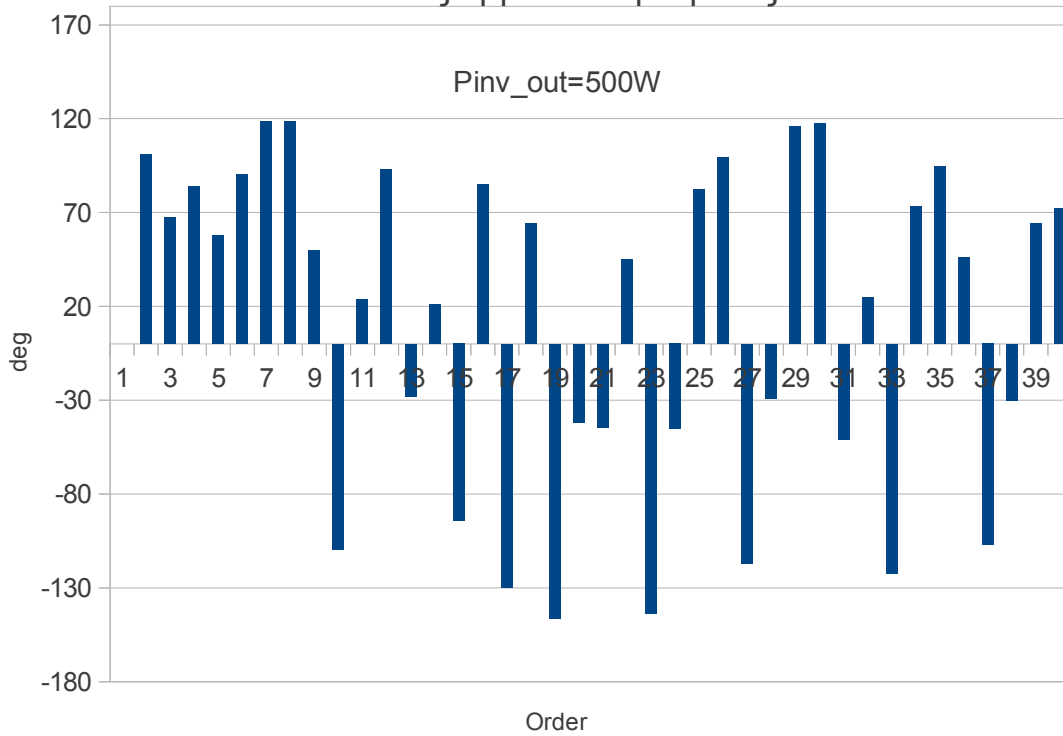
Γράφημα 5-9: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

Pinv_out=500W



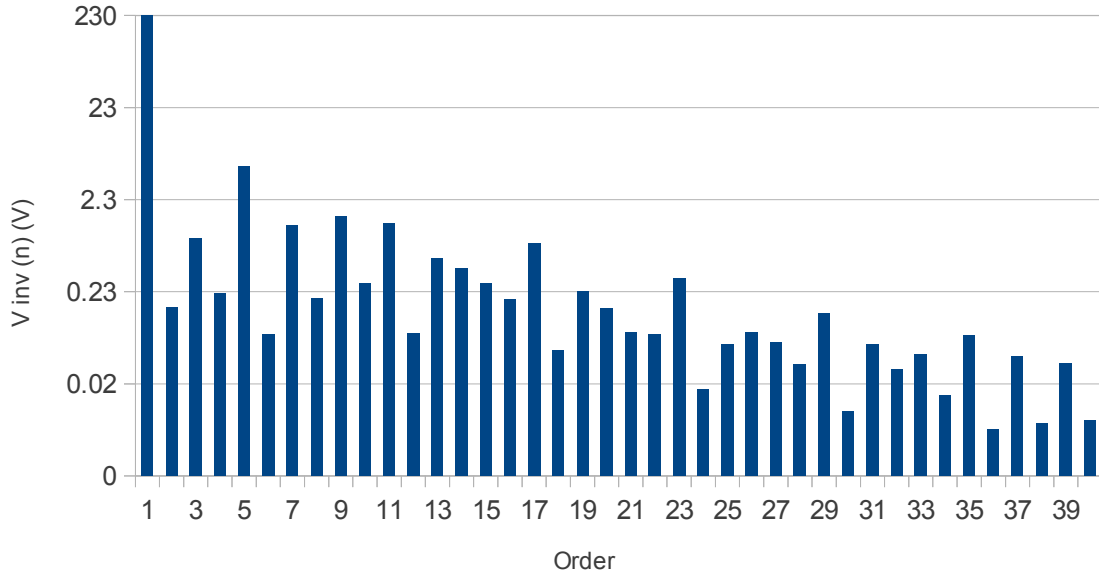
Γράφημα 5-10: $THD_I=4.03\%$, $THD_V=2.69\%$: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

Γωνίες αρμονικών ρεύματος

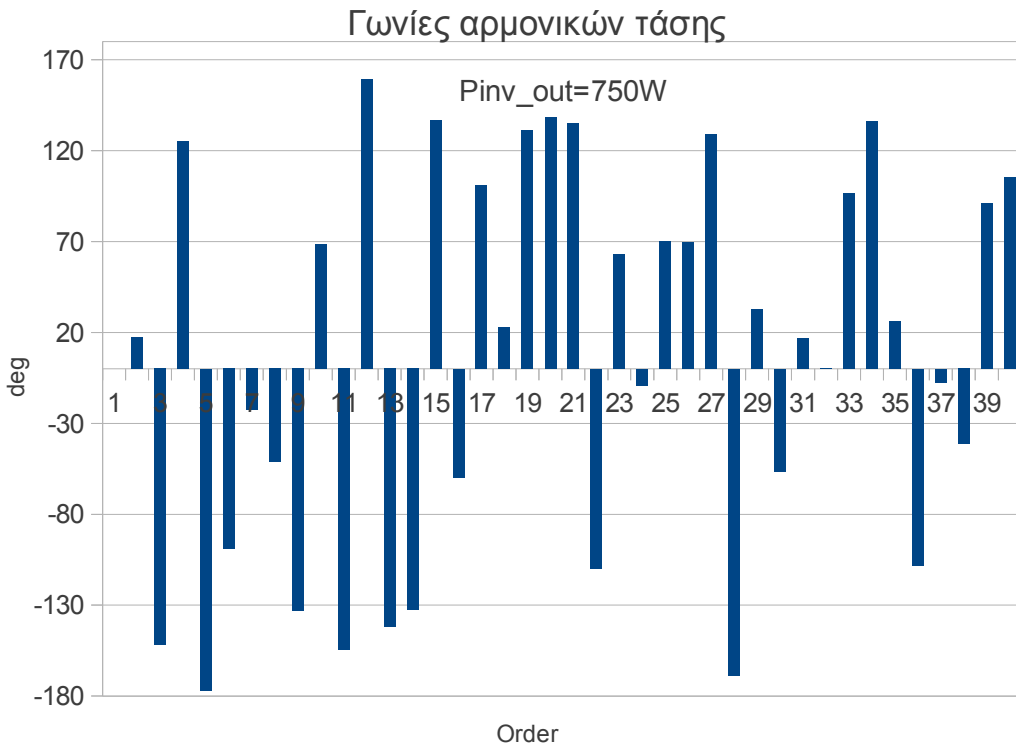


Γράφημα 5-11: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

Pinv_out=750W

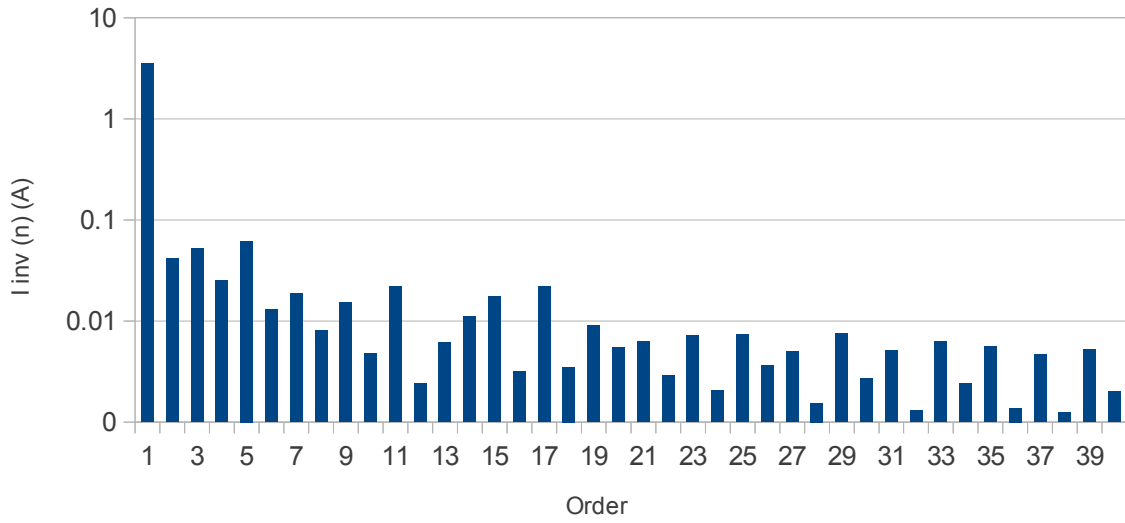


Γράφημα 5-12: $THD_I=3.43\%$, $THD_V=2.56\%$: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

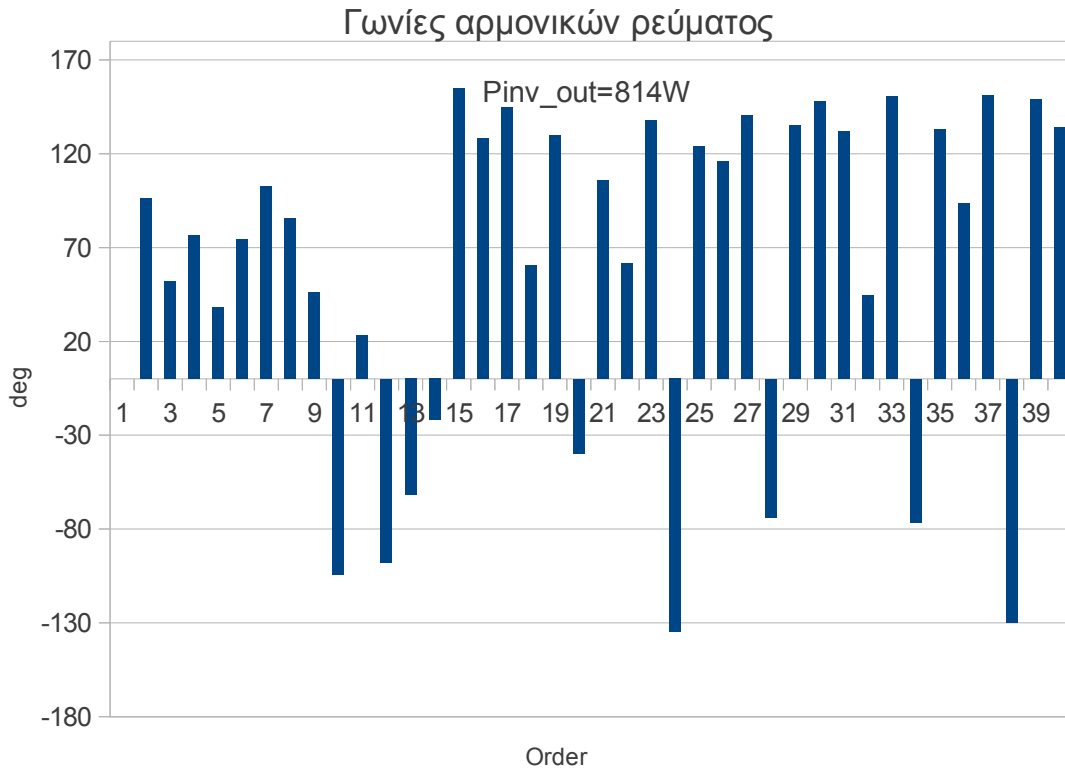


Γράφημα 5-13: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

Pinv_out=814W



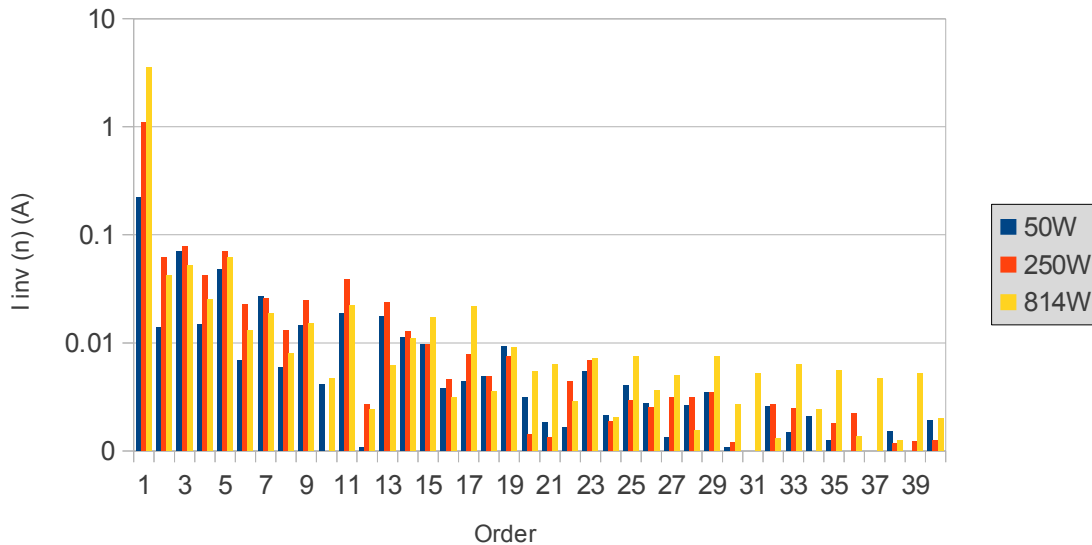
Γράφημα 5-14: $THD_I=3.14\%$, $THD_V=2.56\%$: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό



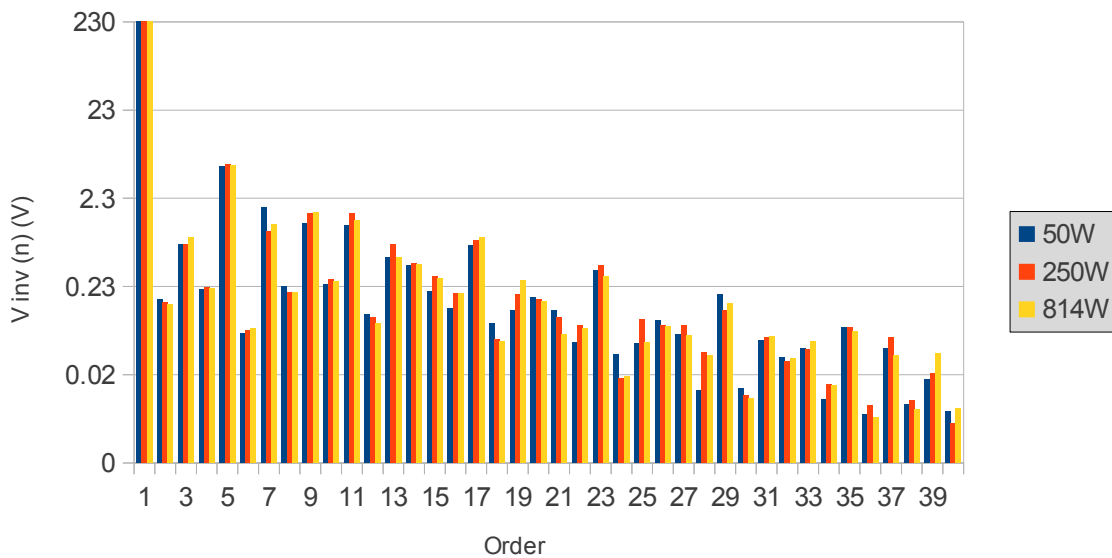
Γράφημα 5-15: Μέσος όρος μετρήσεων 2 λεπτών, 74 μετρήσεις/λεπτό

5.4 Εξάρτηση παραμόρφωσης ρεύματος από την ισχύ λειτουργίας

Τα επόμενα διαγράμματα που παρατίθενται απεικονίζουν τις αρμονικές του ρεύματος και της τάσης στην ελάχιστη, τη μέγιστη και μία ενδιάμεση ισχύ λειτουργίας του αντιστροφέα με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την συσχέτιση μεταξύ της εκπομπής αρμονικών και της ισχύος λειτουργίας.



Γράφημα 5-16: Αρμονικές ρεύματος αντιστροφέα



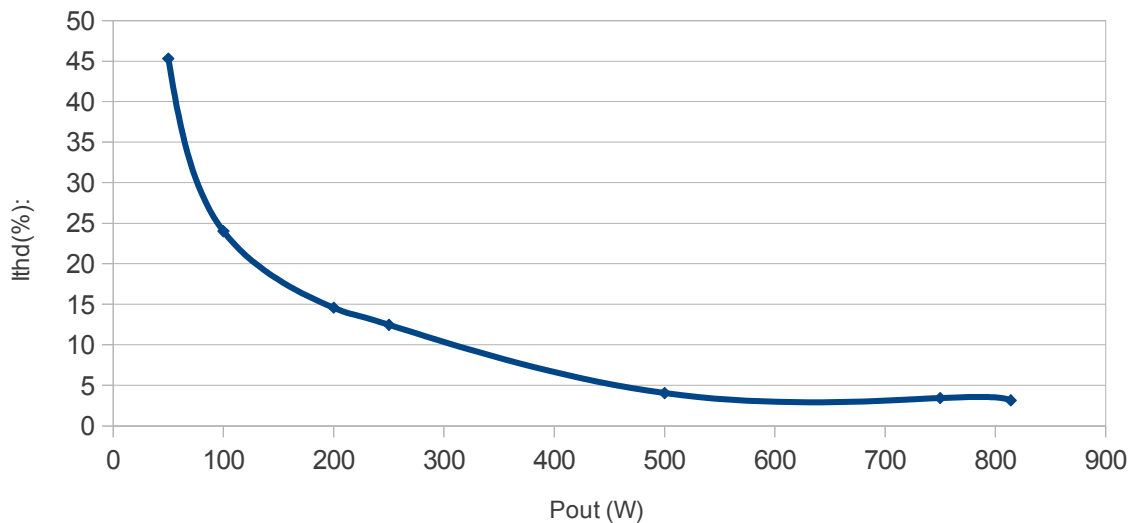
Γράφημα 5-17: Αρμονικές τάσης

Από το δεύτερο διάγραμμα εύκολα βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι αρμονικές της τάσης δεν επηρεάζονται σημαντικά αφού φαίνεται καθαρά ότι οι διαδοχικές τιμές των πλατών είναι πρακτικά ίσες. Αυτό βέβαια φαίνεται και από το γεγονός ότι το THD της τάσης παραμένει στα ίδια επίπεδα καθώς το πείραμα του αντιστροφέα προχωράει. Σίγουρα υπάρχει κάποια επιρροή (όπως έχει αναλυθεί σε θεωρητικό επίπεδο) αλλά στη κλίμακα των αρμονικών εκπομπών του συγκεκριμένου αντιστροφέα δεν παρατηρείται κάποια έντονη μεταβολή.

Από την άλλη πλευρά, το πρώτο διάγραμμα μας δίνει σημαντική πληροφορία. Παρατηρείται ότι στις χαμηλότερες συχνότητες τάξη $< 17^{\text{η}}$, τα πλάτη των αρμονικών που αντιστοιχούν σε ενεργό ισχύ εξόδου μικρότερη από την μέγιστη είναι μεγαλύτερα σε σχέση με τα πλάτη της τελευταίας. Συγκεκριμένα για $P_{\text{out}}=250\text{W}$ εμφανίζονται υψηλότερες αρμονικές από ότι για $P_{\text{out}}=814\text{W}$.

Το επόμενο διάγραμμα έρχεται να ενισχύσει την προηγούμενη παρατήρηση δείχνοντας την σχέση που εμφανίζεται να υπάρχει μεταξύ του THD του ρεύματος του αντιστροφέα και της αποδιδόμενης ισχύος. Φαίνεται καθαρά ότι όσο ο αντιστροφέας απομακρύνεται από την ονομαστική του λειτουργία και η αποδιδόμενη ισχύς μειώνεται η παραμόρφωση του ρεύματος αυξάνεται σημαντικά. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο κυρίως όταν η αποδιδόμενη ισχύς πέφτει κάτω από τα 500W.

THD% ρεύματος - παραγόμενη ενεργός ισχύς του inverter



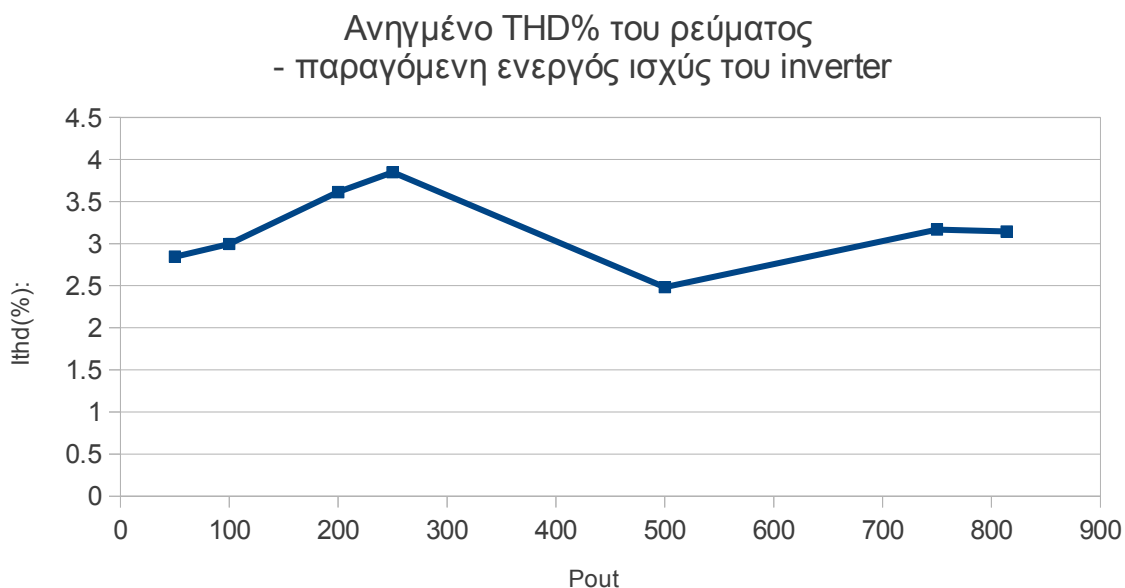
Γράφημα 5-18: Σχέση μεταξύ παραμόρφωσης ρεύματος του αντιστροφέα και αποδιδόμενης ισχύος

Μια πιο αντικειμενική ματιά θα μπορούσαμε να πάρουμε αν στον υπολογισμό του THD για κάθε κυματομορφή δεν χρησιμοποιηθεί η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος της κυματομορφής που γίνεται

ανάλυση αλλά η θεμελιώδης συνιστώσα της κυματομορφής ρεύματος ονομαστικής αποδιδόμενης ισχύος:

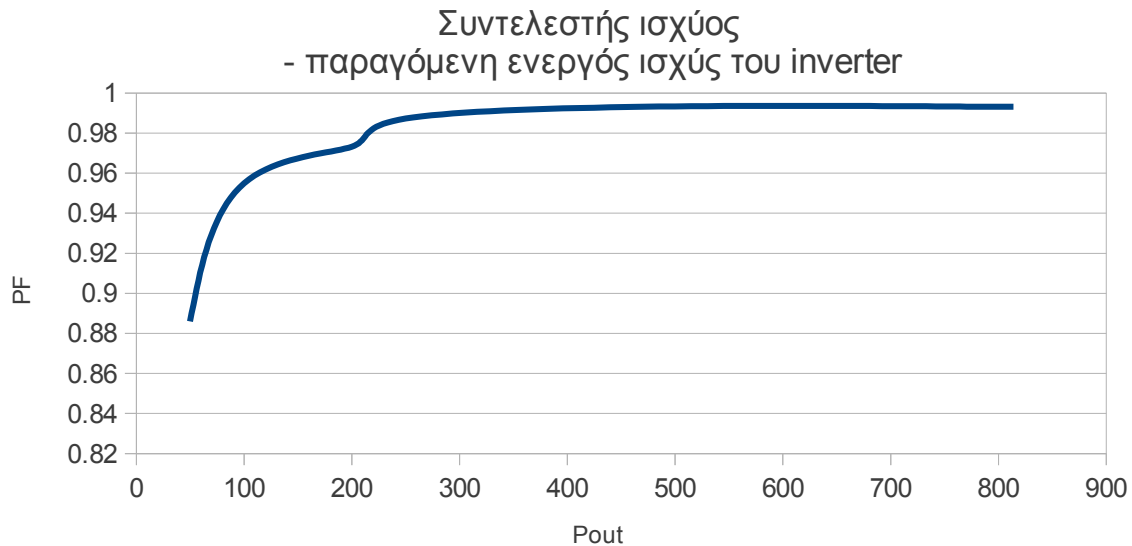
$$\text{Ανηγμένο THD}_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}{(I_{1 \text{ nominal}})^2}}$$

Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται μια καλύτερη εκτίμηση της παραμόρφωσης του ρεύματος, ανηγμένη στην ονομαστική λειτουργία του αντιστροφέα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όσα προαναφέρθηκαν, το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι για λειτουργία σε αποδιδόμενη ισχύ 500W εμφανίζεται αναλογικά μικρότερη παραμόρφωση στο ρεύμα σε σχέση με τη λειτουργία στη μεγαλύτερη αποδιδόμενη ισχύ, πράγμα που δεν φαινόταν στο προηγούμενο σχήμα. Επίσης, για λειτουργία σε αποδιδόμενη ισχύ 250W εμφανίζεται η χειρότερη περίπτωση παραμόρφωσης.



Γράφημα 5-19: Σχέση μεταξύ ανηγμένου THD ρεύματος του αντιστροφέα και αποδιδόμενης ισχύος

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι, όπως αναμένεται άλλωστε και θεωρητικά, ο πραγματικός συντελεστής ισχύος θα μειωθεί με την αύξηση των αρμονικών. Στο επόμενο διάγραμμα είναι φανερό η πτώση του συντελεστή ισχύος ιδίως όταν η αποδιδόμενη ισχύς του αντιστροφέα πέφτει κάτω από τα 300W παρατήρηση η οποία συμφωνεί απόλυτα με τα προηγούμενα συμπεράσματα. Ο αντιστροφέας μπορεί να βελτιώσει τον συντελεστή μετατόπισης αλλά με την σημαντική αύξηση των αρμονικών συνιστωσών (όταν μειώνεται η αποδιδόμενη ισχύς) φαίνεται να μην επιτυγχάνει να διατηρεί τον συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα.



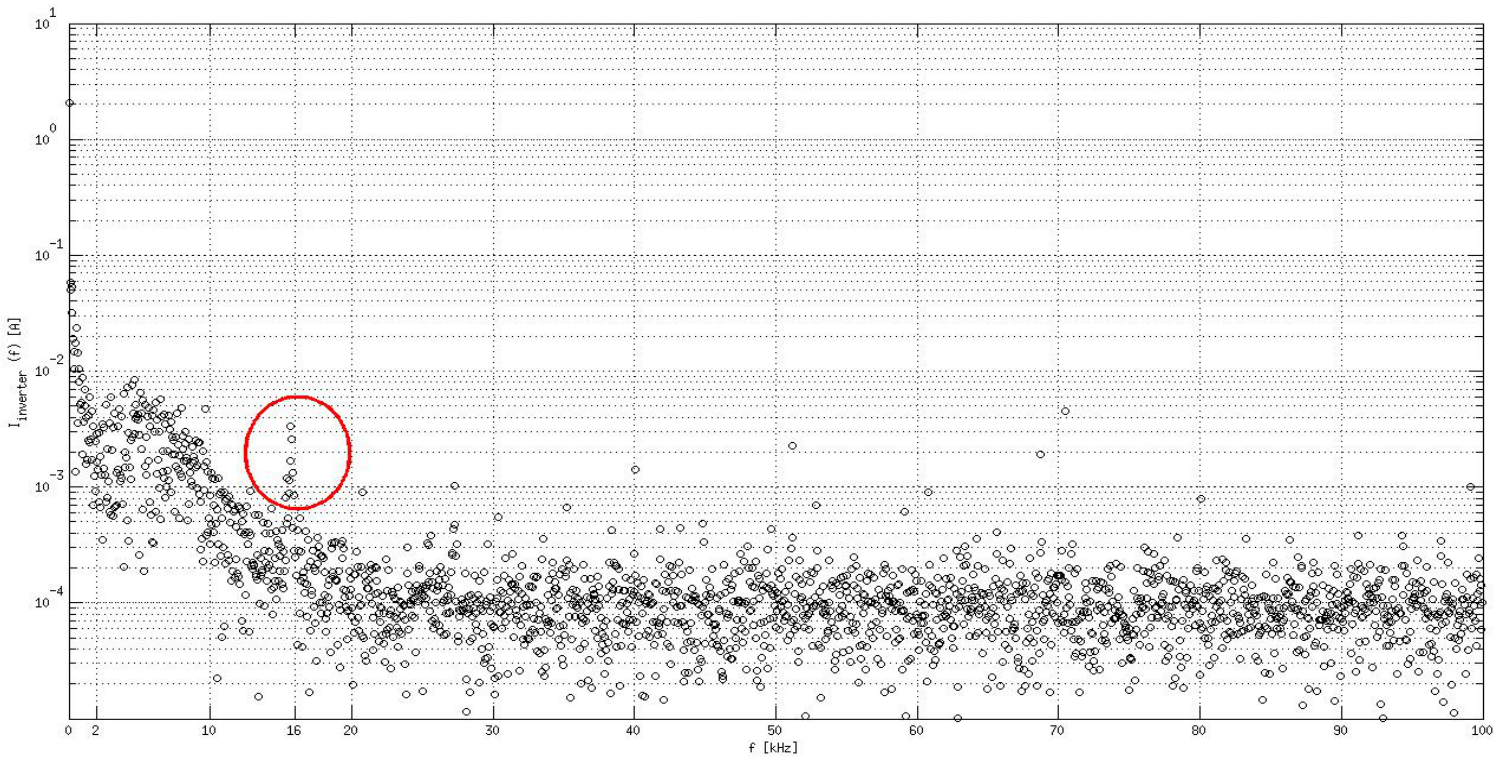
Γράφημα 5-20: Πραγματικός συντελεστής ισχύος και αποδιδόμενη ισχύς

5.5 Μετρήσεις αρμονικών υψηλότερης τάξης (μεγαλύτερης από 2kHz)

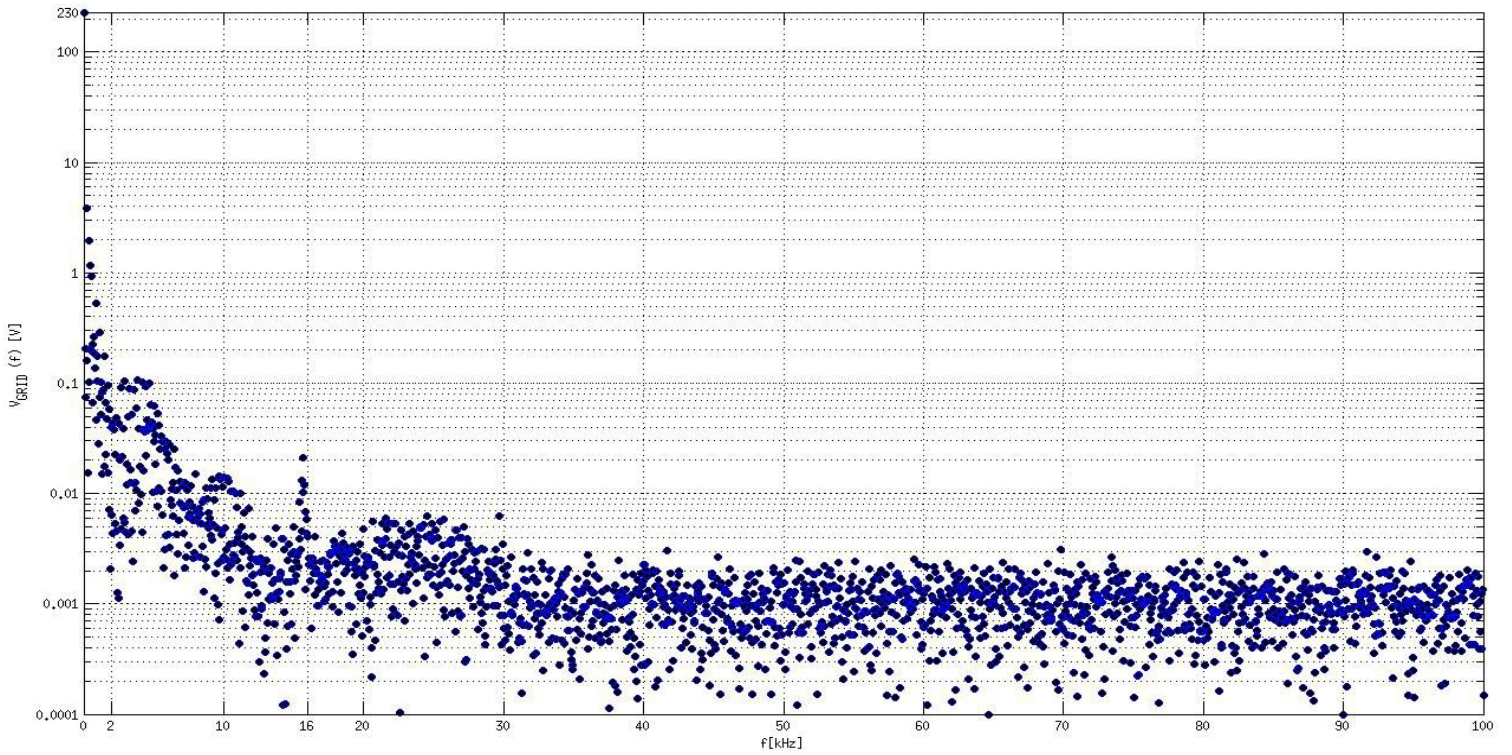
Στο πείραμα που ακολουθεί έγινε μέτρηση των αρμονικών του ρεύματος και της τάσης του αντιστροφέα σε συχνότητες μεγαλύτερες των 2kHz και μέχρι 100kHz. Οι συχνότητες αυτές δεν καλύπτονται από τα διεθνή πρότυπα και η διερεύνησή τους παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον στα πλαίσια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η αποδιδόμενη ισχύς του αντιστροφέα στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 550W.

Στα γραφήματα που ακολουθούν έγινε καταγραφή όλων των αρμονικών αλλά και των ενδιάμεσων αρμονικών ξεκινώντας από την μηδενική συχνότητα (DC συνιστώσα) και με βήμα 10Hz μέχρι την συχνότητα 100kHz. Στη συνέχεια, αγνοήθηκαν όσες συχνότητες δεν ήταν πολλαπλάσιες της θεμελιώδους καθώς επρόκειτο για ενδιάμεσες αρμονικές.

Κάθε σημείο του γραφήματος αντιστοιχεί σε μία αρμονική (ρεύματος στο γράφημα 5-19 και τάσης στο 5-20). Στο πρώτο γράφημα φαίνεται καθαρά ότι υπάρχει σημαντικό αρμονικό περιεχόμενο και μετά από την συχνότητα των 2kHz και μάλιστα μέχρι τη συχνότητα των 20kHz. Ιδιαίτερα στην συχνότητα κοντά στα 16kHz η οποία συμπίπτει με την διακοπτική συχνότητα των IGBT του αντιστροφέα σημειώνεται μία πύκνωση και οι αρμονικές έχουν αυξημένα πλάτη. Αυξημένου πλάτους αρμονική εμφανίζεται επίσης και στα 70kHz. Παρατηρείται ακόμα, ότι οι αρμονικές αυτές περνάνε στην τάση αφού και στο γράφημα της τάσης υπάρχει μία αντίστοιχη πύκνωση κοντά στη συχνότητα των 16kHz.

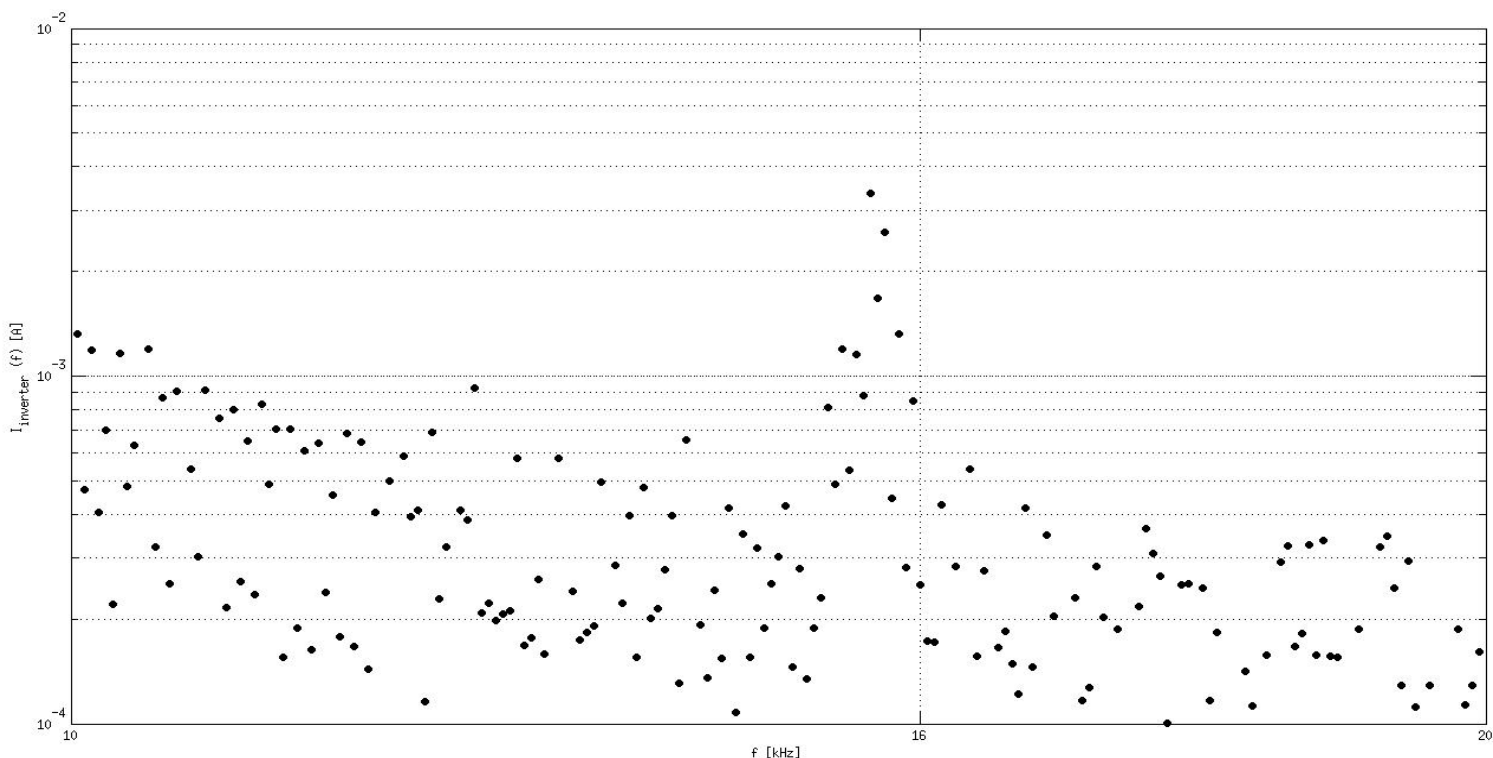


Γράφημα 5-21: Μετρήσεις αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα μέχρι 100kHz



Γράφημα 5-22: Μετρήσεις αρμονικών τάσης μέχρι 100kHz

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται μεγέθυνση του γραφήματος 5-19 στις συχνότητες 10 έως 20kHz για λόγους καλύτερης παρουσίασης του φαινομένου της εμφάνισης αρμονικών που οφείλονται στα διακοπτικά του αντιστροφέα.

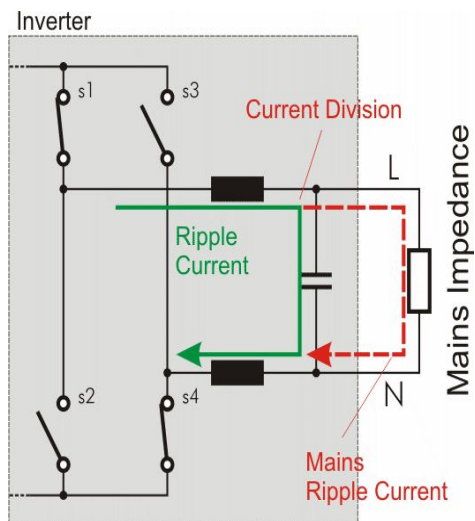


Γράφημα 5-23: Λεπτομέρεια του γραφήματος 5-19

5.5.1 Μετρήσεις αρμονικών υψηλότερης τάξης μετά την τοποθέτηση πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση με τον αντιστροφέα

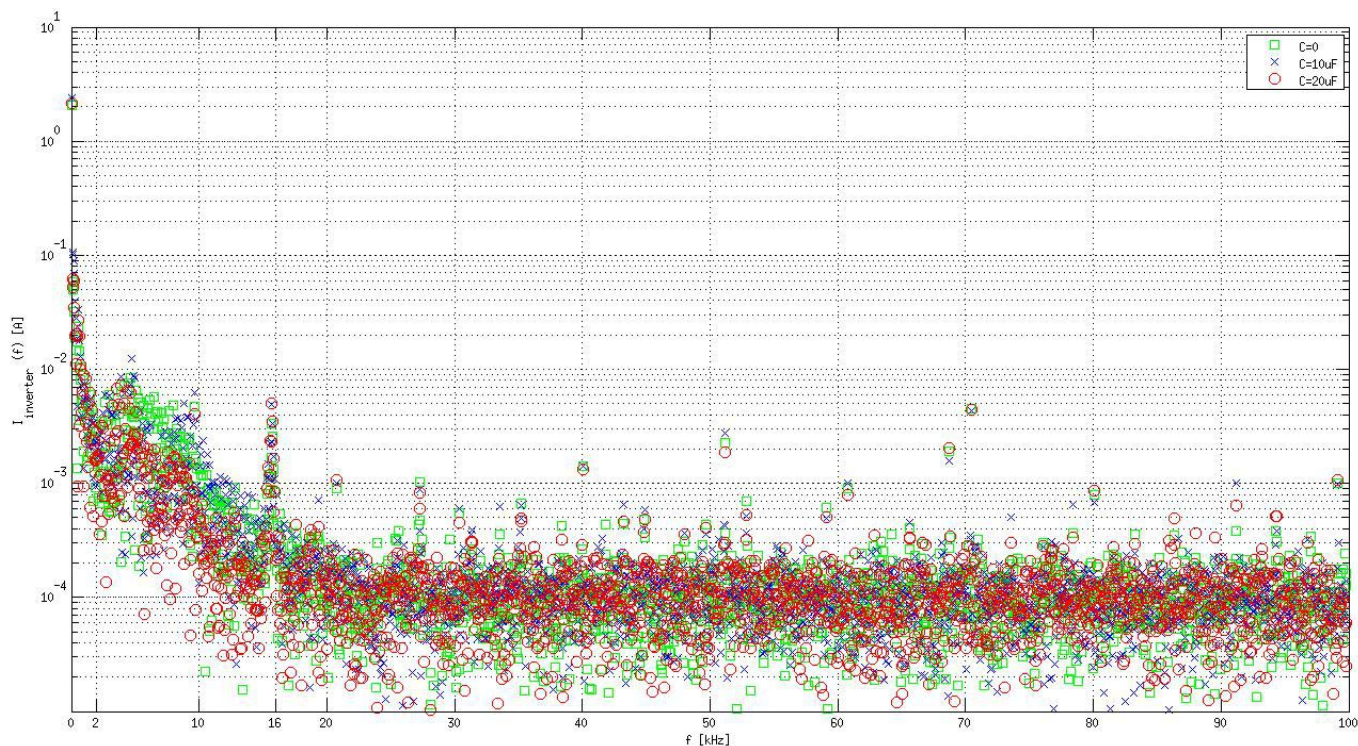
Η αντίσταση του δικτύου επηρεάζει τις εκπομπές αρμονικών από τους αντιστροφείς. Στην επόμενη εικόνα παριστάνεται αντιστροφέας με το φίλτρο εξόδου του (LC) συνδεδεμένος στο δίκτυο. Το δίκτυο αναπαρίσταται μόνο από την αντίσταση δικτύου για συχνότητες ανώτερες των 50Hz. Όταν η αντίσταση του δικτύου είναι χαμηλή, μεγαλύτερο μέρος των εκπεμπόμενων αρμονικών ρεύματος εγχέεται στο δίκτυο αντί στον πυκνωτή του φίλτρου εξόδου του^[23]. Έτσι λοιπόν, τοποθετώντας έναν πυκνωτή χωρητικότητας C_1 παράλληλα με τον αντιστροφέα η νέα αντίσταση που θα "αντιλαμβάνεται" ο αντιστροφέας θα είναι $Z_{C1} // Z_G$ όπου Z_G η αντίσταση του δικτύου πριν την τοποθέτηση του πυκνωτή. Η έκφραση της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή $Z_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1}$ δείχνει ότι με την αύξηση της συχνότητας (ω) το μέτρο της αντίστασης θα μειώνεται και επομένως θα μειώνεται και η συνολική αρμονική αντίσταση που "αντιλαμβάνεται" ο αντιστροφέας. Το συμπέρασμα που βγαίνει επομένως με την παράλληλη

σύνδεση του πυκνωτή στον αντιστροφέα είναι ότι μειώνει την αρμονική αντίσταση του δικτύου που αυτός αντιλαμβάνεται και άρα αναμένεται οι εκπεμπόμενες αρμονικές ρεύματος να αυξηθούν.



Εικόνα 5-3: Ο αντιστροφέας με το φίλτρο εξόδου και η αντίσταση του δικτύου^[23]

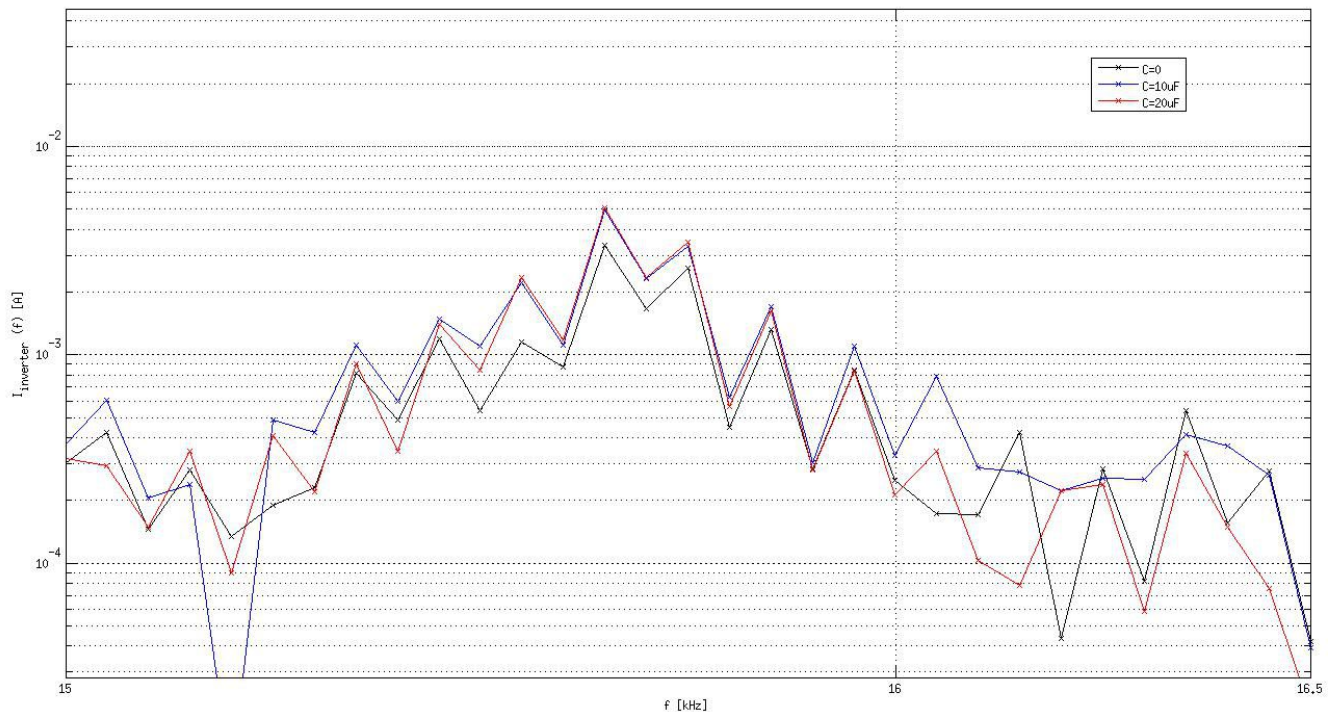
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του πειράματος. Σημειώνεται ότι η μέτρηση των αρμονικών ρεύματος έγινε στην έξοδο του αντιστροφέα και πριν τους πυκνωτές.



Γράφημα 5-24: Μέτρηση αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα πριν και μετά τη σύνδεση πυκνωτών

Αρχικά η χωρητικότητα του πυκνωτή που συνδέθηκε παράλληλα με τον

αντιστροφέα ήταν $10\mu\text{F}$, ενώ στην συνέχεια προστέθηκε πυκνωτής ίδιας χωρητικότητας παράλληλα, με αποτέλεσμα η ισοδύναμη χωρητικότητα να προκύπτει $20\mu\text{F}$. Παρατηρείται ότι σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10kHz οι εκπεμπόμενες αρμονικές ρεύματος είναι υψηλότερου πλάτους μετά την σύνδεση των πυκνωτών σε σχέση με τις αρμονικές πριν τη σύνδεση. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στο επόμενο γράφημα που αποτελεί μεγέθυνση του προηγούμενου στις συχνότητες από 15kHz έως 16.5kHz .



Γράφημα 5-25: Λεπτομέρεια γραφήματος 5-22 κοντά στη συχνότητα 16kHz

5.6 Μετατροπέας AC/DC/AC ως προσομοιωτής δικτύου

Η πηγή αυτή αποτελείται από μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και μία ισχυρή μονάδα επεξεργασίας που αγοράστηκε από την εταιρεία Triphase^[24]. Ο μετατροπέας προγραμματίζεται πλήρως στο λογισμικό Matlab/Simulink και παρέχει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης δοκιμής αλγορίθμων ελέγχου σε σταθερό hardware. Η μονάδα επεξεργασίας είναι ένας διακομιστής (server) Linux που αλληλεπιδρά με τον μετατροπέα, δέχεται εντολές από τον χρήστη και συλλέγει δεδομένα που ζητάει ο χρήστης, όπως μετρήσεις ρεύματος και τάσης. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει έναν αλγόριθμο ελέγχου στο λογισμικό Matlab/Simulink και να το "φορτώσει" στην μονάδα επεξεργασίας. Έτσι, συνδέεται ο υπολογιστής του χρήστη με την μονάδα επεξεργασίας ώστε να γίνεται έλεγχος του μετατροπέα από τον χρήστη σε πραγματικό χρόνο^[25]. Ένα Field-Programmable Gate Array (FPGA) στέλνει τους PWM παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία (IGBTs). Επιπλέον, είσοδοι/έξοδοι με A/D (analog to digital) και D/A (digital to analog) μετατροπείς χρησιμοποιούνται για να είναι εφικτή η ανταλλαγή σημάτων

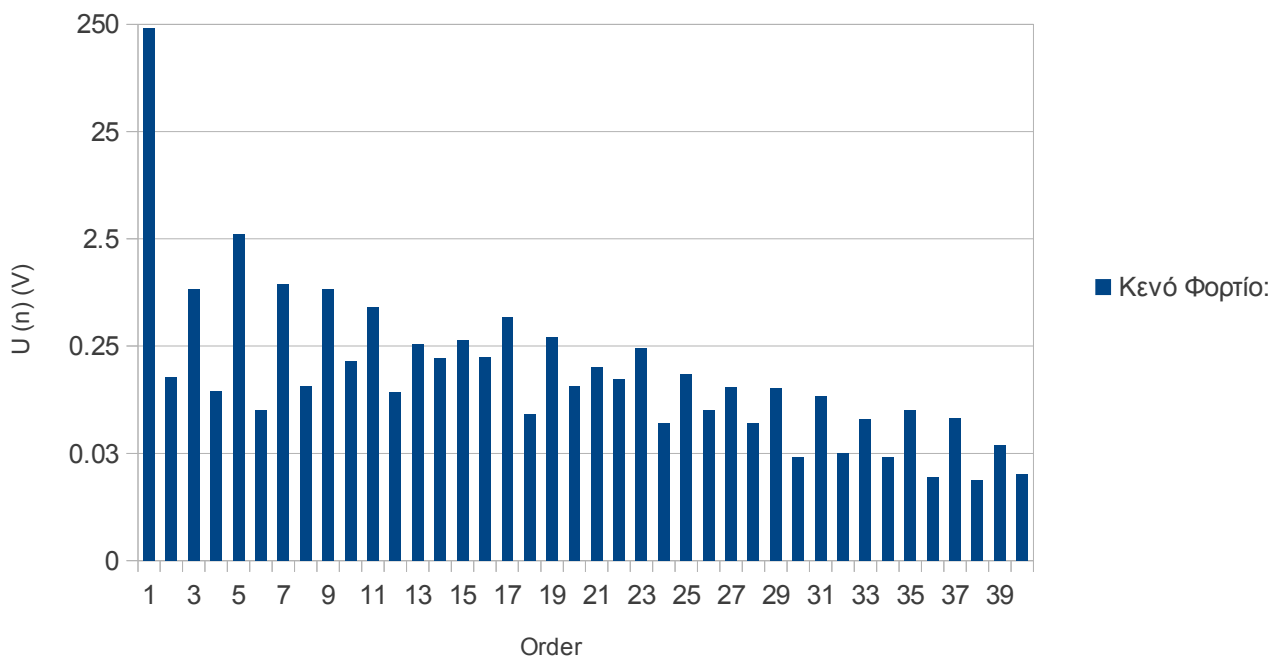
με το περιβάλλον^[39].

Η πηγή τάσης είναι ένας μονοφασικός AC/DC/AC μετατροπέας ο οποίος από την μία πλευρά συνδέεται στο δίκτυο και από την άλλη λειτουργεί σαν AC πηγή ελεγχόμενης τάσης και συχνότητας. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας αποτελείται από τρεις αντί για τέσσερις ημι-γέφυρες. Η διάταξη αυτή έχει προταθεί στην βιβλιογραφία^[26] και ουσιαστικά πρόκειται για μετατροπή ενός τριφασικού DC/AC αντιστροφέα σε μονοφασικό AC/DC/AC μετατροπέα. Κοινός ουδέτερος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση στο δίκτυο και για την λειτουργία ως πηγή AC τάσης. Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει χαμηλότερο κόστος και έχει μικρότερο μέγεθος από έναν συμβατικό μονοφασικό AC/DC/AC μετατροπέα με τέσσερις ημι-γέφυρες.

5.6.1 Μετρήσεις αρμονικών μετατροπέα AC/DC/AC σε κενό φορτίο

Στη συνέχεια ακολουθούν οι μετρήσεις των αρμονικών της τάσης του μετατροπέα AC/DC/AC (triphase) σε κενό φορτίο.

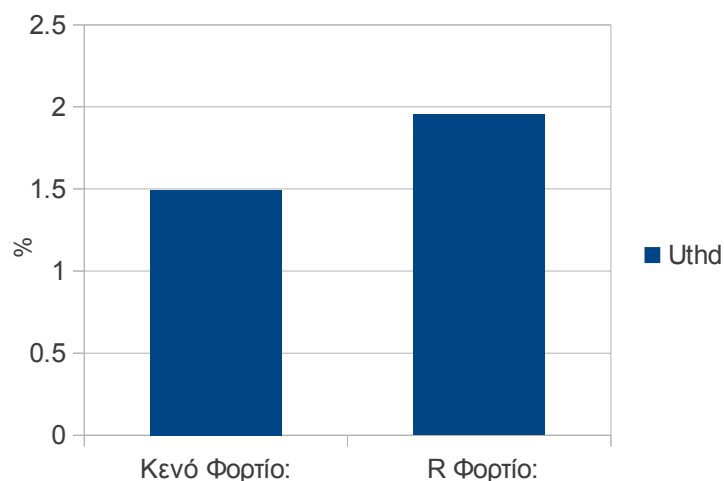
Αρμονικές Τάσης μετατροπέα AC/DC/AC



Γράφημα 5-26: $V_{RMS}=229.7V$, $f=50.01Hz$, $THD_V=1.49\%$

5.6.2 Μετρήσεις αρμονικών μετατροπέα AC/DC/AC με ωμικό φορτίο.

Σε αυτό το πείραμα συνδέθηκε (σε σειρά) αντίσταση 105.8Ω στον triphase. Από τη βιβλιογραφία^[11] αναμένεται ότι η παραμόρφωση της τάσης του αντιστροφέα θα είναι χειρότερη σε κενό φορτίο. Τα πειράματα έδειξαν όμως το αντίθετο όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Γράφημα 5-27: Παραμόρφωση τάσης triphase

Μια πιθανή εξήγηση που ενδεχομένως να ισχύει για το παραπάνω είναι ότι οφείλεται στο εσωτερικό κύκλωμα του μετατροπέα. Με τη ροή ρεύματος (όταν συνδέεται το ωμικό φορτίο) το οποίο έχει αρμονικές συνιστώσες αυξάνονται οι αρμονικές στην τάση στην έξοδο του αντιστροφέα (λόγω εσωτερικής αντίστασης της συνδεσμολογίας) και άρα η παραμόρφωση της τάσης επιδεινώνεται. Επίσης, μια άλλη πιθανή εξήγηση είναι ότι έχει να κάνει με τον αλγόριθμο του triphase που δεν είναι μια απλή πηγή τάσης (πριν το φίλτρο του) αλλά έχει PI ελεγκτές ώστε να παράγεται η επιθυμητή τάση μετά το φίλτρο του.

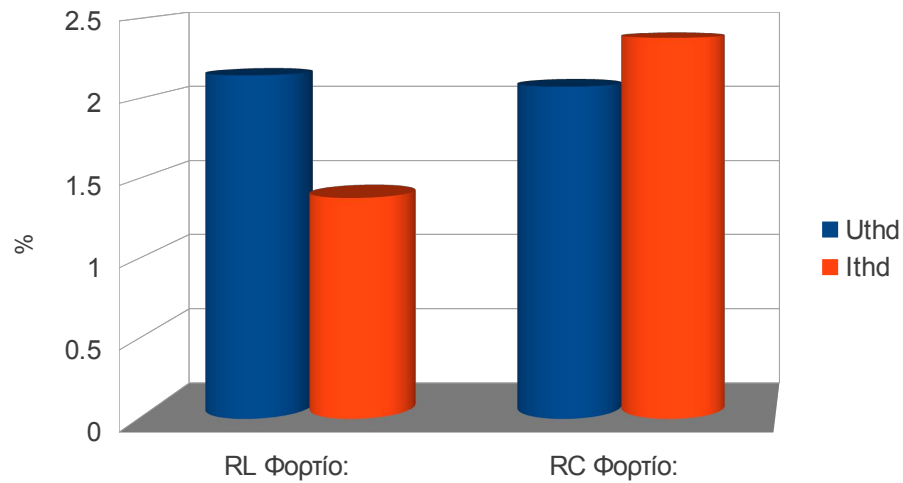
5.6.3 Μετρήσεις αρμονικών μετατροπέα AC/DC/AC με ωμικό-επαγωγικό φορτίο και ωμικό-χωρητικό φορτίο

Στο επόμενο πείραμα συνδέθηκε ο μετατροπέας με ωμικό-επαγωγικό (σε σειρά) και επακόλουθα ωμικό-χωρητικό φορτίο (σε σειρά). Όπως αναμένονταν στο ωμικό-χωρητικό φορτίο το THD του ρεύματος ήταν μεγαλύτερο λόγω της χαμηλότερης σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζει ο πυκνωτής όσο αυξάνεται η συχνότητα σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου η οποία αντίστοιχα μεγαλώνει με την αύξηση της συχνότητας.

Οι τιμές των αντιστάσεων ήταν ίδιες ($R=105.8\Omega$) όπου αυτές χρησιμοποιήθηκαν, ενώ οι τιμές της αυτεπαγωγής ($L=100\text{mH}$) και της χωρητικότητας ($C=60\mu\text{F}$) επιλέχθηκαν έτσι ώστε η ενεργός ισχύς να

παραμένει στα ίδια επίπεδα και φυσικά ανάλογα με τις δυνατότητες που προσέφερε το εργαστήριο.

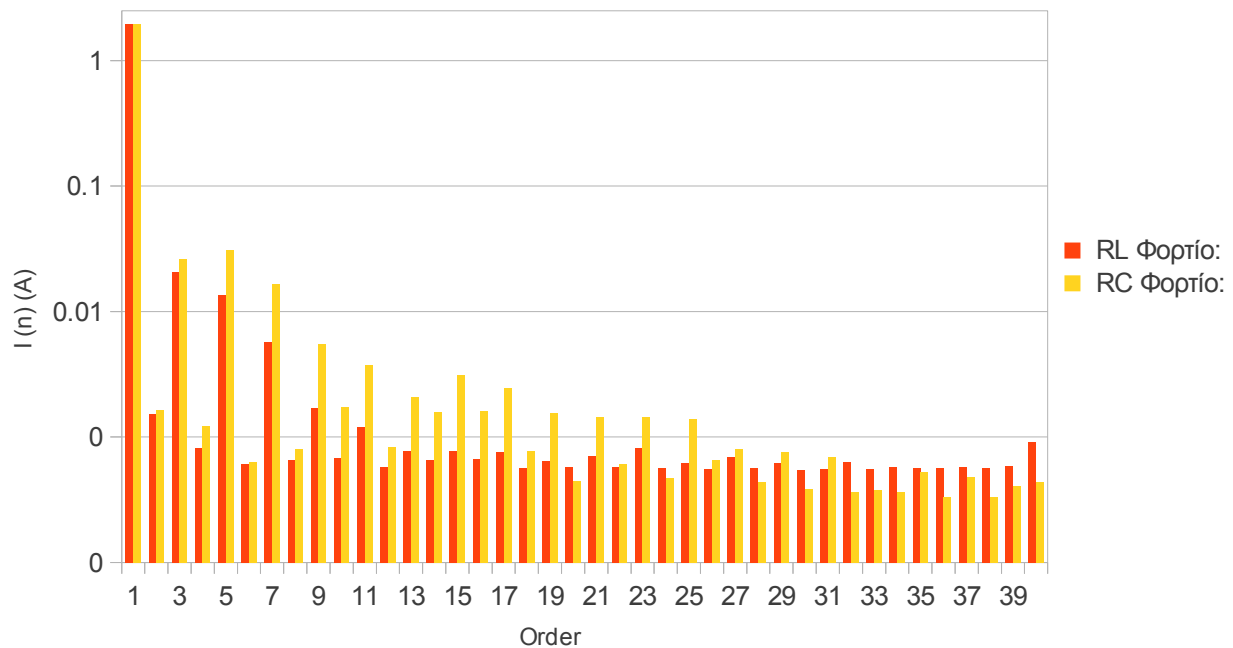
Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο επόμενο διάγραμμα.



Γράφημα 5-28: Παραμόρφωση τάσης και ρεύματος triphase

Τέλος, ακολουθούν τα φάσματα των πλατών των αρμονικών ρεύματος του μετατροπέα για τις ανωτέρω μετρήσεις.

Αρμονικές ρεύματος triphase

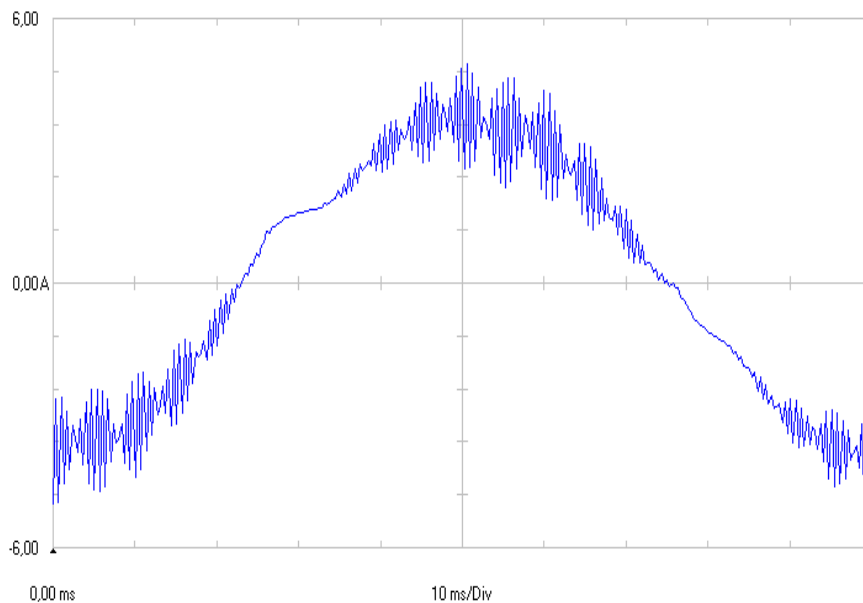


Γράφημα 5-29: Αρμονικές ρεύματος triphase

5.7 Σύνδεση αντιστροφέα σε PWM πηγή τάσης

Εν συνεχεία συνδέθηκε ο Φ/Β αντιστροφέας στον AC/DC/AC μετατροπέα. Κατά το κλείσιμο του διακόπτη που συνδέει τον Φ/Β αντιστροφέα παρατηρήθηκαν αιχμές ρεύματος (spikes) πλάτους μεταξύ 5 και 15A και διάρκειας 10 με 100 μsec . Η προστασία υπερέντασης του AC/DC/AC μετατροπέα ενεργοποιούταν με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η πραγματοποίηση του πειράματος. Οι αιχμές ρεύματος μειώθηκαν παρεμβάλλοντας μία ωμική αντίσταση 50 Ω σε σειρά μεταξύ του Φ/Β αντιστροφέα και του AC/DC/AC μετατροπέα. Μετά το κλείσιμο του διακόπτη, αλλά πριν ξεκινήσει ο Φ/Β μετατροπέας να παρέχει ισχύ, η αντίσταση παρακάμπτεται (by-pass μέσω ενός άλλου διακόπτη), οπότε το πείραμα εκτελείται κανονικά.

Επειτα όταν ο Φ/Β αντιστροφέας Sunny Boy έδινε ισχύ στον AC/DC/AC μετατροπέα το ρεύμα παρουσίαζε ταλαντώσεις όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το THD του ρεύματος μετρήθηκε με τον αναλυτή ισχύος και βρέθηκε 8% (ενώ όταν ο Φ/Β μετατροπέας ήταν συνδεδεμένος στο δίκτυο χαμηλής τάσης το THD ήταν χαμηλότερο του 3%). Το πρόβλημα αυτό οφειλόταν στο γεγονός πως ο εμπορικός Φ/Β μετατροπέας είναι κατασκευασμένος για να συνδέεται στο δίκτυο και όχι σε "τυχαίο" ηλεκτρονικό μετατροπέα με αποτέλεσμα να "εμπλέκονται" οι αλγόριθμοι ελέγχου των 2 μετατροπέων. Το πρόβλημα λύθηκε τοποθετώντας μία επιπλέον αυτεπαγωγή στο φίλτρο εξόδου του AC/DC/AC μετατροπέα, δηλαδή μετατρέποντας το L-C φίλτρο σε L-C-L φίλτρο.

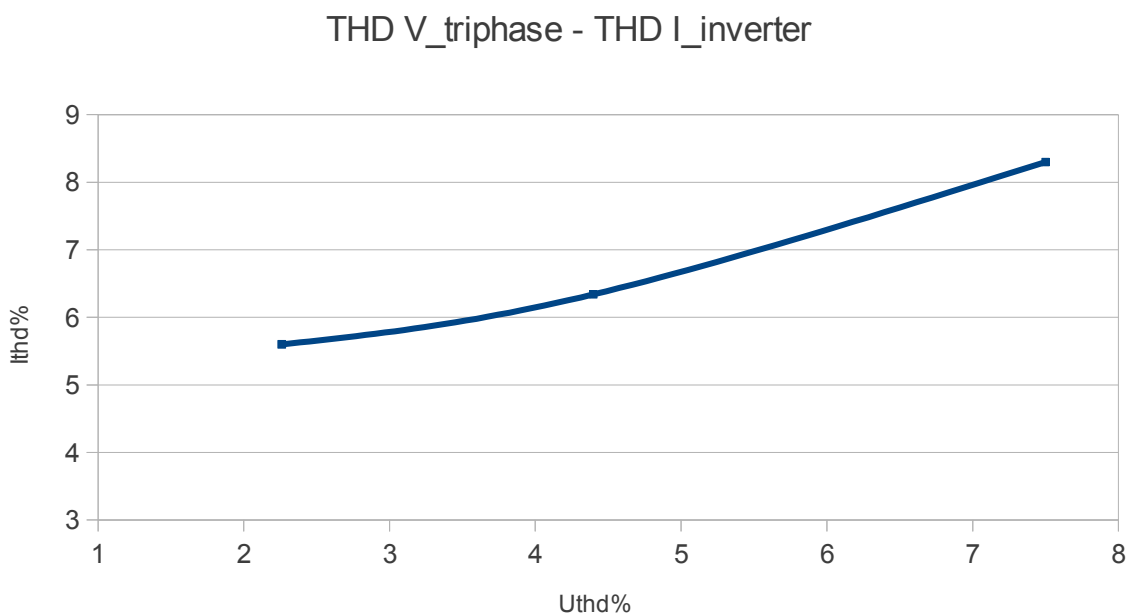


Γράφημα 5-30: Ταλαντώσεις που παρουσιάστηκαν αρχικά στο ρεύμα του Φ/Β αντιστροφέα κατά τη σύνδεσή του στον AC/DC/AC μετατροπέα

5.7.1 Διερεύνηση της εξάρτησης της παραμόρφωση της τάσης από τη παραμόρφωση του ρεύματος

Εν συνεχεία, τροποποιήθηκε κατάλληλα ο αλγόριθμος ελέγχου του AC/DC/AC μετατροπέα με σκοπό την ελεγχόμενη παραμόρφωση της τάσης. Για να επιτευχθεί αυτό εισήχθησαν αρμονικές τάσης στην έξοδο του. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκε ένα τέτοιο πείραμα είναι η διερεύνηση της εξάρτησης που υπάρχει μεταξύ της παραμόρφωσης του ρεύματος εξόδου ενός αντιστροφέα από την παραμόρφωση της τάσης του δικτύου^[27].

Πράγματι τα αποτελέσματα του πειράματος (επόμενο σχεδιάγραμμα) δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση της τάσης που ανιχνεύει ο Φ/Β αντιστροφέας, τόσο αυξάνεται και η παραμόρφωση του ρεύματος που θα παράγει. Αυτό συμβαίνει γιατί ο Φ/Β αντιστροφέας λαμβάνει ως είσοδο την τάση στους ακροδέκτες του για την υλοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου του. Οπότε, η παραμόρφωση της τάσης επηρεάζει τον έλεγχό του και οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση των αρμονικών ρεύματος.



Γράφημα 5-31: Η αύξηση της παραμόρφωσης που ανιχνεύει ο Φ/Β αντιστροφέας οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης του ρεύματός τους

5.8 Μέτρηση φασικών γωνιών αρμονικών αντιστροφών συνδεδεμένων σε διαφορετικές φάσεις

Σκοπός αυτής της σειράς πειραμάτων είναι η παρακολούθηση της κατανομής των φασικών γωνιών ενός αντιστροφέα και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συσχέτιση με τις γωνίες κάποιου άλλου αντιστροφέα, συνδεδεμένου σε διαφορετικό σημείο του δικτύου (ή διαφορετική φάση στην προκειμένη περίπτωση).

Οι δύο όμοιοι αντιστροφείς που μετρήθηκαν είναι το μοντέλο SolarStar a6000 της γερμανικής εταιρίας Würth και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα^[28]:

- Ονομαστική ισχύς, P_{nom} : 4600 Wp
- Μέγιστη ισχύς, P_{max} : 6600 Wp
- Μέγιστη dc τάση, V_{max} : 600 V
- Μέγιστο dc ρεύμα, I_{max} : 22 A
- "Παράθυρο τάσης", για την επίτευξη αποτελεσματικού MPPT: 100 - 550 Volt
- Απόδοση: 96,2%
- Εύρος συχνοτήτων για την σωστή λειτουργία του αντιστροφέα : 45 έως 55 Hz
- Θερμοκρασία λειτουργίας : -20°C έως 60°C .

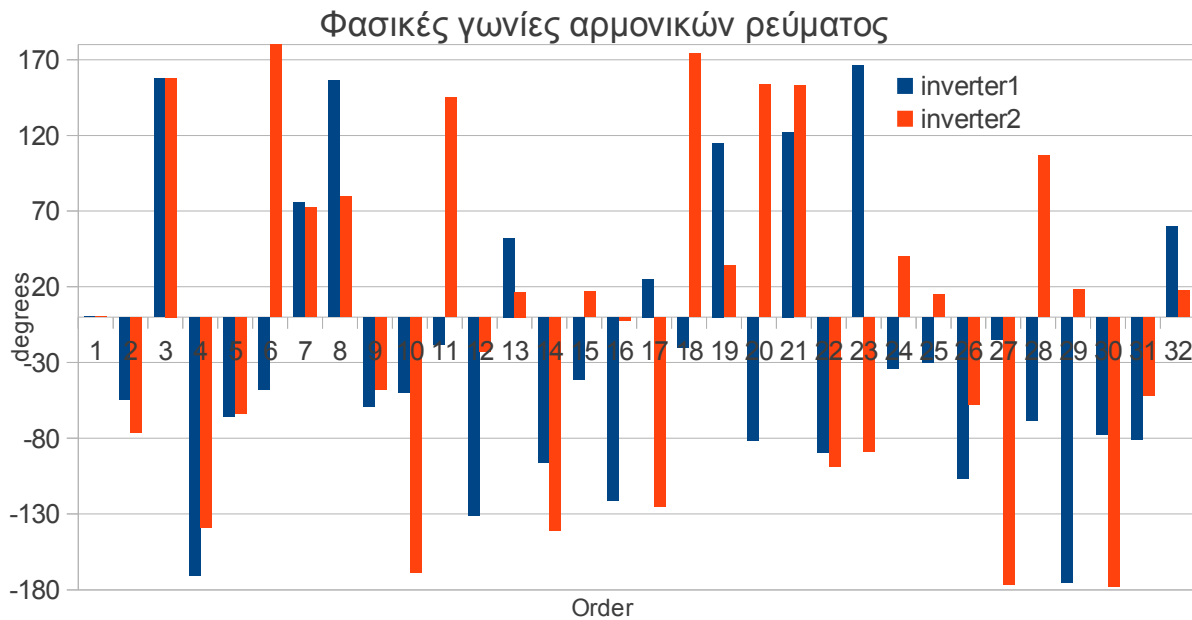
Οι αντιστροφείς είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικές φάσεις του τριφασικού δικτύου χαμηλής τάσης και ο πρώτος τροφοδοτείται από συστοιχία Φ/Β μέγιστης ισχύος 4290W ενώ ο δεύτερος αντίστοιχα από 3960W . Όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 5.4, υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των εκπεμπόμενων αρμονικών ενός αντιστροφέα και της ισχύος που αυτός αποδίδει, σε αυτή την περίπτωση όμως, η διαφορά μεταξύ των ισχύων που τροφοδοτεί κάθε Φ/Β συστοιχία σε κάθε αντιστροφέα είναι πολύ μικρή και δεν αναμένεται να οδηγήσει τους αντιστροφείς σε διαφορετικές συμπεριφορές. Η παραμόρφωση της τάσης στα σημεία σύνδεσης των δύο αντιστροφέων ήταν στα ίδια επίπεδα (χωρίς τη σύνδεση των Φ/Β αντιστροφέων). Τέλος, το πείραμα διεξάχθηκε δύο φορές και οι κυματομορφές καταγράφονταν μέσα σε συνολικό διάστημα μισής ώρας.

Κατά την πειραματική διαδικασία καταγράφηκαν οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος καθενός από τους δύο αντιστροφείς όταν:

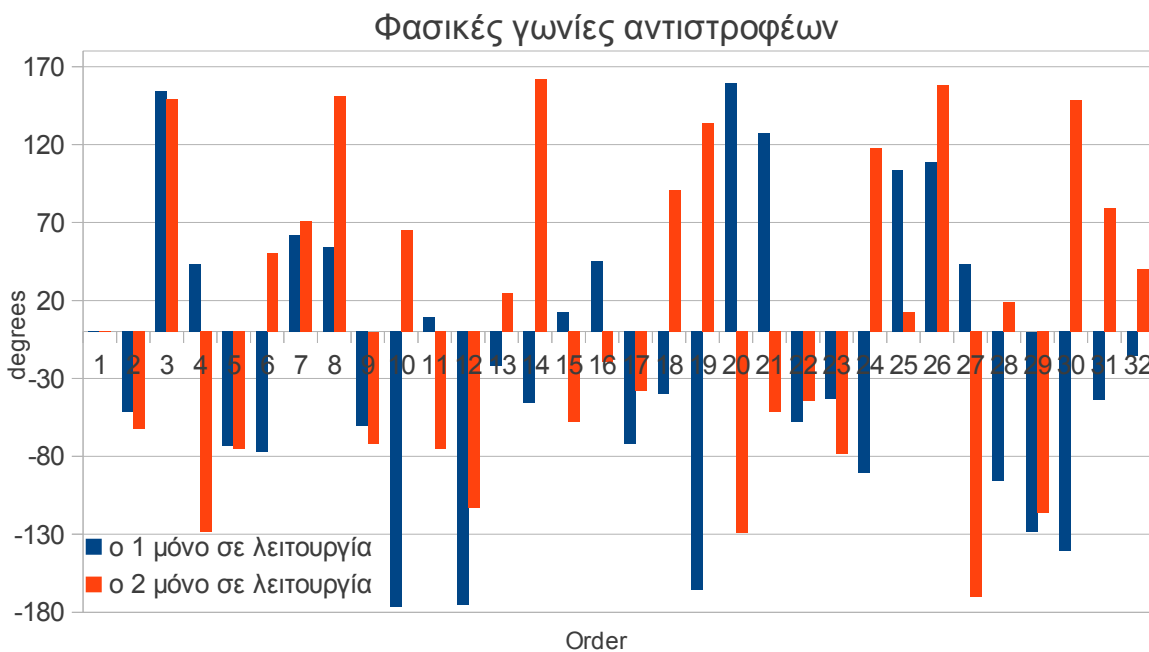
- 1.Βρίσκονταν και οι δύο σε λειτουργία
- 2.Βρίσκονταν μόνο ο πρώτος σε λειτουργία
- 3.Βρίσκονταν μόνο ο δεύτερος σε λειτουργία
- 4.Βρίσκονταν και οι δύο εκτός λειτουργίας

Στη συνέχεια επεξεργάστηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος (που λήφθηκαν από παλμογράφο της εταιρίας Tektronix) και έγινε μαθηματικά η εξαγωγή των πλατών και των φασικών γωνιών των αρμονικών τους. Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα της σύγκρισης μεταξύ των φασικών

γωνιών έγινε αναγωγή των φασικών γωνιών του ρεύματος ως προς τη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος κάθε αντιστροφέα. Η αρχική φάση της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος αφαιρέθηκε δηλαδή από κάθε συνιστώσα για να είναι δυνατή η σύγκριση. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στα επόμενα γραφήματα.

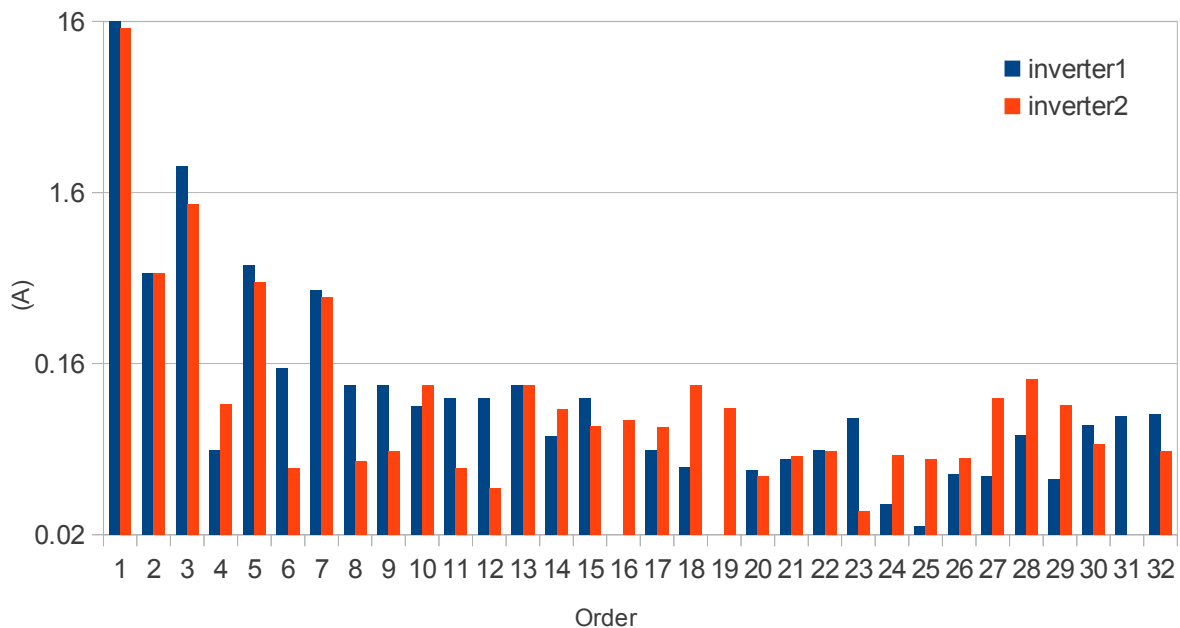


Γράφημα 5-32: Και οι δύο αντιστροφείς σε λειτουργία



Γράφημα 5-33: Διαδοχικά ο κάθε αντιστροφέας τίθεται εκτός λειτουργίας και μετράται ο άλλος

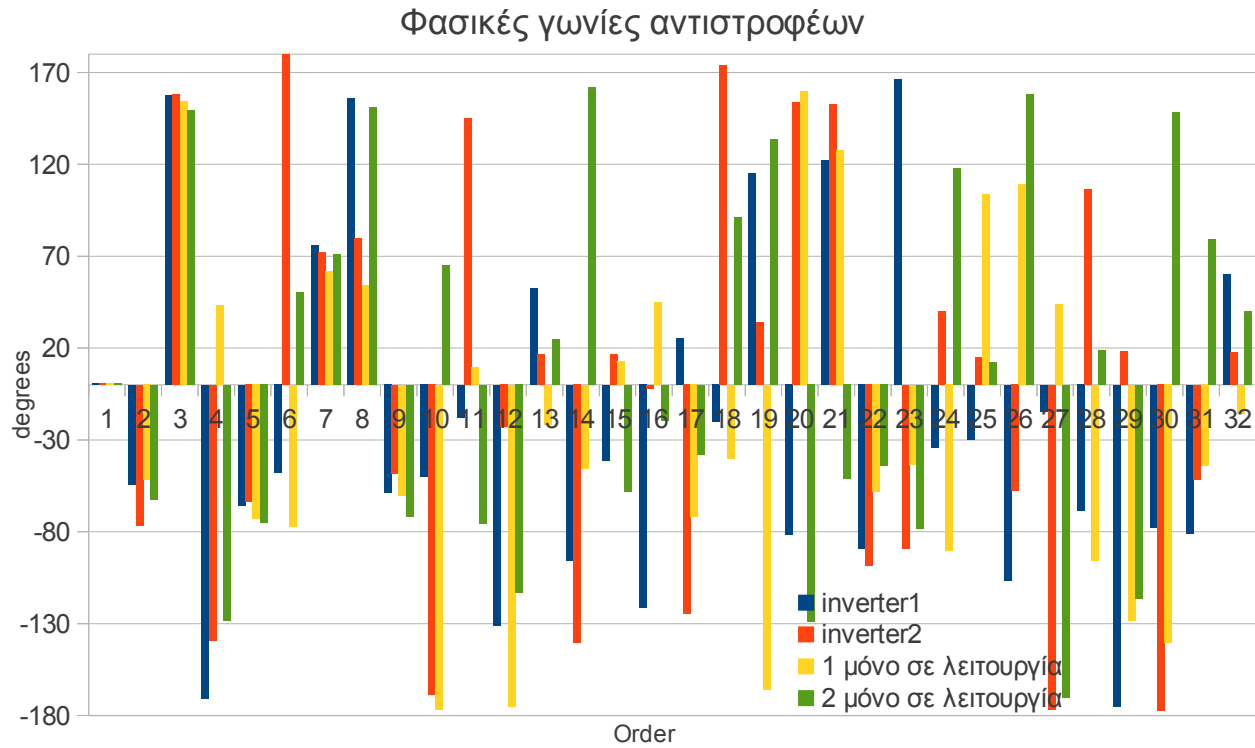
Στο γράφημα 5-32 παρατηρήθηκε ότι για κάποιες τάξεις αρμονικών (2,3,5,7,...) οι φασικές γωνίες είναι πολύ κοντινές (διαφέρουν λιγότερο από 10 μοίρες), ενώ για άλλες τάξεις (4,6,8,10,...) απέχουν αρκετά ή ακόμη καταλήγουν να είναι αντίθετες. Πρέπει να αναφερθεί όμως ότι οι πρώτες είναι και οι πιο "σημαντικές", αυτές δηλαδή που έχουν τα μεγαλύτερα πλάτη από το σύνολο των αρμονικών που απεικονίζονται (γράφημα 5-34). Ένα πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να βγει επομένως είναι ότι: υπάρχει κάποια δυναμική μεταβολή στις κατανομές των φασικών γωνιών των αρμονικών ρεύματος αντιστροφών ίδιων χαρακτηριστικών που λειτουργούν σε ίδια ισχύ, αλλά τουλάχιστον οι πρώτες πέντε πιο μεγάλου πλάτους αρμονικές εμφανίζουν σταθερή κατανομή στις φασικές τους γωνίες.



Γράφημα 5-34: Πλάτη αρμονικών αντιστροφών

Από το γράφημα 5-33, με την ίδια συλλογιστική προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα. Οι τάξεις εκείνες που αντιστοιχούν στις αρμονικές με τα μεγαλύτερα πλάτη τείνουν να διατηρούν τις φασικές γωνίες του σε κοντινές τιμές.

Σίγουρα υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις αλλά όσα ειπώθηκαν για την προηγούμενη περίπτωση ισχύουν και σε αυτή. Το επόμενο γράφημα συνδυάζει τα δύο γραφήματα 5-32 και 5-33 για την ενίσχυση αυτού του συμπεράσματος.

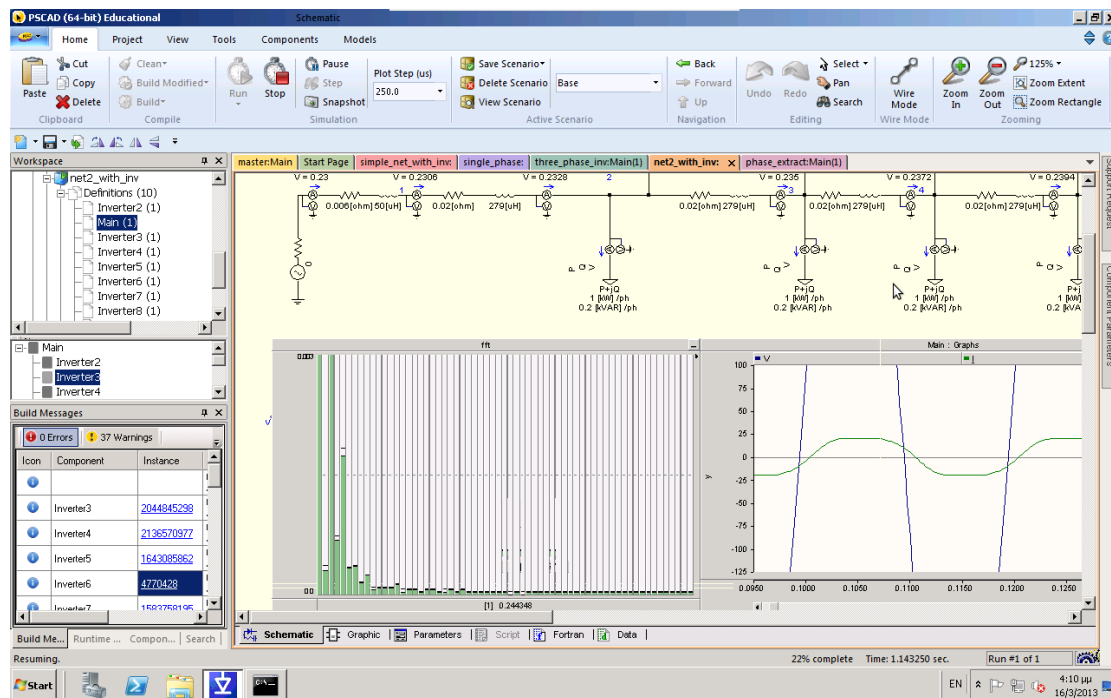


Γράφημα 5-35: Συνδυασμός των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων για την σύγκριση των γωνιών

6. Προσομοίωση αρμονικών σε Η/Υ με το λογισμικό PSCAD/EMTDC

6.1 Το λογισμικό PSCAD/EMTDC

Το λογισμικό PSCAD (Power System Computer Aided Design/ electromagnetic transients for DC) δημιουργήθηκε από την εταιρία Manitoba HVDC Research Centre^[29], για προσομοιώσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να "σχεδιάσει" το σύστημα που τον ενδιαφέρει να μελετήσει, χρησιμοποιώντας ήδη μοντελοποιημένα στοιχεία ηλεκτρικών κυκλωμάτων (ή ακόμη και να μοντελοποιήσει τα δικά του), στη συνέχεια να το προσομοιώσει και τέλος να διεξάγει μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών και να τις παρουσιάσει σε γραφήματα ή να τις αποθηκεύσει σε αρχεία για περαιτέρω ανάλυσή τους. Έχει ακόμη τη δυνατότητα να εισάγει δεδομένα που έχουν εξαχθεί από μετρήσεις σε πραγματικό ηλεκτρικό δίκτυο και να τα χρησιμοποιήσει στις προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις διεξάγονται στο πεδίο του χρόνου υπολογίζοντας τις στιγμιαίες τιμές όλων των ηλεκτρικών μεγεθών που ενδιαφέρουν τον χρήστη. Οι μετρήσεις γίνονται με πολύ παρόμοιο τρόπο με αυτόν που γίνονται πραγματικές μετρήσεις σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η μέτρηση των RMS τιμών και ο υπολογισμός του FFT (Fast Fourier Transform) από τους αναλυτές φάσματος^[30]. Το εργαλείο προσομοίωσης PSCAD μπορεί να υπολογίσει ως εκ τούτου, την απόκριση ενός συστήματος που διαθέτει ηλεκτρονικά ισχύος σε όλες τις συχνότητες και αυτό το καθιστά ικανό για προσομοιώσεις που σχετίζονται με τη λεπτομερή μελέτη προβλημάτων ισχύος.



Εικόνα 6-1: Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού PSCAD

Τα ηλεκτρικά μεγέθη (τάση, ρεύμα) μπορούν ακόμη να παρασταθούν και ως παραστατικοί μιγαδικοί αριθμοί (phasors) εάν το επιθυμεί ο χρήστης. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του χρονικού βήματος υπολογισμού της απόκρισης του συστήματος (μπορεί να κυμαίνεται από νανοδευτερόλεπτα έως δευτερόλεπτα). Σε σύγκριση με άλλα λογισμικά προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων, όπως το Pspice, το PSCAD εξειδικεύεται στην προσομοίωση των συστημάτων ενέργειας και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος.

6.2 Μέθοδοι προσομοίωσης αρμονικών

Οι αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξάπλωσης των αρμονικών διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίον μοντελοποιούνται οι πηγές αρμονικών και οι σύνθετες αντιστάσεις του συστήματος.

Οι **επαναληπτικές μέθοδοι** (π.χ. μέθοδοι ροής φορτίου για τον υπολογισμό των αρμονικών) αναπαριστούν τις αρμονικές με διανυσματικές παραμέτρους. Οι **μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου** από την άλλη (time domain methods), αναπαριστούν τα στοιχεία του συστήματος και τις πηγές των αρμονικών στο πεδίο του χρόνου και είναι γενικά πιο ακριβείς από τις επαναληπτικές μεθόδους^[31].

Ο απλούστερος τρόπος για την μοντελοποίηση των αρμονικών πηγών σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι η θεώρηση σταθερών (αμετάβλητων) αρμονικών πηγών και γραμμικές σύνθετες αντιστάσεις στο δίκτυο^[14]. Μια σταθερή αρμονική πηγή παράγει αρμονικές ρεύματος σταθερού πλάτους και φασικών γωνιών. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να λυθεί με επαναληπτικές μεθόδους με τη ίδια ακρίβεια όπως και με προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου επειδή είναι γραμμικό και η αρχή της επαλληλίας μπορεί να εφαρμοστεί (αφού κάθε αρμονική συνιστώσα έχει διανυσματικά χαρακτηριστικά).

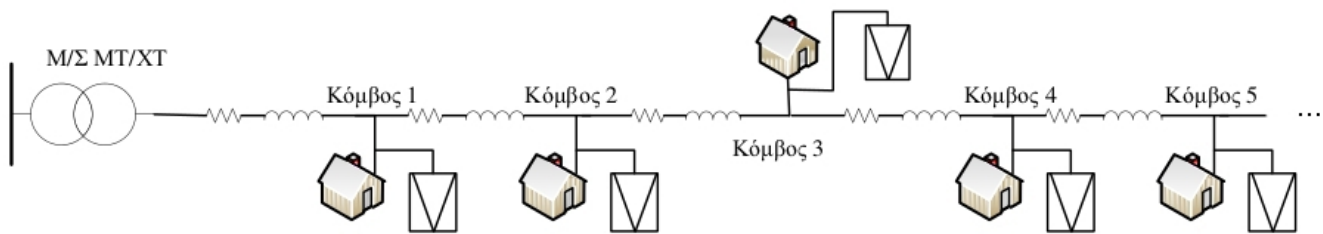
Εάν όμως υπάρχουν μη-γραμμικά και χρονικά μεταβαλλόμενα στοιχεία στο μοντέλο του συστήματος τα οποία μοντελοποιούνται ως σταθερά, μπορεί να αλλάξει σημαντικά ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι αρμονικές ρεύματος και τάσης και τα αποτελέσματα να μη είναι ρεαλιστικά. Σε αυτή την περίπτωση μια πιο σωστή προσέγγιση θα επιτευχθεί με μια πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση των στοιχείων αυτών.

Ο σκοπός των αρμονικών μελετών είναι η αποτίμηση της παραμόρφωσης της τάσης (και του ρεύματος δευτερευόντως) σε διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε εάν η παραμόρφωση είναι πολύ μεγάλη (εάν δηλαδή βγαίνει εκτός των καθορισμένων ορίων) να παρθούν μέτρα για την μείωσή της. Η αναγκαιότητα για διεξαγωγή αρμονικών μελετών σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα προκύπτει εάν γίνουν μετρήσεις και διαπιστωθεί ότι η παραμόρφωση είναι αυξημένη ή εφόσον πρόκειται να εγκατασταθεί στο δίκτυο εξοπλισμός που είναι γνωστό ότι έχει σημαντικές εκπομπές αρμονικών.

6.2.1 Μοντελοποίηση δικτύων χαμηλής τάσης

Για την μοντελοποίηση των δικτύων χαμηλής τάσης που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις λαμβάνονται υπόψιν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Το σημείο σύνδεσης του υπό μελέτη δικτύου με τη μέση τάση, το οποίο μοντελοποιείται από μία πηγή τάσης σε σειρά με μία σύνθετη αντίσταση η οποία αντιστοιχεί στην ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου σε εκείνο το σημείο^[32].
- Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού από την μέση τάση στην χαμηλή.
- Οι γραμμές διανομής πάνω στις οποίες συνδέονται οι καταναλωτές χαμηλής τάσης
- Τα φορτία (οι καταναλωτές χαμηλής τάσης ή αλλιώς, οι οικίες που συνδέονται σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης)
- Ο εξοπλισμός που δημιουργεί αρμονικές (οι αρμονικές πηγές)



Εικόνα 6-2: Αναπαράσταση ενός δικτύου χαμηλής τάσης

Το τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης θα μοντελοποιηθεί από το μονοφασικό ισοδύναμό του, αφού θα θεωρηθεί συμμετρικό και δεν συντρέχουν άλλοι λόγοι για μία τριφασική υλοποίηση στην συγκεκριμένη μελέτη^[14]. Τέτοιοι λόγοι για τους οποίους θα επιβάλλονταν μια τριφασική υλοποίηση είναι οι ακόλουθοι:

- Εάν ενδιαφέρουν οι παρεμβολές στο τηλεφωνικό δίκτυο.
- Όταν υπάρχουν μονοφασικοί πυκνωτές αντιστάθμισης στο δίκτυο.
- Όταν υπάρχουν ασύμμετρες τριφασικές πηγές αρμονικών.
- Όταν υπάρχουν τριφασικές πηγές αρμονικών που δημιουργούν αρμονικές τάσης τρίτης τάξης.

Ο εξοπλισμός που αποτελεί την πηγή των αρμονικών είναι ουσιαστικά οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς και η εν λόγω μελέτη αρμονικών έχει να κάνει με το κατά πόσο μια υψηλή διείσδυση τέτοιων αντιστροφέων θα δημιουργήσει πρόβλημα στο δίκτυο χαμηλής τάσης (όσον αφορά στην παραμόρφωσή της).

Σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση ΦΕΚ /1079/Β/04.06.2009^[38] παρέχεται η δυνατότητα εγκατάστασης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων ισχύος

μέχρι 10kW σε κτιριακές εγκαταστάσεις και κυρίως σε δώματα και στέγες κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων των στεγάστρων βεραντών κτιρίων που χρησιμοποιούνται για κατοικία ή στέγαση πολύ μικρών επιχειρήσεων. Το πρόγραμμα εφαρμόζεται σε όλη την Επικράτεια με εξαίρεση τα μη Διασυνδεδεμένα νησιά με το ηπειρωτικό Σύστημα της χώρας.

Επίσης η ΔΕΗ υπαγορεύει ότι: τα συστήματα ισχύος μέχρι 5kWp συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω μονοφασικής παροχής. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μονοφασικός αντιστροφέας αντίστοιχος με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για συστήματα άνω των 5kWp και έως 10kWp η ΔΕΗ προδιαγράφει σύνδεση μέσω τριφασικής παροχής^[34]. Σε τέτοια εγκατάσταση απαιτείται η χρήση ενός τριφασικού αντιστροφέα αντίστοιχου με την συνολική ισχύ του συστήματος, ή τρεις μονοφασικούς αντιστροφείς για κάθε μία από τις τρεις φάσεις.

Επομένως οι αντιστροφείς που θα μοντελοποιηθούν θα είναι μονοφασικοί (οι μονοφασικοί ισοδύναμοι ενός τριφασικού) εφόσον γίνεται μελέτη σε μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα. Επίσης όσον αφορά στη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος θα είναι πάντα συμφασική με την τάση στο σημείο σύνδεσης αφού μέχρι στιγμής στη χαμηλή τάση οι Φ/Β αντιστροφείς λειτουργούν με $\cos\phi_1 \approx 1$.

Τα δίκτυα που θα μελετηθούν και θα προσομοιωθούν είναι απλουστευμένα ακτινικά δίκτυα. Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η διερεύνηση της παραμόρφωσης της τάσης σε ένα δίκτυο XT το οποίο παρουσιάζει υψηλή διείδυση φωτοβολταϊκών. Στις αγροτικές περιοχές οι αποστάσεις μεταξύ των οικιών είναι μεγαλύτερες σε σχέση με των αστικών (που οδηγεί σε μεγαλύτερες σύνθετες αντιστάσεις γραμμών), με αποτέλεσμα σε ένα τέτοιο δίκτυο να είναι πιο πιθανή μια παραβίαση των ορίων παραμόρφωσης της τάσης.

6.2.2 Μοντελοποίηση του Μ/Σ υποβιβασμού και της σύνδεσης με το δίκτυο τροφοδοσίας

Το δίκτυο τροφοδοσίας MT αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και μια σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου MT. Η πολική τάση είναι 400V

Η ισχύς βραχυκύκλωσης θα θεωρηθεί 100MVA^[33] άρα:

$$X_s = \frac{(400V)^2}{100 \cdot 10^6 VA} = 0.0016\Omega \quad R_s = 0.1 \cdot X_s = 0.00016\Omega \Rightarrow L_s = 0.509\mu H$$

Ο Μ/Σ έχει ονομαστική ισχύ 250KVA και τάση βραχυκύκλωσης $u=4\%$:

$$Z_{M/\Sigma} = 0.04 \cdot \frac{(400V)^2}{250 \cdot 10^3 VA} = 0.0256\Omega, \text{ η σχετική ωμική τάση βραχυκύκλωσης είναι}$$

$$u_x = 1.3\%$$

$$\text{άρα: } R_{M/\Sigma} = 0.013 \cdot \frac{(400V)^2}{250 \cdot 10^3 VA} = 0.00832\Omega \text{ και } X_{M/\Sigma} = \sqrt{0.0256^2 - 0.00832^2} = 0.0242\Omega$$

$$\Rightarrow L_{M/\Sigma} = \frac{X_{M/\Sigma}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 77.06\mu H$$

6.2.3 Μοντελοποίηση των γραμμών

Εναέρια δίκτυα Χαμηλής τάσης^[41]

Η διαμόρφωση των εναερίων δικτύων ΧΤ, είτε αυτά κατασκευάζονται με γυμνούς ή με μονωμένους αγωγούς, είναι απλούστερη των υπογείων, κατά γενικό όμως κανόνα δεν προβλέπονται δυνατότητες διπλών τροφοδοτήσεων.

Χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερες της μίας διατομές αγωγών, συχνά όμως, ιδίως στις αγροτικές περιοχές, οι γραμμές μπορούν να μην είναι τριφασικές, αλλά μονοφασικές (μία φάση και ουδέτερος).

Οι τυποποιημένη τάση λειτουργίας των δικτύων διανομής ΧΤ είναι τα 400/230V. Γίνεται η χρήση των εξής τυποποιημένων ειδών αγωγών και μεγεθών διατομών:

Γυμνοί αγωγοί:

- Αγωγοί Al: 16mm², 35mm², 50mm² (ισοδύναμες διατομές χαλκού)
- Αγωγοί Cu: 16mm², 35mm², 50mm²

Συνεστραμμένα καλώδια (θωρακισμένου τύπου):

- 3x15mm² Al + 54.6mm² AAAC
- 3x70mm² Al + 54.6mm² Al

Ακολουθούν οι πίνακες με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αγωγών αλουμινίου (Al) που χρησιμοποιούνται για τα εναέρια δίκτυα ΧΤ και θα μοντελοποιηθούν στις επόμενες προσομοιώσεις:

Είδος αγωγού	Πραγματική διατομή αγωγών (mm ²)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση	
				(A)	KVA τριφασικά
4x16	27	1.218	0.318	145	100
4x35	57	0.574	0.294	232	161
4x50	82	0.397	0.279	295	204

Στο δίκτυο που θα μελετηθεί θα χρησιμοποιηθούν γυμνοί αγωγοί αλουμινίου 4x50mm², και το μήκος των γραμμών θα είναι 90m. Η σύνθετη αντίσταση κάθε τμήματος γραμμής θα προκύπτει:

$$R=0.0357\Omega, X=0.02511\Omega \\ \Rightarrow L=79.92\mu H$$

6.2.4 Μοντελοποίηση των φορτίων

Το PSCAD διαθέτει από μόνο του μία μοντελοποίηση φορτίου η οποία και χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Για τα φορτία θα θεωρηθούν δύο περιπτώσεις:

1. Περίπτωση μέγιστου φορτίου: P=2.5kW/ph, ΣI=0.9 επαγωγικό

2. Περίπτωση ελάχιστου φορτίου: $P=0\text{kW/ph}$

6.2.5 Μοντελοποίηση των αρμονικών πηγών

Η μοντελοποίηση μιας αρμονικής πηγής έχει τη μορφή μιας πηγής ρεύματος της οποίας το ρεύμα που εγχύεται στο δίκτυο έχει αρμονική παραμόρφωση. Στο PSCAD αυτό το μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί με τους επόμενους τρόπους:

- Πηγές ρεύματος που τροφοδοτούν τον ίδιο κόμβο. Στην κάθε πηγή τίθενται ως παράμετροι το πλάτος, η συχνότητα (ανάλογα με την τάξη της αρμονικής) και η αρχική φάση (σχετική με την θεμελιώδη). Οι παράμετροι αυτοί είναι δυνατόν να προέρχονται είτε από πραγματικές μετρήσεις είτε από μοντέλα αρμονικών πηγών που βρίσκονται στη βιβλιογραφία^[35].
- Πραγματικές κυματομορφές ρεύματος που έχουν μετρηθεί από εξοπλισμό που εισάγει αρμονικές.
- Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος τα οποία διαθέτουν διακοπτικά στοιχεία με αποτέλεσμα το ρεύμα που εγχύουν να έχει αρμονική παραμόρφωση^[31].
- Πλήρης μοντελοποίηση αντιστροφών ή και άλλων ηλεκτρικών διατάξεων που εισάγουν αρμονικές στο δίκτυο^[31].

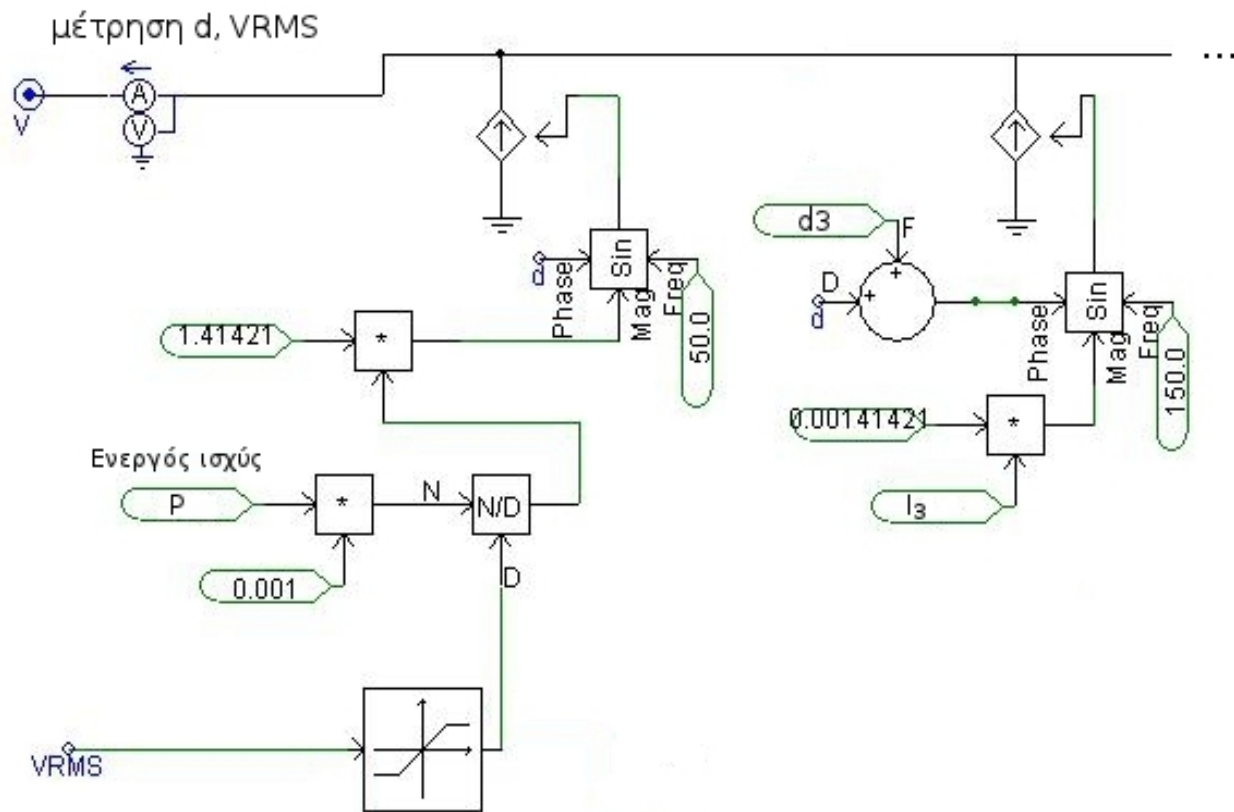
Σημαντική παρατήρηση: όταν σε ένα δίκτυο υπάρχουν πολλές πηγές αρμονικών ο πρώτος τρόπος μοντελοποίησης των αρμονικών πηγών είναι πιθανό να μην παράγει ρεαλιστικά αποτελέσματα καθώς δεν συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση η όποια αλληλεπίδραση μεταξύ αρμονικών πηγών^[32]. Έτσι υπάρχει περίπτωση τα αποτελέσματα να προκύψουν από υπερβολικά απαισιόδοξα (αυξημένη τελική παραμόρφωση λόγω άθροισης αρμονικών) έως υπερβολικά αισιόδοξα (φαινομενικά μικρή τελική παραμόρφωση λόγω ακύρωσης αρμονικών συνιστωσών). Επομένως αυτή η μοντελοποίηση πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά αν και μπορεί να προσφέρει κάποια πιο προσεγγιστικά αποτελέσματα αφού όπως έδειξαν και τα πειράματα στο υποκεφάλαιο 5.8 οι κυριότερες αρμονικές ρεύματος (οι μεγαλύτερου πλάτους) σε όμοιους αντιστροφείς που λειτουργούν στην ίδια ισχύ, διατηρούν πολύ κοντινές σχετικές γωνίες μεταξύ τους.

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος που πρέπει να διερευνηθεί είναι οι επιπλέον αρμονικές που εγχύει μία οικία στο δίκτυο χαμηλής τάσης λόγω των υπόλοιπων ηλεκτρικών συσκευών που διαθέτει (πέρα από έναν Φ/Β αντιστροφήα). Τέτοιες συσκευές είναι για παράδειγμα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές (λόγω των τροφοδοτικών), τα κλιματιστικά (με inverter), οι λάμπες φθορισμού κ.α.^[35]. Για την απλοποίηση του προβλήματος μπορεί να θεωρηθεί όμως ότι σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί μία μονάχα πηγή αρμονικών η οποία θα αντιστοιχεί στο διανυσματικό άθροισμα των υπόλοιπων. Έτσι κάθε οικία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρεις διακριτούς παράγοντες: ένα γραμμικό φορτίο, την παραγωγή ενεργού ισχύος και μία πηγή αρμονικών (τα δύο

προηγούμενα υλοποιούνται στο ίδιο μοντέλο).

6.3 Μοντέλο αρμονικής πηγής με εκπομπή αρμονικών ρεύματος σταθερού πλάτους και κατανομής φασικών γωνιών

Οι αρμονικές πηγές ρεύματος μοντελοποιούνται από εξαρτημένες πηγές ρεύματος που τοποθετούνται παράλληλα στο σημείο σύνδεσης της πηγής αρμονικών και "οδηγούνται" από συνάρτηση ημίτονου στην οποία εισάγεται η αρχική φάση d_n στην οποία προστίθεται η γωνία της θεμελιώδους, το πλάτος I_n και η συχνότητα $f_n=50*n$. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η εν λόγω μοντελοποίηση, όπου φαίνεται επίσης και η εισαγωγή της θεμελιώδους συνιστώσας.



Εικόνα 6-3: Ισοδύναμο μοντέλο συσκευής που εγχύει πραγματική ισχύ στο δίκτυο καθώς επίσης και αρμονικές ρεύματος

Το υποκύκλωμα υλοποιείται ως υπορουτίνα, με μία είσοδο-έξοδο (V) στο λογισμικό PSCAD και παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες:

- Μετράει την γωνία της τάσης στο σημείο του δικτύου όπου συνδέεται και την θέτει ως αρχική φάση στη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος (έτσι ώστε να έχει $\cos\phi_1=1$) ενώ για τις αρμονικές την προσθέτει στην σχετική φασική γωνία που έχει θέσει ο χρήστης.
- Η ενεργός ισχύς που εισάγεται στο δίκτυο καθορίζεται από την

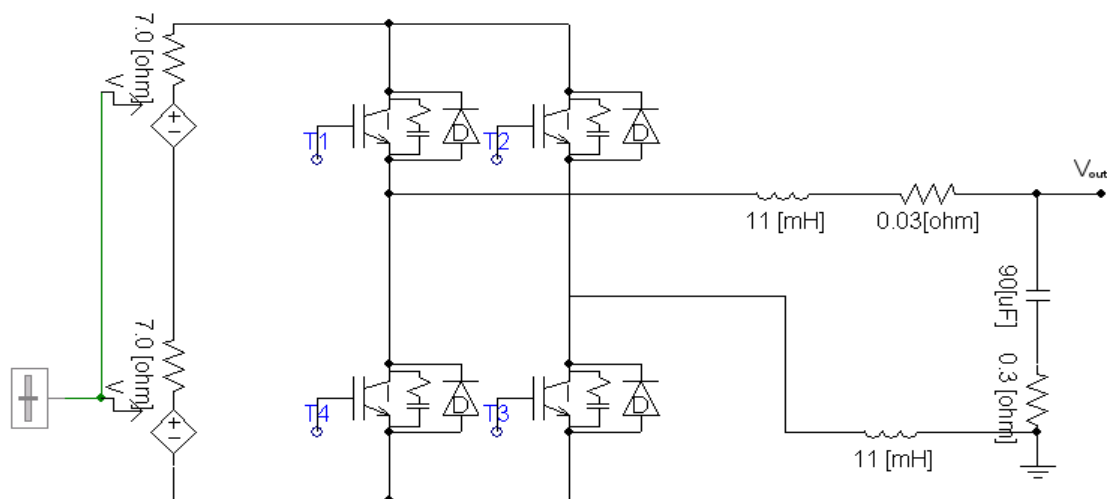
θεμελιώδη συνιστώσα και προκύπτει από την τιμή που θέλει και έχει εισάγει ο χρήστης διαιρεμένη με την τάση του δικτύου στο σημείο. Αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνει την σταθεροποίηση της θεμελιώδους συνιστώσας για τους μεταβατικούς πρώτους κύκλους της προσομοίωσης. Εάν φυσικά η τάση πέσει κάτω από την ονομαστική ή βγει εκτός ορίων λόγω ανύψωσης ο έλεγχος βγάζει σταθερή έξοδο ίση με την ονομαστική (για αυτό το λόγο έχει χρησιμοποιηθεί περιοριστής).

Οι τιμές που εισάγονται σε αυτό το μοντέλο όπως έχει εξηγηθεί προηγουμένως, πρέπει να προέρχονται είτε από μετρήσεις πραγματικών συσκευών που εισάγουν αρμονικές στο δίκτυο, είτε από θεωρητικά μοντέλα κατανομής πλατών και φασικών γωνιών των αρμονικών συνιστωσών.

6.4 Μοντελοποίηση μονοφασικού αντιστροφέα

Για τις ανάγκες της μελέτης αρμονικών σε δίκτυα χαμηλής τάσης υλοποιήθηκε μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως πλήρους γέφυρας με έλεγχο SPWM. Στο σημείο της σύνδεσης με τη Φ/Β γεννήτρια θεωρήθηκε πηγή σταθερής τάσης. Δεν υλοποιήθηκε δηλαδή η συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων ούτε και ο αλγόριθμος MPPT αφού για τις μελέτες αρμονικών ενδιαφέρει η γνώση της παραμόρφωσης της τάσης σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και όχι σε μεταβατικές. Έτσι, η ισχύς των αντιστροφέων είναι σταθερή κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Στη συνέχεια ακολουθεί το κύκλωμα του αντιστροφέα:



Εικόνα 6-4: Κύκλωμα αντιστροφέα

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κάθε DC πηγή τάση επιλέχθηκε στα 338V, έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερη από την V_{peak} της τάσης δικτύου (δηλαδή

$\sqrt{2} \cdot V_{RMS} = 325V$). Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η τιμή είναι ότι οι πηγές τάσης δεν ήταν δυνατό να λειτουργήσουν ως ιδανικές αλλά απαιτούνταν (από το λογισμικό) μια εσωτερική αντίσταση. Θα ήταν ακριβώς το ίδιο εάν επιλέγονταν μία πηγή τάσης με τη διπλάσια τιμή.

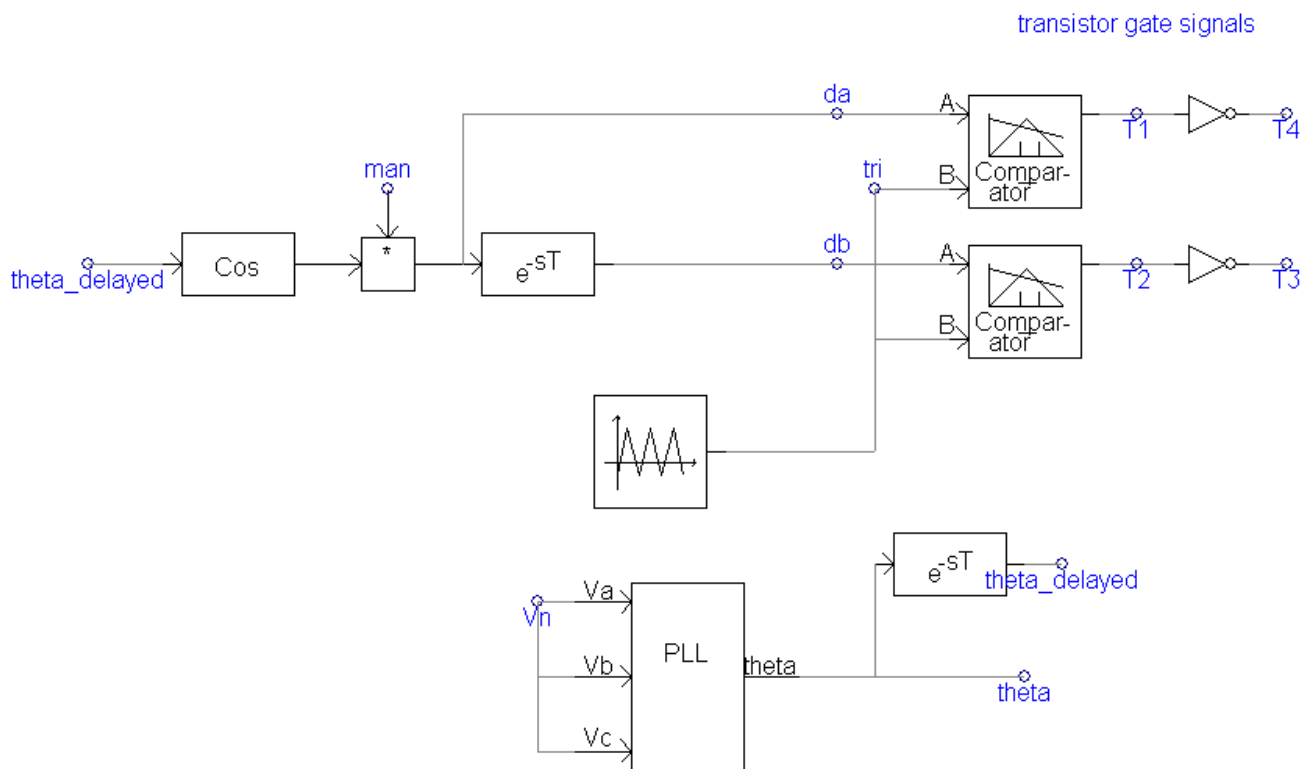
Τα διακοπτικά στοιχεία είναι τύπου IGBT και έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Αντίσταση σε κατάσταση αγωγής (ON resistance): 0.0001Ω
- Αντίσταση σε κατάσταση αποκοπής (OFF resistance): $10^7\Omega$
- Αντίσταση παράλληλου κλάδου (Snubber resistance): 1000Ω
- Χωρητικότητα παράλληλου κλάδου (Snubber capacitance): $0.05\mu F$

Επίσης, για την σωστή λειτουργία του αντιστροφέα τοποθετούνται δίοδοι παράλληλα σε κάθε IGBT, σε αντίστροφη πολικότητα.

Έλεγχος αντιστροφέα:

Οι παλμοί που τροφοδοτούν τα IGBTs προκύπτουν από το λογικό κύκλωμα που ακολουθεί:

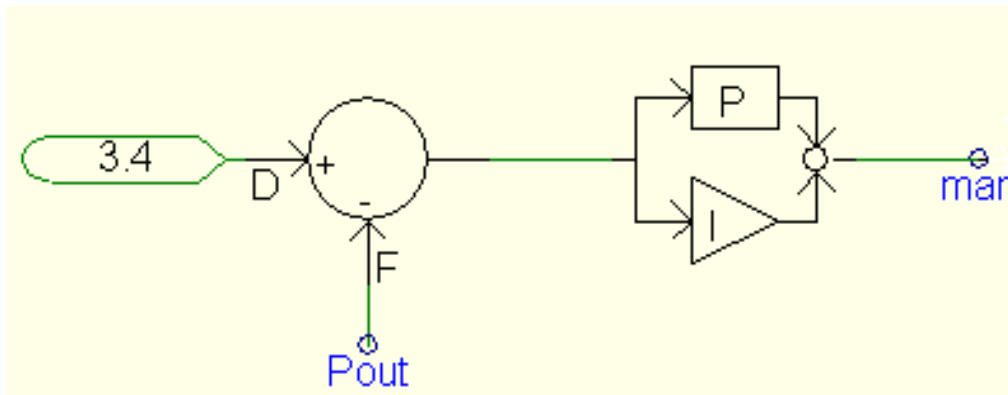


Εικόνα 6-4: Δημιουργία παλμών που ελέγχουν τα IGBTs

Το μπλοκ PLL δέχεται στην είσοδό του τάση (V_n) και παράγει στην έξοδό του τη γωνία που πρέπει να τροφοδοτηθεί σε ένα ημίτονο έτσι ώστε να είναι συμφασικό με την τάση V_n . Στη συνέχεια, όπως υπαγορεύει η τεχνική SPWM, το ημίτονο αναφοράς συγκρίνεται με μία τριγωνική κυματομορφή και παράγει τους παλμούς T1 που τροφοδοτούν το πρώτο IGBT (και τους αντίθετους του T1, T4 που τροφοδοτούν το τέταρτο). Αντίστοιχα, για τα άλλα δύο IGBT οι παλμοί προκύπτουν από την

σύγκριση της ίδιας τριγωνικής κυματομορφής με το ίδιο ημίτονο καθυστερημένο όμως κατά μισό κύκλο. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής είναι 16kHz.

Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος γίνεται μέσα από τον έλεγχο του πλάτους του ημίτονου. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε PI ελεγκτής ο οποίος καθορίζει το σήμα man για την ρύθμιση της ενεργού ισχύος. Ο χρήστης εισάγει την επιθυμητή τιμή ενεργού ισχύος, από αυτή αφαιρείται η ενεργός ισχύς που αποδίδει εκείνη τη στιγμή ο αντιστροφέας και το σήμα ελέγχου τροφοδοτεί τον PI ελεγκτή ο οποίος δημιουργεί το σήμα ελέγχου του πλάτους του ημίτονου αναφοράς (man).



Εικόνα 6-5: Έλεγχος ενεργού ισχύος

Ο έλεγχος της άεργου ισχύος γίνεται με την χρονική καθυστέρηση του σήματος εξόδου του PLL. Με την κατάλληλη τροποποίηση της σταθεράς χρόνου της εισαγόμενης καθυστέρησης, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει την άεργο ισχύ (από επαγωγική έως και χωρητική λειτουργία). Στις προσομοιώσεις η σταθερά αυτή τίθεται με τέτοιο τρόπο ώστε η άεργος ισχύς που παράγει ο αντιστροφέας να είναι κοντά στο μηδέν και ελάχιστα αρνητική (επαγωγική λειτουργία). Ο συντελεστής ισχύος συγκεκριμένα, διατηρείται πάνω από 99.5% επαγωγικός. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε γιατί το αποτέλεσμα του ελέγχου της άεργου ισχύος ήταν καλύτερο σε αντιπαράθεση με τον αρχικό τρόπο που υλοποιήθηκε όπου έγινε απόπειρα να ελέγχεται η άεργος ισχύς εισάγοντας τη φασική γωνία της τάσης του δικτύου απευθείας στο ημίτονο αναφοράς. Αυτός ο τρόπος οδηγούσε σε πολλές ταλαντώσεις της άεργου ισχύος με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθεί.

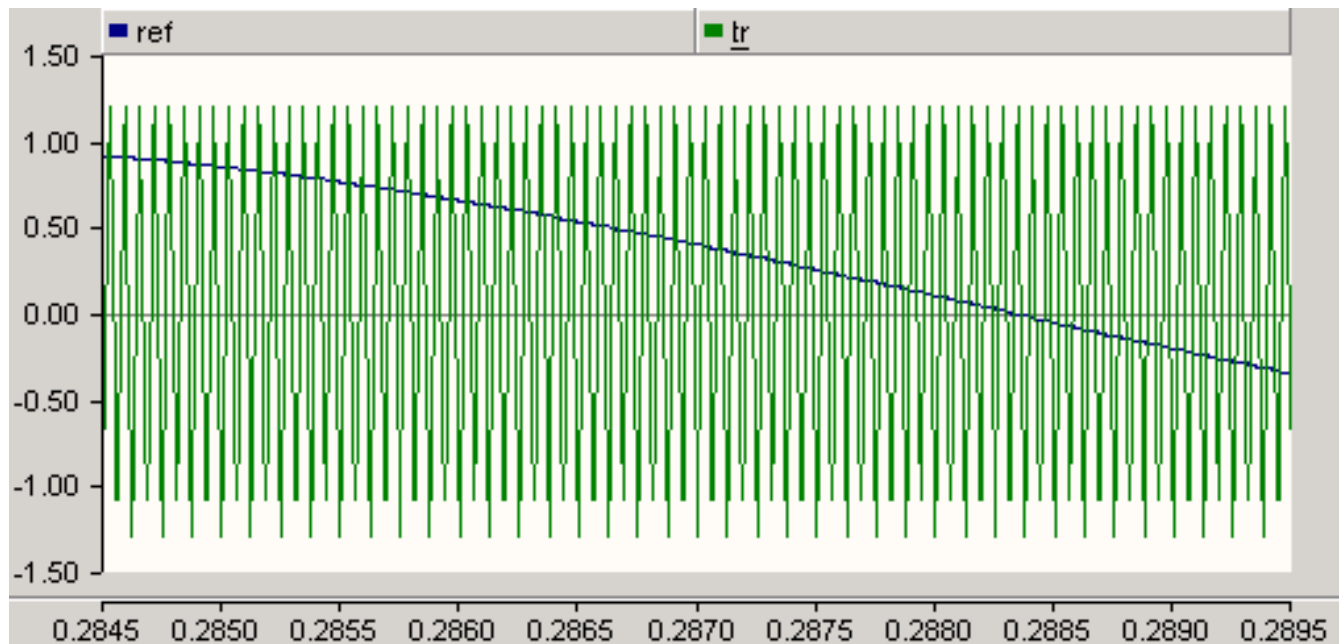
Τέλος, οι τιμές των στοιχείων LC του φίλτρου επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία^[36] και με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παράγει ο αντιστροφέας να είναι οριακά μικρότερη από 5% ($THD_1 < 5\%$).

Παρουσίαση αποτελεσμάτων:

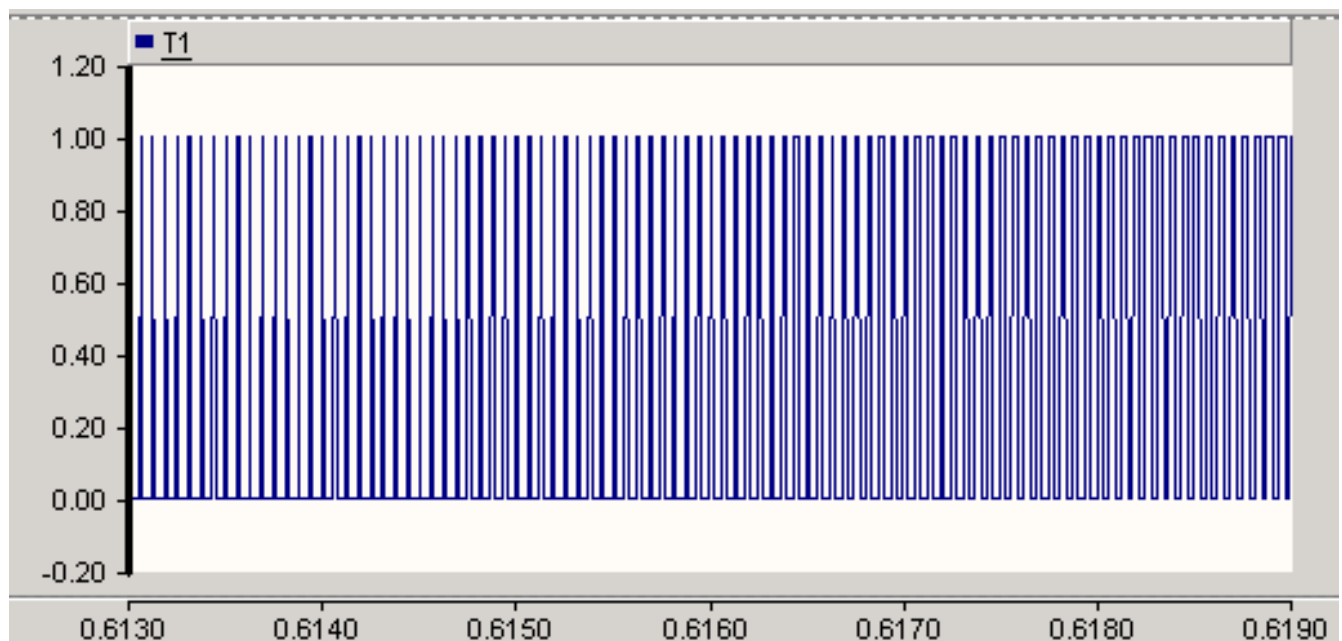
Όπως και με το προηγούμενο μοντέλο πηγής αρμονικών, και σε αυτή την περίπτωση τα παραπάνω σχεδιάστηκαν σε υπορουτίνα του PSCAD έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα αλλά και σε πολλές εκδοχές

παράλληλα το ένα από το άλλο και σε διαφορετικά σημεία του δικτύου.

Οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης του αντιστροφέα φαίνονται στα γραφήματα 6-3, 6-4.



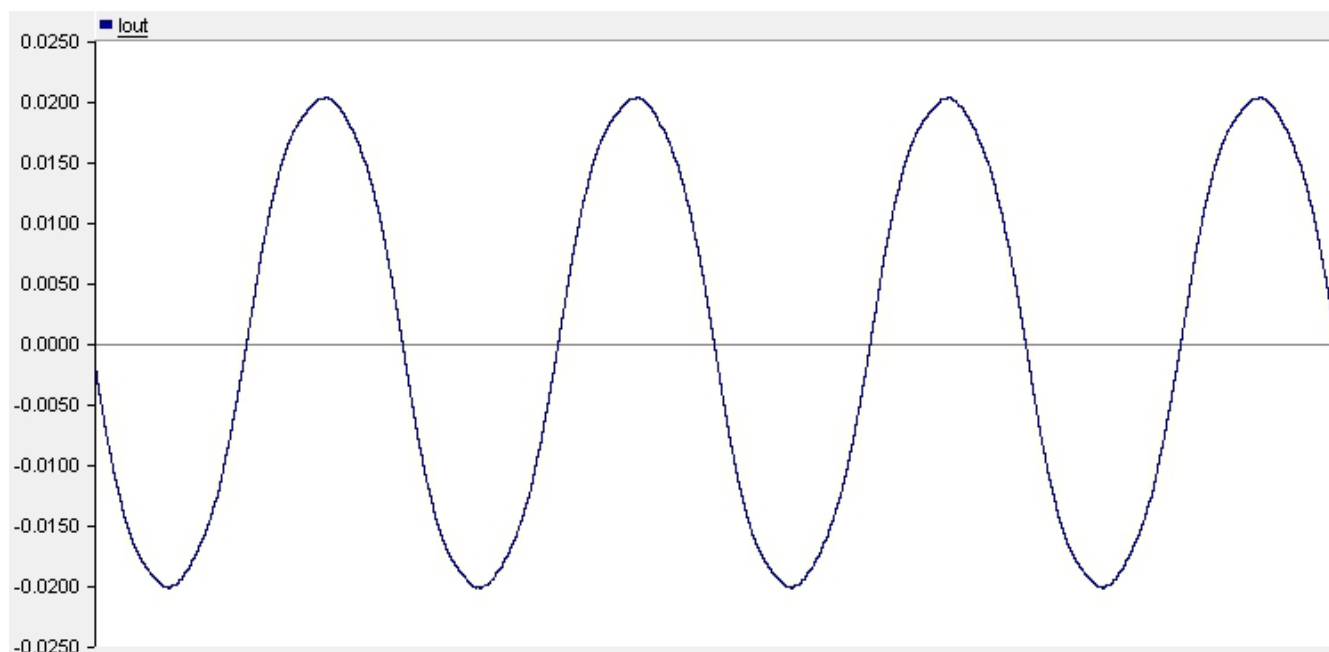
Γράφημα 6-1: Τριγωνική κυματομορφή και ημίτονο αναφοράς



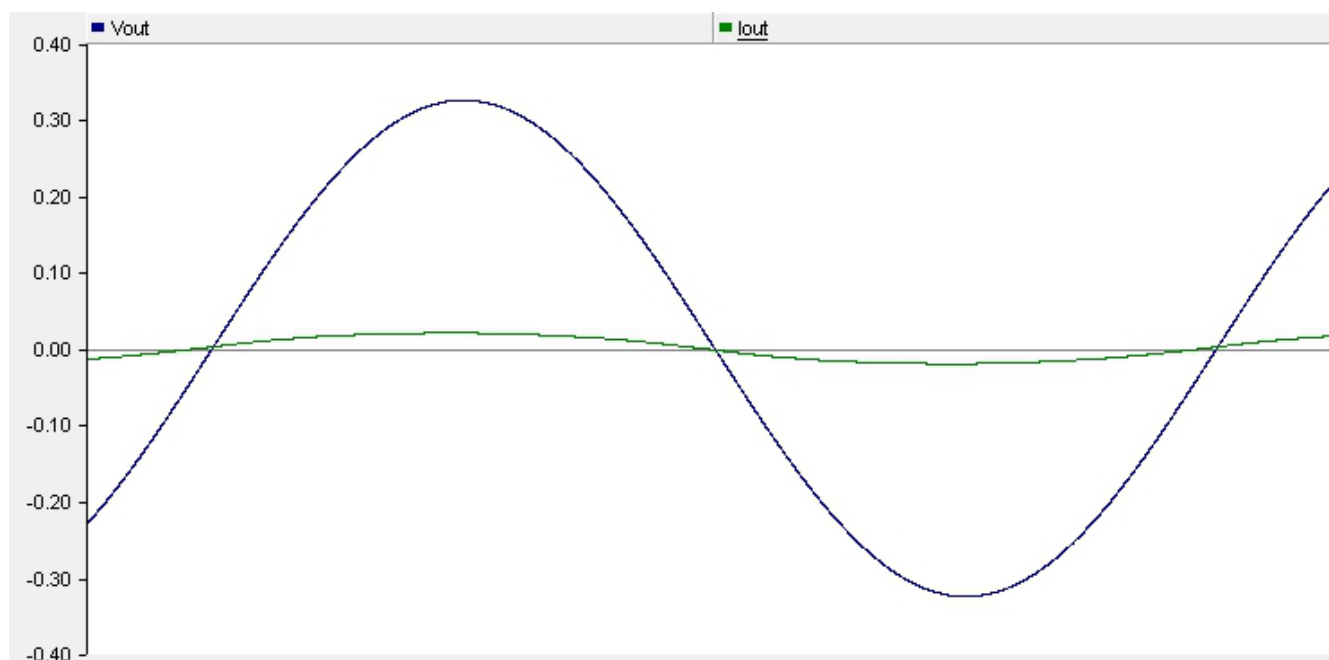
Γράφημα 6-2: Οι παλμοί T1 και T2 για τον έλεγχο των IGBTs

Τα προηγούμενα γραφήματα, παρουσιάζουν τη λειτουργία του ελέγχου του αντιστροφέα. Στο πρώτο γράφημα (γράφημα 6-1) φαίνονται οι δύο κυματομορφές οι οποίες συγκρίνονται για την δημιουργία των παλμών.

Στο επόμενο γράφημα (γράφημα 6-2) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης όπου παρατίθενται οι παλμοί T.

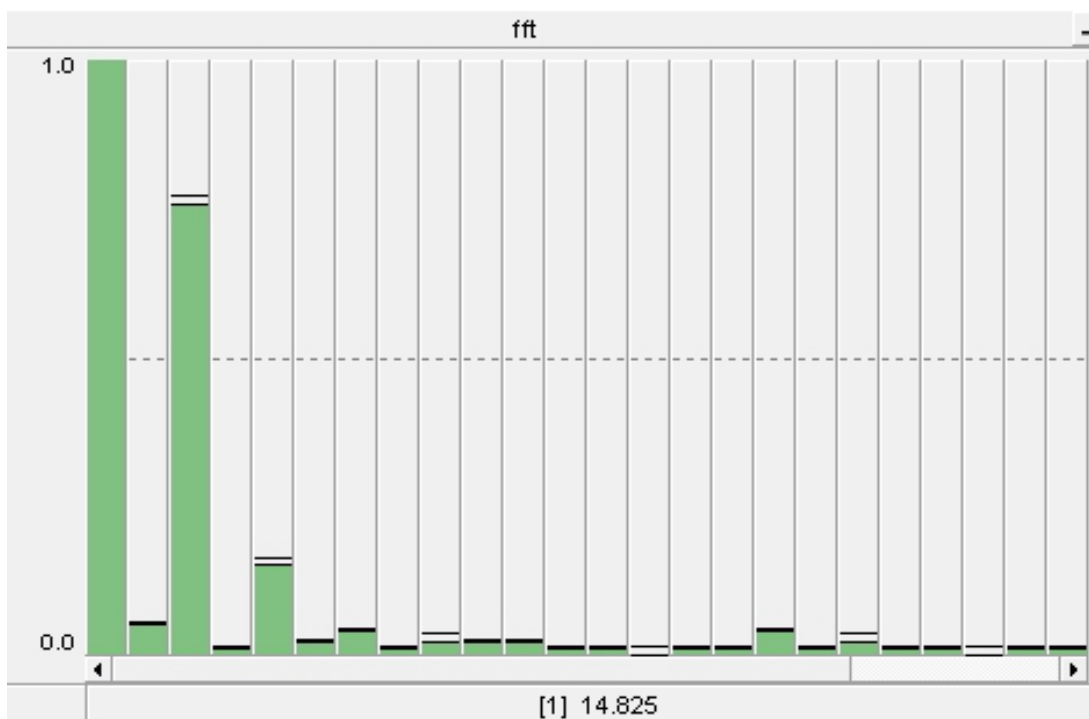


Γράφημα 6-3: Ρεύμα του αντιστροφέα

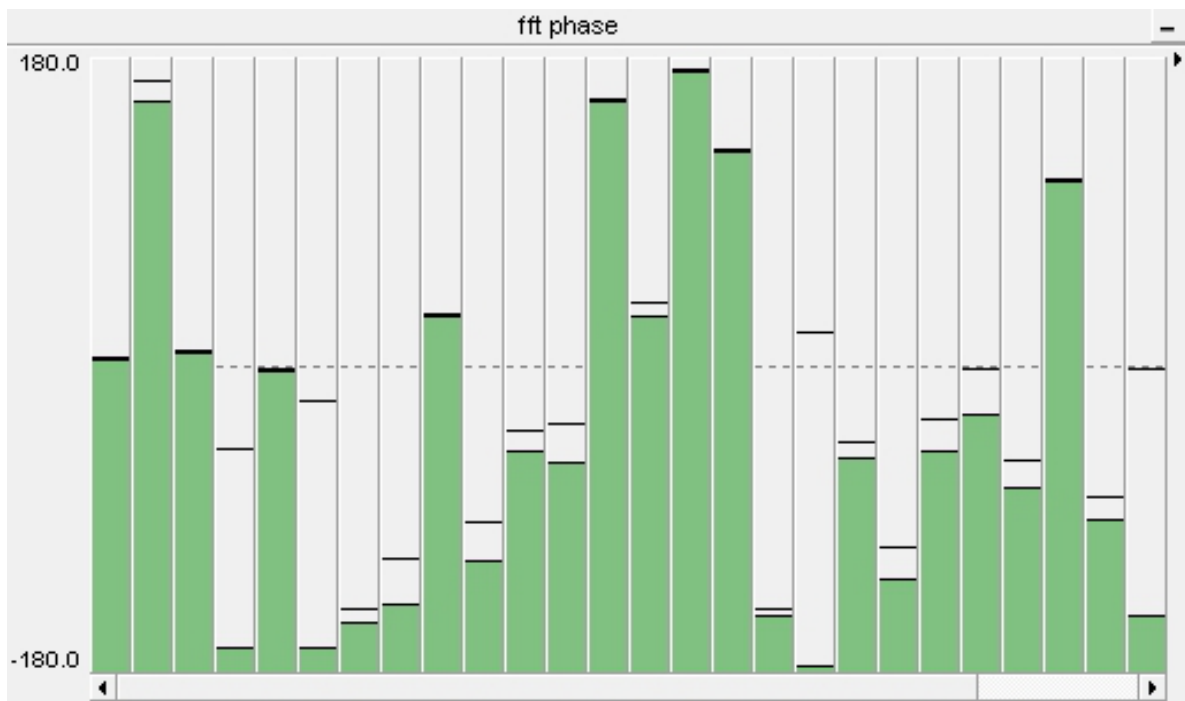


Γράφημα 6-4: Τάση δικτύου και ρεύμα του αντιστροφέα

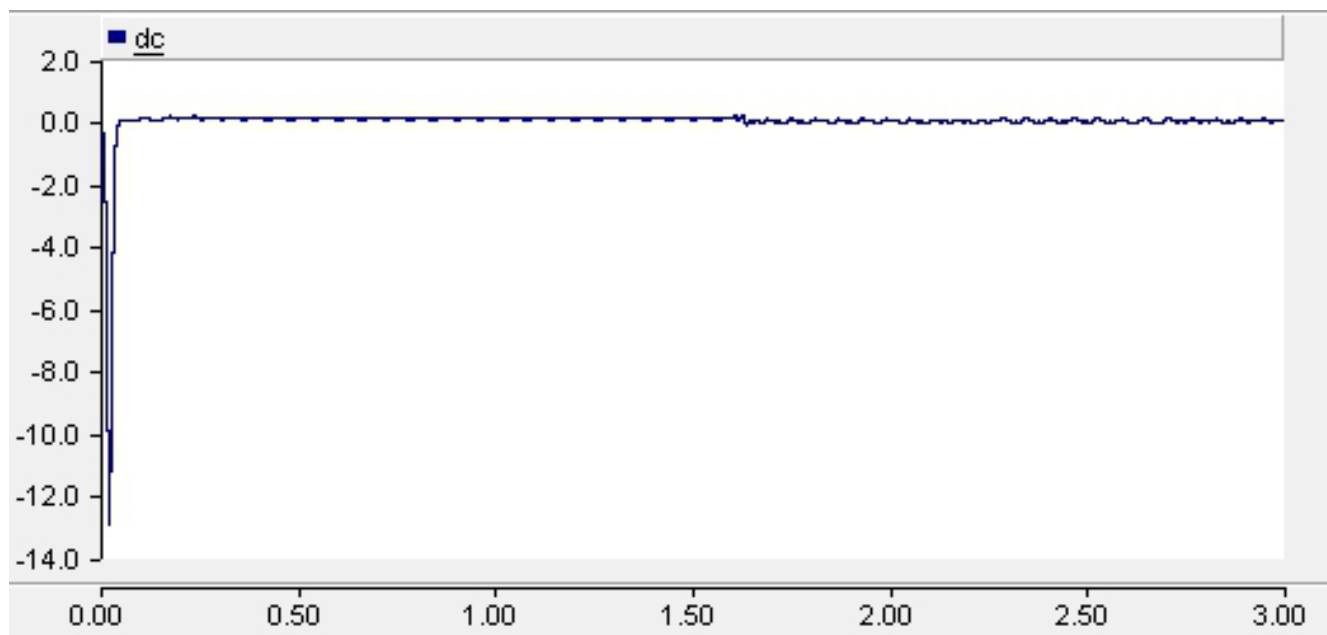
Στα γραφήματα που ακολουθούν, φαίνονται οι αρμονικές του ρεύματος (πλάτη 6-5 και φασικές γωνίες 6-6). Επίσης, η έγχυση της dc συνιστώσας του ρεύματος παρουσιάζεται στο γράφημα 6-7.



Γράφημα 6-5: Φάσμα αρμονικών ρεύματος του αντιστροφέα, η κλίμακα στον κάθετο άξονα είναι γραμμική και το εύρος τιμών που εμφανίζονται στο ραβδόγραμμα είναι από 0 έως 1A για λόγους καλύτερης επισκόπησης. Η θεμελιώδης συνιστώσα είναι 14.82A η οποία προφανώς δεν εμφανίζεται ολόκληρη αλλά ένα τμήμα της.



Γράφημα 6-6: Φασικές γωνίες αρμονικών ρεύματος του αντιστροφέα



Γράφημα 6-7: DC συνιστώσα ρεύματος του αντιστροφέα

Η dc συνιστώσα του ρεύματος παραμένει σημαντικά χαμηλότερη από το όριο που θέτουν τα πρότυπα^[18,20] δηλαδή κάτω από το 0.5% του μέγιστου ονομαστικού AC ρεύματος του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα το ποσοστό παραμένει κάτω από το 0.34%. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι το δίκτυο στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας είναι ένα ιδανικό δίκτυο χαμηλής τάσης (μια ιδανική πηγή και μια σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης).

6.5 Σενάρια προσομοιώσεων ηλεκτρικών δικτύων Χ.Τ. με διείδυση φωτοβολταϊκών αντιστροφέων.

Οι επόμενες προσομοιώσεις θα γίνουν σε ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία θα επιλεγθούν με τρόπο τέτοιο ώστε να αναδεικνύονται πιο έντονα τα προβλήματα που είναι πιθανόν να εμφανιστούν στην παραμόρφωση της τάσης από την υψηλή διείδυση Φ/Β αντιστροφέων. Η επιλογή τόσο των δικτύων όσο και των πηγών αρμονικών αλλά και των φορτίων κάθε φορά γίνεται με σεβασμό στη χωρητικότητα των γραμμών υπολογισμένη στις δύο ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας (Μέγιστη παραγωγή - Ελάχιστη κατανάλωση και Ελάχιστη παραγωγή - Μέγιστη κατανάλωση). Επίσης, όπως έχει προαναφερθεί, οι Φ/Β αντιστροφείς θα έχουν συντελεστή ισχύος πολύ κοντά στη μονάδα.

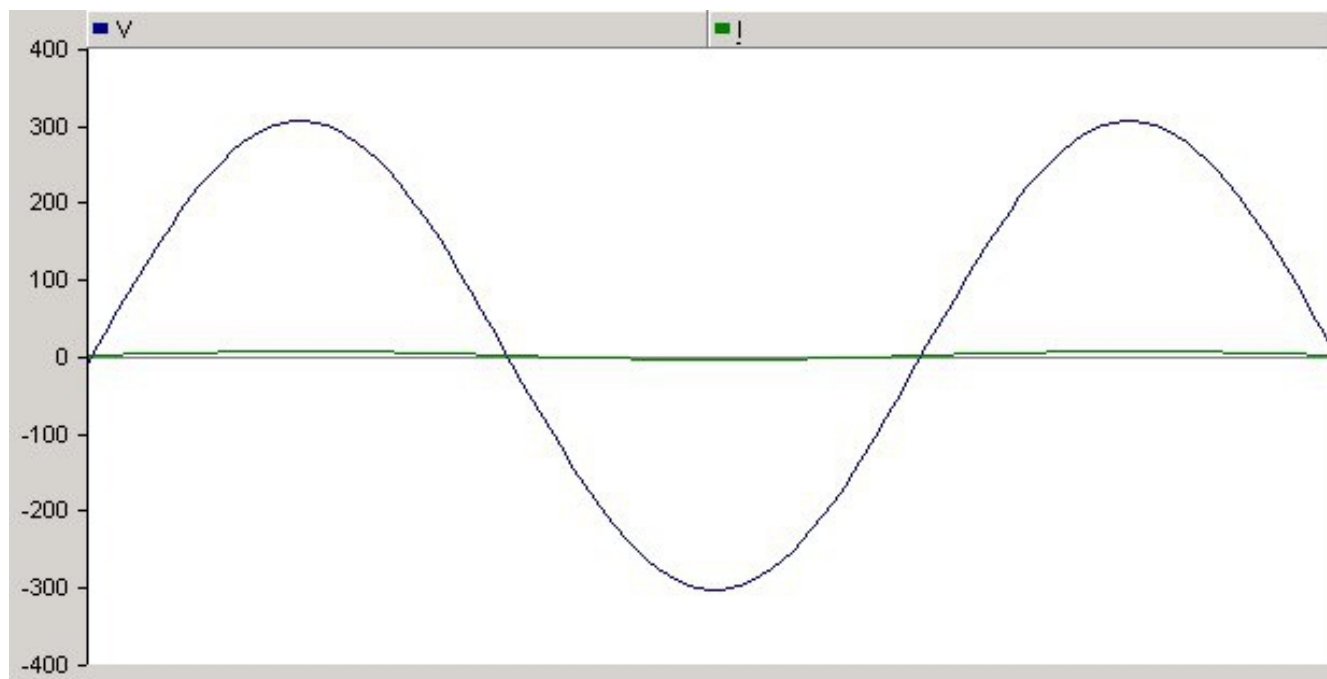
6.5.1 Προσομοίωση με τις αρμονικές του εργαστηριακού Sunny Boy

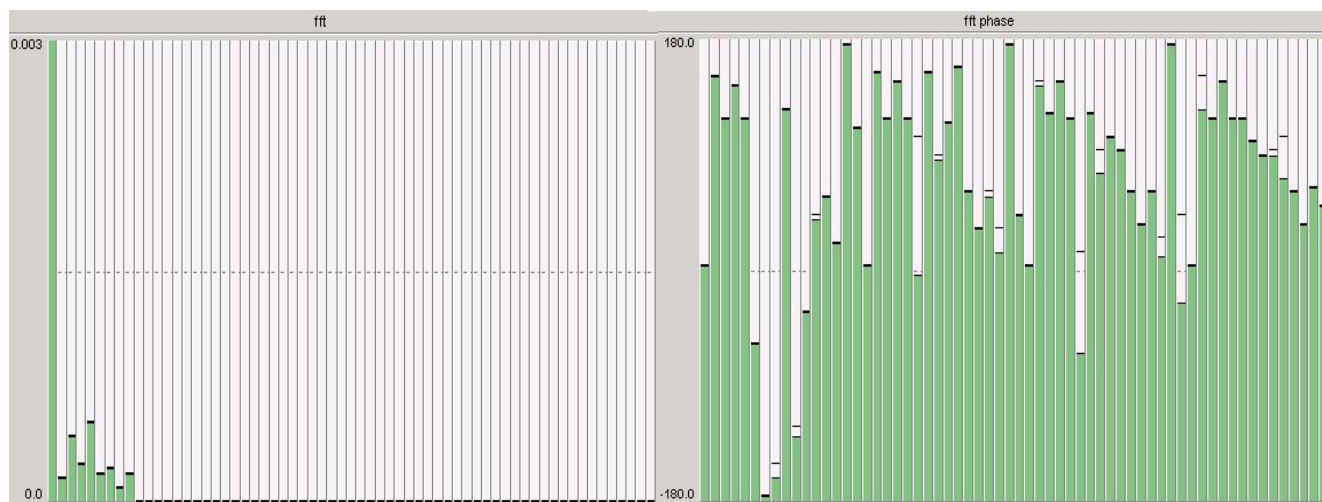
Το πρώτο σενάριο που θα διερευνηθεί είναι ένα υποθετικό ακτινικό δίκτυο με 10 κόμβους (η τοπολογία της εικόνας 6-2 με 10 κόμβους) που αντιστοιχούν σε τοποθέτηση 10 πηγών αρμονικών με τη μεταξύ τους

σύνδεση με τις γραμμές του υποκεφαλαίου 6.2.4. Οι αρμονικές ρεύματος (πλάτη και φασικές γωνίες) τέθηκαν ίσες με τις αρμονικές που μετρήθηκαν από τον αντιστροφέα sunny boy σε λειτουργία αποδιδόμενη ισχύος 0.8kW, στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη διασαφήνιση των επόμενων πινάκων αναφέρεται ότι: το THDV κάθε κόμβου αναφέρεται στην παραμόρφωση της τάσης σε κάθε σημείο του δικτύου ενώ το THDI στην παραμόρφωση του ρεύματος κάθε γραμμής του δικτύου (για παράδειγμα, το ακτινικό δίκτυο μπορεί να διαθέτει 10 κόμβους και 10 γραμμές όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-2).

Στην χειρότερη αναμενόμενη περίπτωση (Μέγιστη παραγωγή - Ελάχιστη κατανάλωση) τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

κόμβος	THDI(%)	THDV(%)	VRMS(kV)
1	3.74	0.12	0.23147
2	3.75	0.18	0.23256
3	3.75	0.23	0.23352
4	3.76	0.27	0.23437
5	3.76	0.31	0.23509
6	3.76	0.34	0.23570
7	3.77	0.36	0.23618
8	3.77	0.38	0.23654
9	3.77	0.39	0.23678
10	3.77	0.40	0.23690



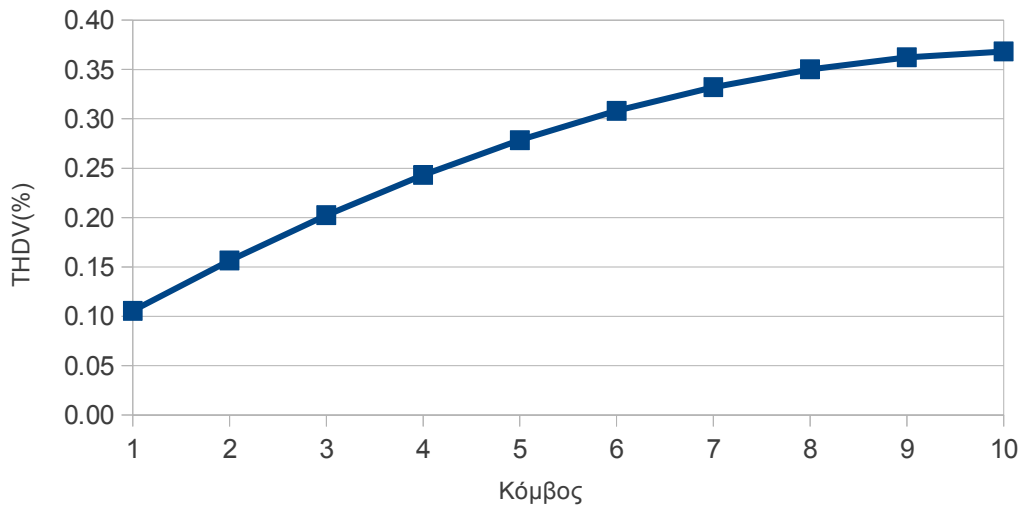


Γράφημα 6-8: Πλάτη αρμονικών τάσης και φασικές γωνίες του κόμβου 10

Με τα μέγιστα φορτία, αναμένεται επιπλέον μείωση της παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν επαληθεύουν αυτήν την άποψη αν και βέβαια η διαφορά δεν είναι τόσο σημαντική. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται πρόβλημα με την παραμόρφωση της τάσης αφού βρίσκεται κάτω από το 8% που ορίζεται στο EN50160. Για τα επόμενα σενάρια δεν κρίνεται απαραίτητη η παράθεση πινάκων των τάσεων και των τιμών ισχύος και επομένως θα παραλείπονται.

Στην επόμενη περίπτωση (Μέγιστη παραγωγή - Μέγιστη κατανάλωση) φαίνονται τα αποτελέσματα:

κόμβος	THDI(%)	THDV(%)	VRMS(kV)
1	1.75	0.11	0.22666
2	1.76	0.16	0.22437
3	1.76	0.20	0.22235
4	1.76	0.24	0.22060
5	1.77	0.28	0.21910
6	1.77	0.31	0.21787
7	1.77	0.33	0.21688
8	1.77	0.35	0.21614
9	1.78	0.36	0.21566
10	1.78	0.37	0.21541



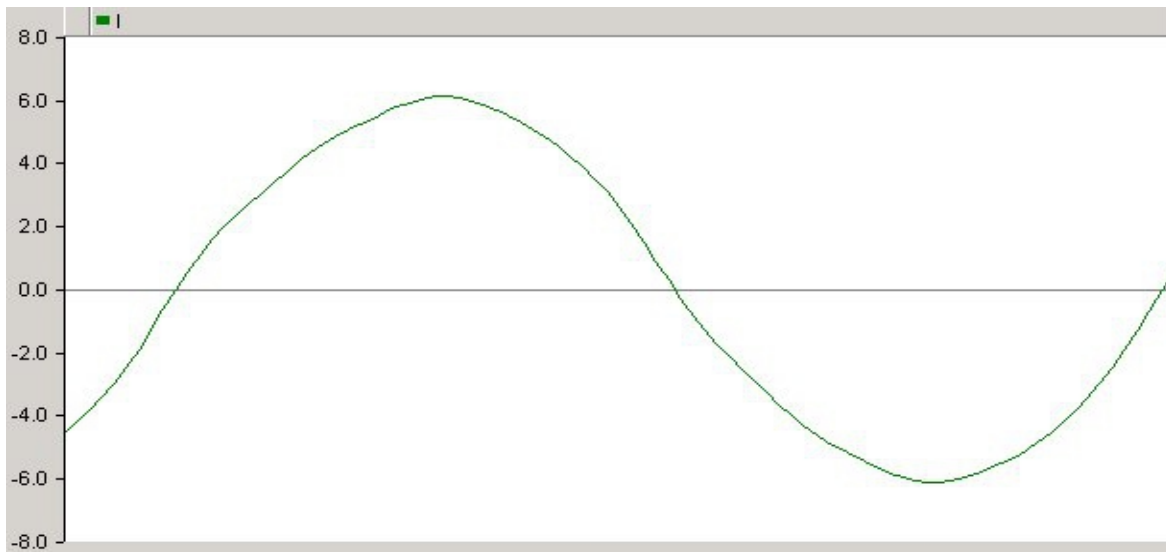
Γράφημα 6-9: THD τάσης για όλους τους κόμβους

6.5.2 Προσομοίωση με αρμονικές ρεύματος ακραίες τιμές που υπαγορεύει το πρότυπο IEC 61727

Σε αυτό το σενάριο επιλέχθηκαν τιμές πλατών αρμονικών ρεύματος με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις του προτύπου IEC 61727. Ο αντίστοιχος αντιστροφείας είναι ονομαστικής ισχύος 1kW. Οι φασικές γωνίες διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές του προηγούμενου σεναρίου (αυτές δηλαδή που μετρήθηκαν από τον sunny boy). Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα πλάτη είναι οι εξής:

Τάξη αρμονικής	Πλάτος (A)
2	0.0475
3	0.19
4	0.02
5	0.08
6	0.01
7	0.04
9	0.02
THD%	4.99%

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος που προκύπτει για αυτές τις τιμές:



Γράφημα 6-11: Κυματομορφή ρεύματος για τις επιλεγμένες τιμές

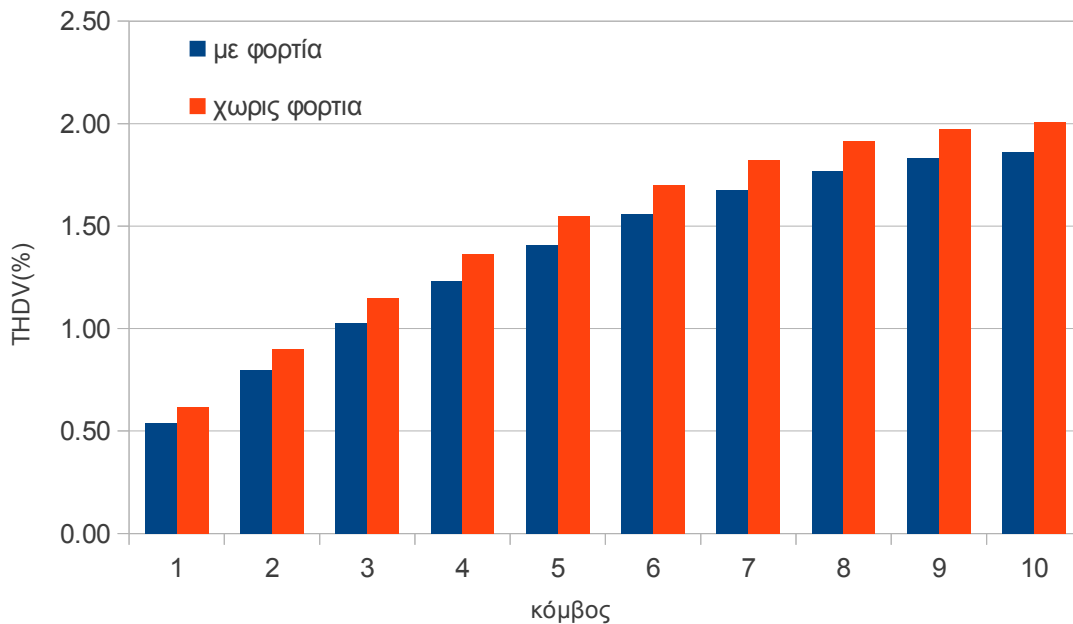
Οι προσομοιώσεις δίνουν για ελάχιστο φορτίο τα εξής αποτελέσματα:

κόμβος	THDI(%)	THDV(%)
1	10.63	0.62
2	10.63	0.90
3	10.63	1.15
4	10.65	1.36
5	10.65	1.55
6	10.66	1.70
7	10.67	1.82
8	10.67	1.91
9	10.67	1.98
10	10.67	2.01

Παρατηρείται ότι η παραμόρφωση του ρεύματος είναι σε όλους τους κόμβους σχεδόν η ίδια. Η παραμόρφωση της τάσης αντίθετα, αυξάνεται στους πιο απομακρυσμένους κόμβους (με μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την παραμόρφωση στην τάση και στο ρεύμα των κόμβων με το μέγιστο φορτίο στο δίκτυο είναι τα ακόλουθα:

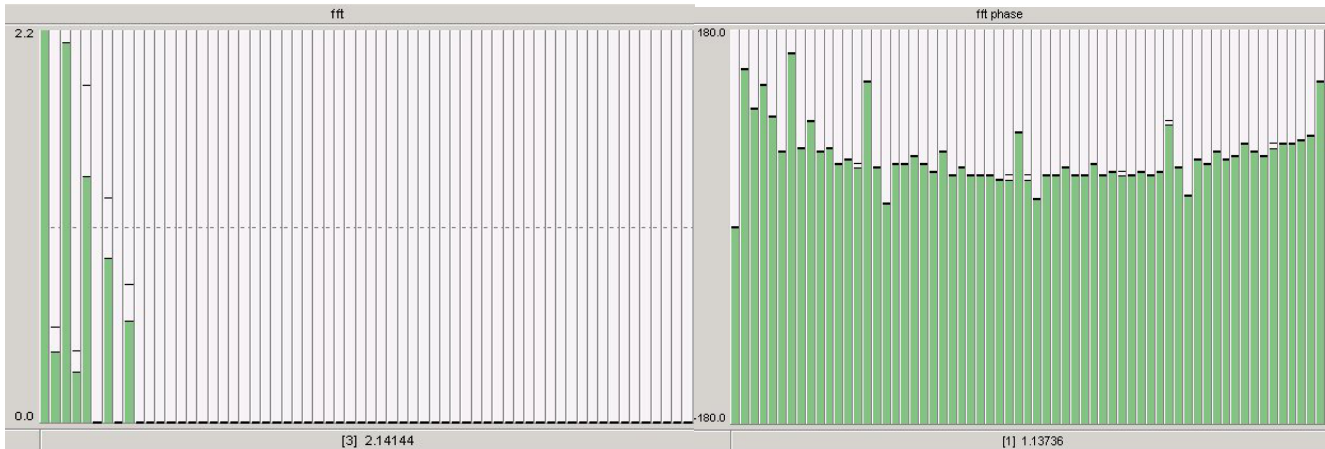
κόμβος	THDI(%)	THDV(%)
1	5.61	0.54
2	5.52	0.80
3	5.40	1.03
4	5.26	1.23
5	5.07	1.41
6	4.84	1.56
7	4.53	1.68
8	6.67	1.77
9	6.67	1.83
10	6.67	1.86



Γράφημα 6-12: THD της τάσης σε κάθε κόμβο

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται πρόβλημα με την παραμόρφωση της τάσης και μάλιστα παραμένει με μεγάλη απόσταση κάτω από το όριο του 8%. Όπως αναμένεται και από τη θεωρία στις προσομοιώσεις με τα μέγιστα φορτία η αρμονική παραμόρφωση τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος βελτιώνεται.

Ενδεικτικά, παραθέτονται και οι τα φάσματα πλατών και φασικών γωνιών της τάσης του κόμβου 10 (προσομοίωση με φορτία).



Γράφημα 6-13: Φάσματα πλατών και φασικών γωνιών της τάσης του κόμβου 10, στο φάσμα των πλατών το εύρος τιμών της τάσης είναι από 0 έως 2.2V. Όπως είναι λογικό η θεμελιώδης δεν εμφανίζεται ολόκληρη στο διάγραμμα.

6.5.3 Προσομοίωση με πηγή αρμονικών την κυματομορφή ρεύματος που καταγράφηκε από τον αντιστροφέα SolarStar a6000

Ο εν λόγω αντιστροφέας είναι τμήμα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, συνολικής ονομαστικής ισχύος 10740 Wp, στον χώρο της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου στην Αθήνα^[42]. Πιο συγκεκριμένα, στην νοτιοανατολική πλευρά των παλαιών κτιρίων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον χώρο στάθμευσης του κτιρίου.



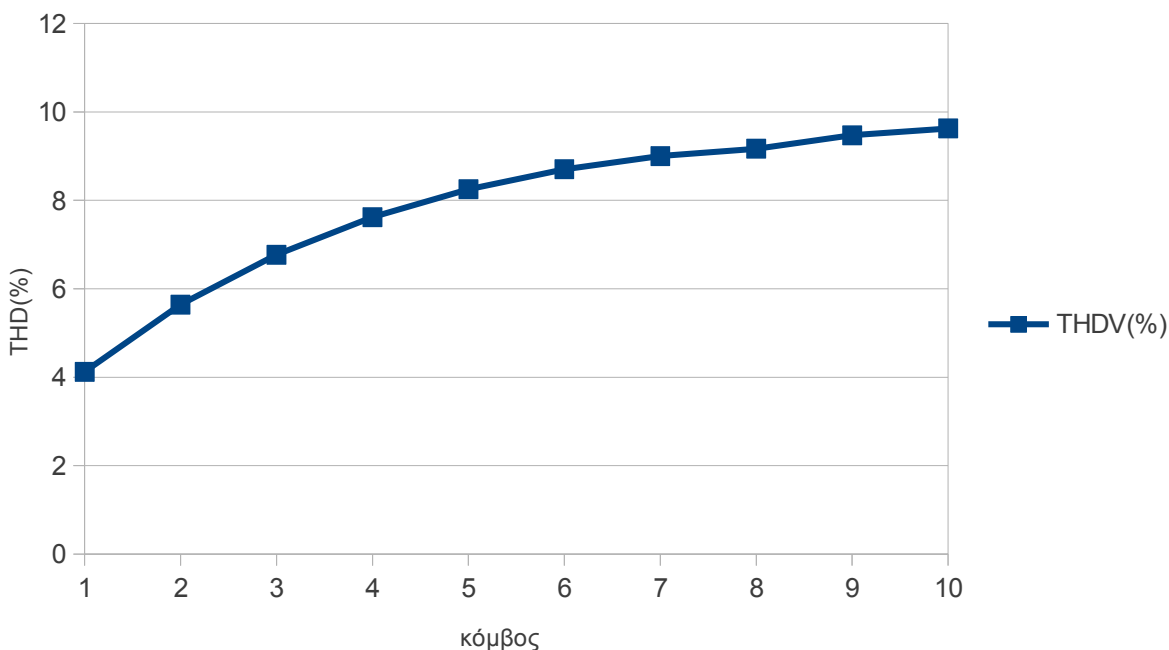
Γράφημα 6-14: Κυματομορφή ρεύματος αντιστροφέα SolarStar a6000

Σκοπός αυτού του σεναρίου είναι να δείξει με απλό και ρεαλιστικό τρόπο αν θα δημιουργούνταν πρόβλημα σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης με υψηλή διείσδυση αυτών των αντιστροφέων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο εν λόγω αντιστροφέας δεν πληρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις που θέτει το σχετικά πρόσφατο πρότυπο IEC61727 όσον αφορά στα πλάτη των αρμονικών ρεύματος που εγχύει. Από την άλλη πλευρά όμως συμμορφώνεται πλήρως με το παλαιότερο πρότυπο

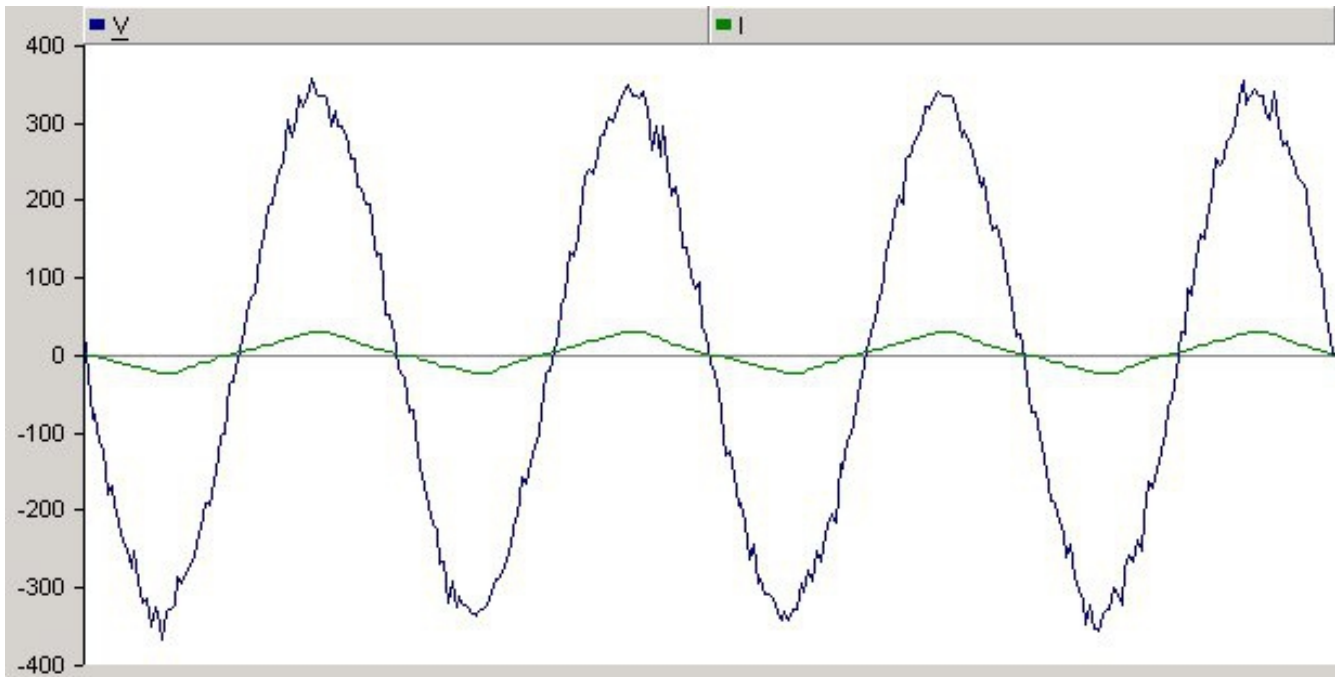
IEC61000-03-02. Τα φορτία θεωρήθηκαν στη μέγιστη τιμή τους ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο αισιόδοξα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν.

κόμβος	THDI(%)	THDV(%)
1	17.97	4.12
2	17.97	5.64
3	18.34	6.77
4	18.35	7.62
5	18.38	8.25
6	18.41	8.70
7	18.47	9.00
8	18.56	9.17
9	18.70	9.47
10	18.95	9.63



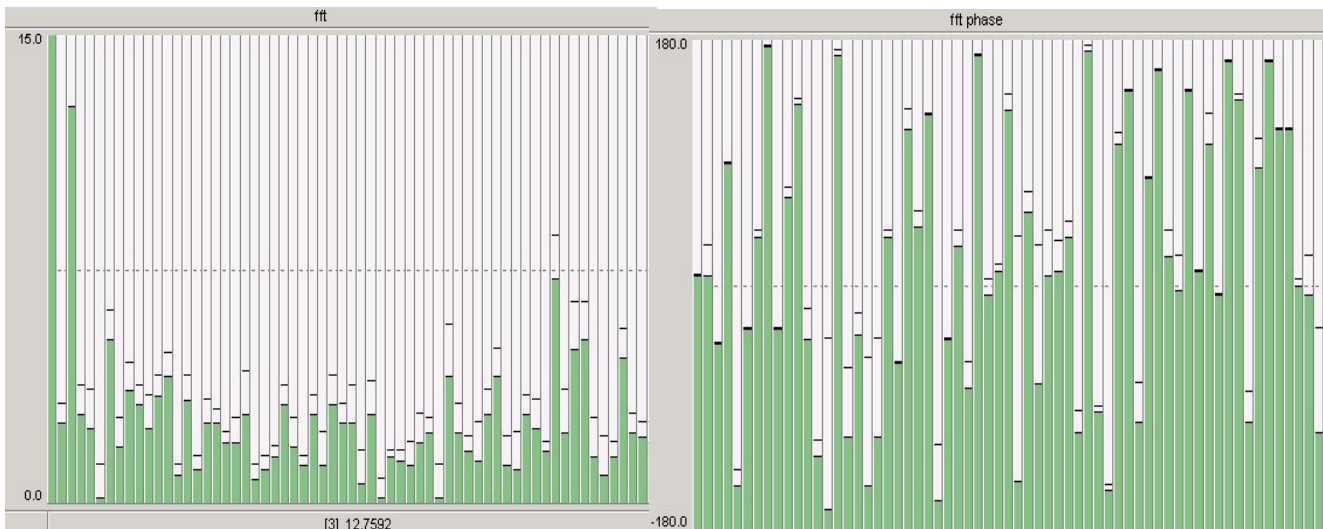
Γράφημα 6-15: THD της τάσης σε κάθε κόμβο

Παρατηρείται ότι η παραμόρφωση της τάσης στους κόμβους 5 έως 10 είναι εκτός ορίων. Συνεπώς η υψηλή διεύθυνση των συγκεκριμένων Φ/Β αντιστροφών κρίνεται ακατάλληλη. Στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται η τάση στον κόμβο 10 (που έχει και την χειρότερη παραμόρφωση) και το ρεύμα του αντιστροφέα. Η κυματομορφή της τάσης είναι εμφανώς παραμορφωμένη.



Γράφημα 6-16: Κυματομορφή τάσης στον κόμβο 10 και ρεύματος του αντιστροφέα που συνδέεται σε αυτόν

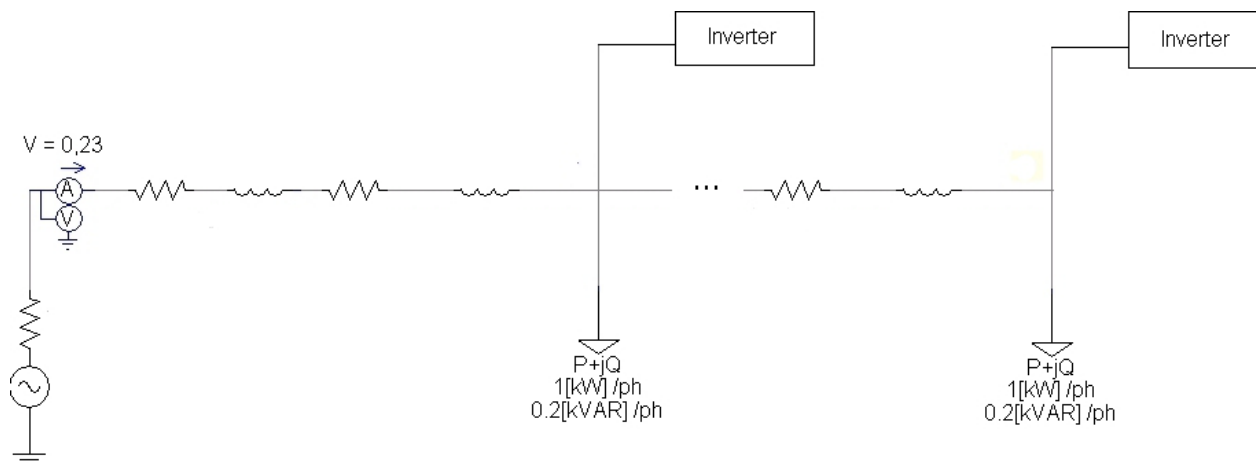
Δεν πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε περίπτωση ελάχιστου φορτίου γιατί εφόσον τα αποτελέσματα προκύπτουν τόσο δυσμενή στην πιο ευνοϊκή περίπτωση (μέγιστου φορτίου) δεν κρίνεται σκόπιμη μία προσομοίωση που αναμένεται να αποδώσει χειρότερα αποτελέσματα (υψηλότερη παραμόρφωση στην τάση).



Γράφημα 6-17: Φάσματα πλατών και φασικών γωνιών της τάσης του κόμβου 10

6.5.4 Προσομοιώσεις με πηγή αρμονικών μοντελοποιημένο αντιστροφέα

Στις επόμενες προσομοιώσεις η πηγή των αρμονικών είναι ο αντιστροφέας του υποκεφαλαίου 6.4 ο οποίος ρυθμίζεται σε ισχύ λειτουργίας 3.4kW. Η μορφολογία του δικτύου μεταβάλλεται σε κάθε περίπτωση ανάλογα με το σκοπό που έχει κάθε προσομοίωση. Όπως είναι γνωστό η υλοποίηση ολόκληρου του αντιστροφέα αυξάνει δραματικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μεγάλη μνήμη, υπολογιστική ισχύς και χρόνος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

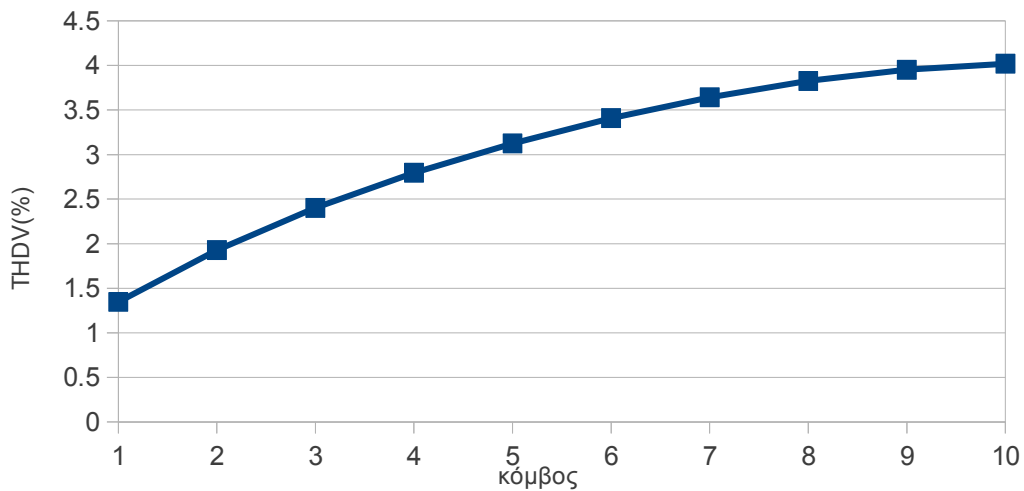


Εικόνα 6-6: Το ακτινικό όπου κάθε αντιστροφέας εισάγεται σαν υπορουτίνα στο PSCAD

α) ένας κλάδος – 10 κόμβοι :

Στην πρώτη απλή περίπτωση θα εξεταστεί ένα δίκτυο με τα ίδια χαρακτηριστικά των προηγούμενων προσομοιώσεων το οποίο όμως θα διαθέτει 10 κόμβους. Η προσομοίωση έγινε χωρίς φορτία καθώς αναζητούνται (τουλάχιστον σε πρώτη φάση) τα χειρότερα δυνατά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

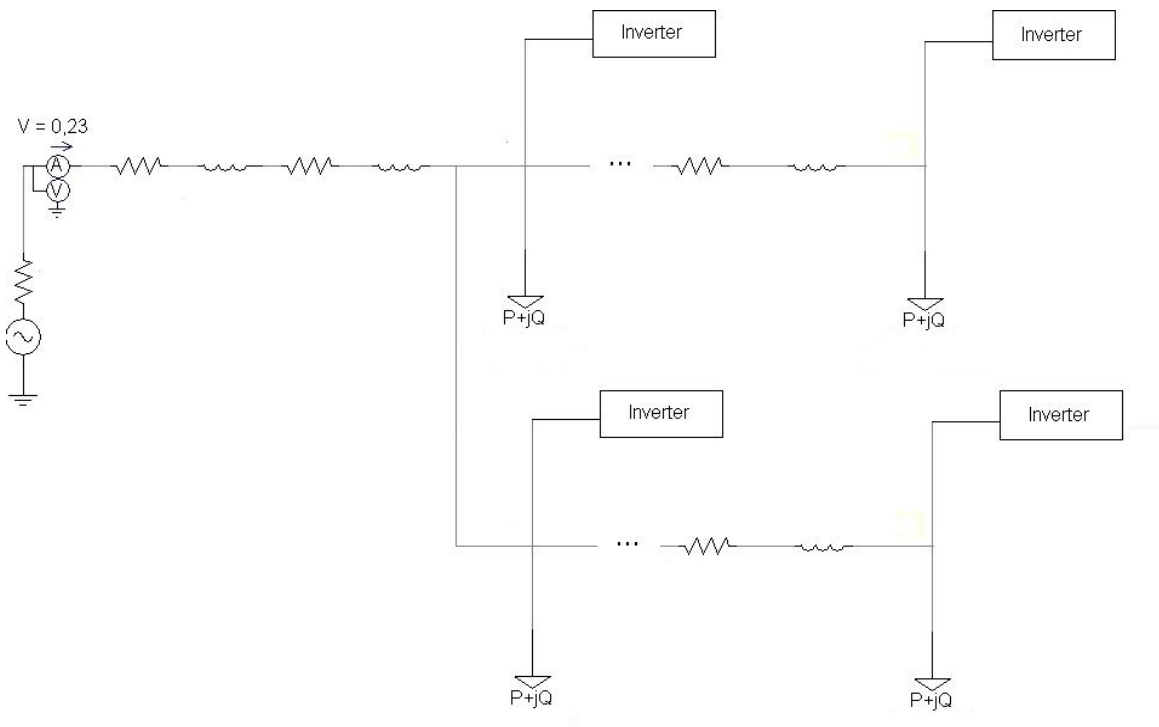
κόμβος	THDI(%)	THDV(%)	VRMS(V)
1	8.97	1.35	231
2	9.12	1.93	232.3
3	9.26	2.40	233.3
4	9.54	2.79	234.5
5	9.75	3.13	235.6
6	9.94	3.41	236.6
7	10.06	3.64	237.8
8	10.30	3.83	238.5
9	10.44	3.95	239.1
10	10.80	4.02	239.7



Γράφημα 6-18: THD της τάσης σε κάθε κόμβο, (ένας κλάδος, 10 κόμβοι)

β) δύο κλάδοι των 10 κόμβων:

Σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο είναι παρόμοιο με το δίκτυο της προηγούμενης περίπτωση με τη διαφορά ότι προστέθηκε άλλος ένας κλάδος των 10 κόμβων παράλληλα στον πρώτο. Τα φορτία ήταν μηδενικά όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην παραμόρφωση της τάσης σε κάθε κόμβο του δικτύου σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.



Εικόνα 6-7: Το ακτινικό δίκτυο δύο κλάδων που προσομοιώθηκε

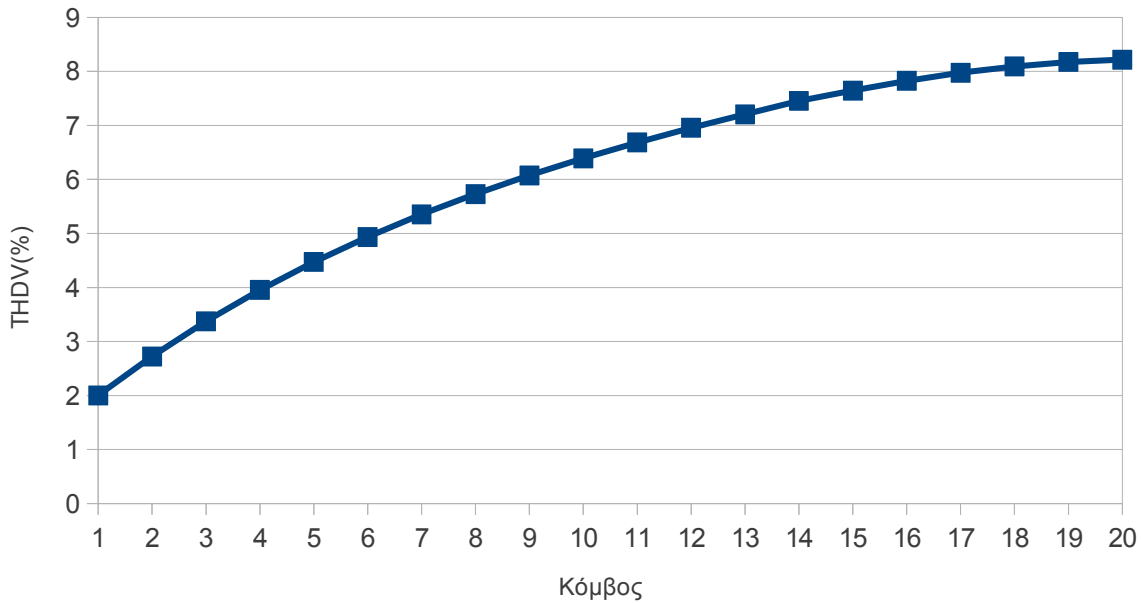
κόμβος	THDV(%) – α κλάδος	THDV(%) – β κλάδος	THDI(%) α κλάδος	THDI(%) β κλάδος
1	1.60	1.60	9.35	9.35
2	2.19	2.19	9.51	9.51
3	2.68	2.68	9.64	9.64
4	3.09	3.09	9.93	9.93
5	3.43	3.43	10.15	10.15
6	3.72	3.72	10.22	10.22
7	3.96	3.96	10.35	10.35
8	4.15	4.15	10.57	10.57
9	4.27	4.27	10.73	10.73
10	4.34	4.34	11.08	11.08

γ) ένας κλάδος με 20 κόμβους

Προκειμένου να φανεί πιο έντονα το πρόβλημα της παραμόρφωσης της τάσης σε αυτό το σενάριο χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες γραμμές αλλά το μήκος τους μεταβλήθηκε στα 45m (οι μισές τιμές ωμικών αντιστάσεων και αυτεπαγωγών) και προστέθηκαν άλλοι 10 κόμβοι. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι για αυξηθούν οι πηγές αρμονικές ρεύματος στο δίκτυο αλλά παράλληλα να μειωθεί η ανύψωση τάσης. Οι προσομοιώσεις έγιναν με μηδενικά φορτία για την καλύτερη δυνατή ανάδειξη του προβλήματος.

κόμβος	THDV	THDI
1	2.00	12.61
2	2.72	12.59
3	3.37	12.56
4	3.96	12.49
5	4.47	12.39
6	4.93	12.31
7	5.35	12.19
8	5.73	12.10
9	6.07	12.36
10	6.39	12.59
11	6.68	13.11
12	6.96	13.10
13	7.21	13.19
14	7.45	13.85
15	7.64	14.94
16	7.82	15.43
17	7.97	15.98
18	8.09	16.13
19	8.17	16.60
20	8.22	16.83

Παρατηρείται ότι στους κόμβους 18 έως 20 υπάρχει παραβίαση του ορίου παραμόρφωσης της τάσης.



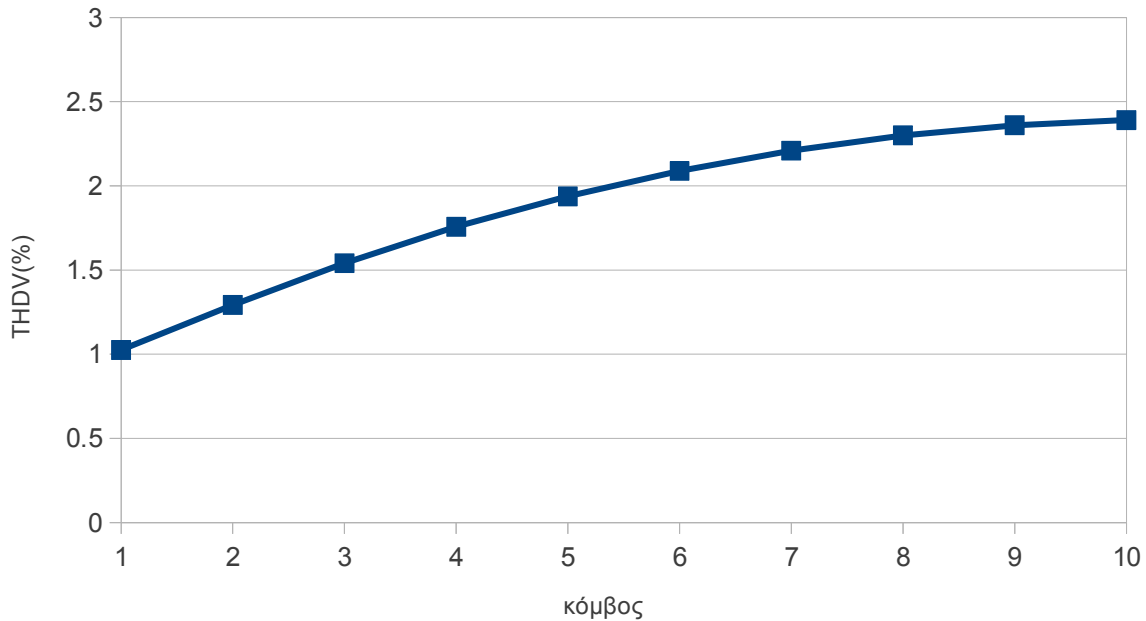
Γράφημα 6-19: THD της τάσης σε κάθε κόμβο, (ένας κλάδος με 20 κόμβους)

δ) ένας κλάδος - 10 κόμβους με γραμμές ίδιου μήκους με αυξημένο λόγο R/X

Επιλέχθηκαν γραμμές ίδιου μήκους με την πρώτη περίπτωση (α) αλλά με διαφορετικό λόγο R/X. Σε όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν εναέριες γραμμές τύπου 4X50 Al με λόγο R/X=1.42. Έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί ποιό θα είναι το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων εάν αντί για τις προηγούμενες γραμμές χρησιμοποιηθούν υπόγεια καλώδια τύπου 3x95Al+35Cu XLPE τα οποία έχουν λόγο R/X>5. Οι συγκεκριμένες γραμμές έχουν χαρακτηριστικά: R=0,410Ω/km και X=0.071Ω/km και όριο φόρτισης 145KVA (τριφασικό)^[41].

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα της παραμόρφωσης της τάσης δεν είναι τόσο σημαντικό σε σχέση με αυτό της ανύψωσης. Συγκεκριμένα το χειρότερο THD της τάσης παραμένει εντός ορίων με διαφορά ενώ η ανύψωση της τάσης βγαίνει εκτός του ορίου που θέτει το EN50160 στους κόμβους 9 και 10.

κόμβος	THDI(%)	THDV(%)	VRMS(V)
1	8.62	1.03	234.2
2	8.66	1.29	238.5
3	8.69	1.54	242.3
4	8.67	1.76	245.6
5	8.65	1.94	248.4
6	8.75	2.09	250.8
7	8.86	2.21	251.8
8	8.97	2.30	252.9
9	9.11	2.36	253.6
10	9.01	2.39	254.5



Γράφημα 6-20: THD της τάσης σε κάθε κόμβο, (ένας κλάδος 10 κόμβοι)

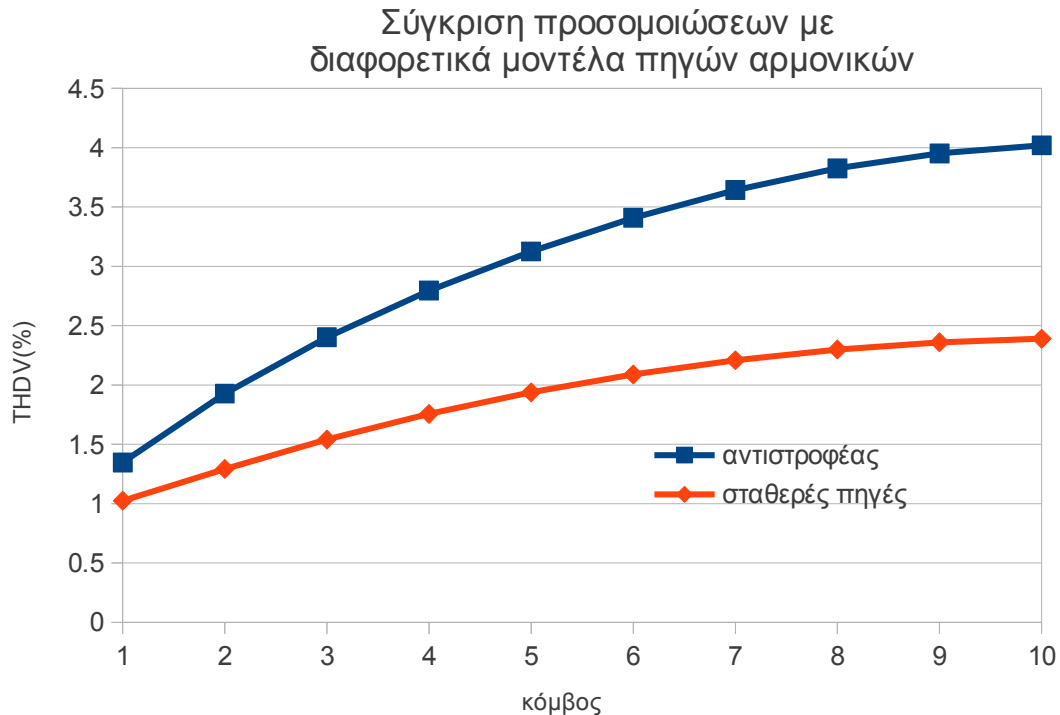
6.5.5 Προσομοίωση με σταθερή πηγή αρμονικών με τα πλάτη και τις φασικές γωνίες του μοντελοποιημένου αντιστροφέα για σύγκριση των αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο σενάριο της προσομοίωσης επιλέχθηκε το δίκτυο της προσομοίωσης 6.5.4.α) (ένας κλάδος, 10 κόμβοι) με τη διαφορά ότι αντικαταστάθηκε ο μοντελοποιημένος αντιστροφέας με πηγή αρμονικών σταθερών πλατών και φασικών γωνιών. Οι τιμές του πλάτους των αρμονικών και των φασικών γωνιών πάρθηκαν από την προσομοίωση του μοντελοποιημένου αντιστροφέα σε σύνδεση με ιδανικό δίκτυο χαμηλής τάσης διαμέσου μιας σύνθετης αντίστασης λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης.

Σκοπός του συγκεκριμένου σεναρίου είναι η διερεύνηση της ακρίβειας που αποδίδει σε μια μελέτη αρμονικών η χρήση του μοντέλου για τις πηγές αρμονικών με σταθερές τις παραμέτρους των αρμονικών σε αντίθεση με την χρήση ενός μοντέλου που υλοποιεί πλήρως το κύκλωμα του εξοπλισμού που παράγει αρμονικές.

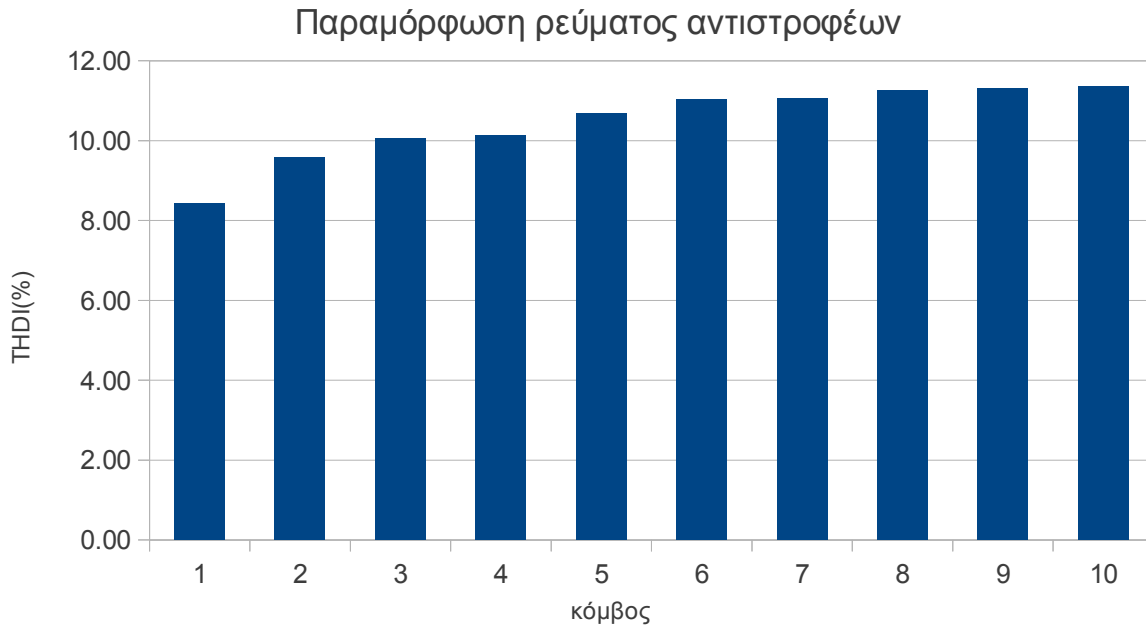
κόμβος	THDI(%)	THDV(%)	VRMS(V)
1	10.54	0.74	231.6
2	10.59	1.07	233.2
3	10.64	1.37	234.6
4	10.69	1.62	236
5	10.72	1.83	237.3
6	10.76	2.01	238.4
7	10.78	2.15	239.6
8	10.80	2.25	240.4
9	10.82	2.32	240.9
10	10.83	2.35	241.5

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι στην προσομοίωση με τις σταθερές πηγές η παραμόρφωση της είναι μικρότερη σχετικά με την προσομοίωση της περίπτωσης 6.5.4.α όπου η πηγή αρμονικών ήταν ο πλήρως μοντελοποιημένος αντιστροφέας. Επίσης, η παραμόρφωση του ρεύματος είναι οριακά ίδια σε όλους τους κόμβους σε αντίθεση πάλι με την περίπτωση 6.5.4.α όπου υπάρχει μια μεγαλύτερη διακύμανση. Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται στην δυναμική συμπεριφορά της εκπομπής αρμονικών ενός αντιστροφέα την οποία δε μπορεί να λάβει υπόψη μια σταθερή πηγή αρμονικών.



Γράφημα 6-21: Σύγκριση παραμόρφωσης της τάσης των περιπτώσεων 4.α και 4.δ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι εκπομπές αρμονικών ρεύματος των αντιστροφών αυξάνονται όσο η τάση στην οποία συνδέονται παραμορφώνεται. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο επόμενο γράφημα όπου παρουσιάζεται το THD ρεύματος κάθε αντιστροφή. Παρατηρείται ότι το αρχικό 5% στο THD ρεύματος που ορίστηκε σε κάθε αντιστροφή έχει ξεπεραστεί. Αυτό οφείλεται στην χειροτέρευση της παραμόρφωσης της τάσης σε κάθε κόμβο καθώς ο αντιστροφείας παράγει ρεύμα με αρμονική παραμόρφωση 5% σε περίπτωση που συνδέεται σε ιδανική πηγή τάσης.



Γράφημα 6-22: THD ρεύματος που παράγει κάθε αντιστροφείας ανάλογα με το σημείο που έχει συνδεθεί.

7. Συμπεράσματα – προοπτικές συνέχισης

Η αναγκαιότητα για υψηλή διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο είναι πλέον πραγματικότητα. Με την αύξηση όμως των συνδέσεων διεσπαρμένης παραγωγής και συγκεκριμένα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, πρέπει να δίνεται πολύ προσοχή στα προβλήματα που προκαλούνται στα δίκτυα διανομής. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το πρόβλημα των αρμονικών στα δίκτυα χαμηλής τάσης.

Η πορεία της εργασίας μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά στην αναθεώρηση των προτύπων ποιότητας ισχύος που σχετίζονται με τις αρμονικές και ειδικότερα για δίκτυα χαμηλής τάσης καθώς επίσης και πρότυπα που αφορούν στις εκπομπές αρμονικών εξοπλισμού που συνδέεται στη χαμηλή τάση. Σε δεύτερο στάδιο έγινε μια μαθηματική διερεύνηση του μηχανισμού δημιουργίας των αρμονικών σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης λόγω διείσδυσης πηγών αρμονικών κατ'αντιστοιχία με την διείσδυση φωτοβολταϊκών αντιστροφών σε ένα πραγματικό δίκτυο ΧΤ. Στη συνέχεια διεξήχθησαν πειράματα μετρήσεων αρμονικών ρεύματος αντιστροφέα: σε διάφορες τιμές ισχύος λειτουργίας, επηρεάζοντας την αρμονική αντίσταση που αντιλαμβάνεται στην έξοδό του και τέλος σε σύνδεση με PWM πηγή τάσης (ως προσομοιωτή δικτύου) όπου μεταβάλλονταν η παραμόρφωση στην τάση. Έγιναν μετρήσεις αρμονικών του εργαστηριακού αντιστροφέα σε συχνότητες από 0kHz έως 100kHz. Επίσης, μετρήθηκε η μεταβολή στην παραμόρφωση του ρεύματος και της τάσης κατά τη σύνδεση PWM πηγής τάσης (ως προσομοιωτή δικτύου) με διαφορετικά γραμμικά φορτία. Ακόμα, μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν οι φασικές γωνίες αρμονικών ρεύματος όμοιων αντιστροφών συνδεδεμένων σε διαφορετικά σημεία του δικτύου (διαφορετικές φάσεις). Τέλος, υλοποιήθηκαν διαφορετικά μοντέλα πηγών αρμονικών (πηγή αρμονικών με εκπομπή αρμονικών σταθερών χαρακτηριστικών, μοντελοποίηση μονοφασικού αντιστροφέα) και προσομοιώθηκαν ποικίλα σενάρια δικτύων χαμηλής τάσης με υψηλή διείσδυση πηγών αρμονικών.

Συγκρίνοντας διαφορετικά πρότυπα που αναφέρονται σε εκπομπές αρμονικών αντιστροφών που συνδέονται στη χαμηλή τάση (IEC61000-03-02 και IEC61727) συμπεραίνεται ότι το πρώτο επιτρέπει πολύ πιο αυξημένες εκπομπές αρμονικών σε σχέση με το δεύτερο για αντίστοιχο εξοπλισμό.

Επίσης παρατηρήθηκε η μη αναφορά των προτύπων ποιότητας ισχύος σε φασικές γωνίες των αρμονικών συνιστωσών σε συνδυασμό με τα πλάτη. Οι φασικές γωνίες, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση των αρμονικών ρεύματος σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης και στην τελική παραμόρφωση τάσης που θα εμφανιστεί.

Παρατηρήθηκε ακόμη ότι οι αρμονικές τάξεων που αντιστοιχούν σε συχνότητες μεγαλύτερες από 2kHz και έως 150kHz, δεν καλύπτονται από τα πρότυπα και άρα σε αυτές τις συχνότητες υπάρχει μία έλλειψη.

Κατά τη μαθηματική ανάλυση του μηχανισμού εισαγωγής αρμονικών στην τάση ενός δικτύου χαμηλής τάσης λόγω των εισαγόμενων αρμονικών ρεύματος πηγών αρμονικών, συμπεραίνεται ότι οι αρμονικές τάσης που θα εμφανιστούν τελικά εξαρτώνται από:

α) Τα πλάτη αρμονικών ρεύματος των πηγών αρμονικών σε συνδυασμό με τις φασικές τους γωνίες.

β) Τα φορτία. Η αντίσταση του φορτίου επηρεάζει την παραμόρφωση στην τάση. Με τις ίδιες αρμονικές εκπομπές ρεύματος η μείωση του μέτρου της σύνθετης αντίστασης του φορτίου (αύξηση του φορτίου) οδηγεί σε μείωση της παραμόρφωσης της τάσης ενώ αντίστοιχα η αύξηση του μέτρου της σύνθετης αντίστασης του φορτίου (δηλαδή μείωση του φορτίου) οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης της τάσης.

γ) Τις ιδιότητες των γραμμών μεταφοράς. Η αύξηση του μήκους μιας γραμμής θα οδηγήσει σε αύξηση του μέτρου της σύνθετης αντίστασής της και επομένως σε περαιτέρω αύξηση της παραμόρφωσης στην τάση (εάν όλες οι άλλες παράμετροι διατηρηθούν σταθερές).

Τα πειράματα μετρήσεων αρμονικών ρεύματος σε εργαστηριακό αντιστροφέα έδειξαν ότι οι εκπομπές αρμονικών εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες:

α) Την αποδιδόμενη ισχύ του. Σημειώθηκαν εκπομπές αρμονικών υψηλότερου πλάτους σε λειτουργία χαμηλότερης αποδιδόμενης ισχύος από τη μέγιστη που καταγράφηκε και γενικότερα η ολική αρμονική παραμόρφωση (THD) του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα αυξάνεται σημαντικά με την μείωση της αποδιδόμενης ισχύος. Μια καλύτερη εκτίμηση του μέτρου της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος που παράγει ο αντιστροφέας λαμβάνεται με την αναγωγή του δείκτη THD στην ονομαστική λειτουργία του αντιστροφέα. Όπως φάνηκε με αυτή τη μέθοδο, η παραμόρφωση του παραγόμενου ρεύματος του αντιστροφέα παρουσίαζε μια διαφορετική συμπεριφορά όσο η αποδιδόμενη ισχύς πλησίαζε την ονομαστική (σε σχέση με τον κανονικό δείκτη THD).

β) Την παραμόρφωση της τάσης του δικτύου στο οποίο συνδέεται. Με την αύξηση της παραμόρφωσης της τάσης που αντιλαμβάνεται ο αντιστροφέας στην έξοδό του αυξάνεται σημαντικά η παραμόρφωση του ρεύματος που αποδίδει.

γ) Την αρμονική αντίσταση δικτύου που αντιλαμβάνεται στα άκρα σύνδεσής του. Μειώνοντας την αρμονική αντίσταση του δικτύου που αντιλαμβάνεται ο αντιστροφέας στην έξοδό του, μετρήθηκαν αρμονικές ρεύματος ελαφρώς μεγαλύτερου πλάτους κυρίως σε υψηλές συχνότητες.

Οι μετρήσεις αρμονικών ρεύματος και τάσης σε αντιστροφέα από 0 έως 100kHz, έδειξαν ότι υπάρχει αρμονικό περιεχόμενο σε αυτές τις συχνότητες και ειδικότερα στο διάστημα από 2 έως 20kHz.

Κατά τη μέτρηση αρμονικών ρεύματος σε αυτές τις συχνότητες στον αντιστροφέα, μετρήθηκαν αυξημένου πλάτους αρμονικές ρεύματος κοντά στη συχνότητα που αντιστοιχεί στην διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα. Στο ίδιο πείραμα διαπιστώθηκε ότι οι συγκεκριμένες

αρμονικές μεταφέρθηκαν και στην τάση.

Σε πειράματα που έγιναν με γραμμικά φορτία, ωμικό-επαγωγικό και ωμικό-χωρητικό σε σύνδεση με PWM πηγή τάσης (ως προσομοιωτής δικτύου), διαπιστώθηκε ότι ο χαρακτήρας του φορτίου επηρεάζει τις αρμονικές στο ρεύμα. Συγκεκριμένα, ο επαγωγικός χαρακτήρας του φορτίου περιορίζει την εμφάνιση αρμονικών στο ρεύμα το φορτίου ενώ αντίθετα ο χωρητικός την επιτείνει.

Κατά τη μέτρηση φασικών γωνιών αρμονικών ρεύματος όμοιων αντιστροφέων βγήκε το συμπέρασμα ότι οι πιο σημαντικές αρμονικές ρεύματος (τουλάχιστον οι πρώτες πέντε μεγαλύτερου πλάτους) σε έναν αντιστροφέα συγκεκριμένου τύπου έχουν κοντινές φασικές γωνίες (με μικρές αποκλίσεις) σε συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας.

Όλες οι προσομοιώσεις έδειξαν (ανεξαρτήτως από το μοντέλο των αρμονικών πηγών που χρησιμοποιήθηκε και τα χαρακτηριστικά του δικτύου), ότι σε ένα ακτινικό δίκτυο χαμηλής τάσης με διείσδυση αρμονικών πηγών ίδιων χαρακτηριστικών, ίσων αποστάσεων γραμμών και ίδια παραγωγή και κατανάλωση σε κάθε κόμβο του δικτύου, η χειρότερη παραμόρφωση της τάσης θα είναι στο πιο απομακρυσμένο σημείο του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, η παραμόρφωση στο ρεύμα των γραμμών παρέμενε σε ίδια επίπεδα, σε όλες τις γραμμές που συνδέουν τους κόμβους, στα σενάρια όπου χρησιμοποιούνταν οι σταθερές πηγές ως πηγές αρμονικών ενώ υπήρχε μικρή διαφοροποίηση όταν χρησιμοποιούνταν ο πλήρως μοντελοποιημένος αντιστροφέας. Στην περίπτωση που προσομοιώθηκε ακτινικό δίκτυο δύο όμοιων κλάδων η παραμόρφωση στην τάση του κόμβου και στο ρεύμα της γραμμής ήταν ίδια μεταξύ κόμβων των δύο κλάδων με την ίδια απομάκρυνση από το σημείο σύνδεσης με τη μέση τάση.

Το πρότυπο IEC61000-03-02 ορίζει απαιτήσεις για την σύνδεση εξοπλισμού στο δίκτυο χαμηλής τάσης με τις εκπομπές αρμονικών που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3. Οι προσομοιώσεις όμως έδειξαν ότι μια αυξημένη διείσδυση εξοπλισμού που συμμορφώνεται με το συγκεκριμένο πρότυπο θα οδηγήσει σε σημαντική παραμόρφωση της τάσης και συγκεκριμένα θα την θέσει εκτός ορίων σύμφωνα με το πρότυπο EN50160.

Από την άλλη πλευρά, το πρότυπο IEC61727 θέτει πιο αυστηρούς περιορισμούς στις εκπομπές αρμονικών με αποτέλεσμα αντιστροφείς που πληρούν τους κανονισμούς που θέτει να δημιουργούν μικρότερο πρόβλημα στην παραμόρφωση της τάσης του δικτύου. Βέβαια, στις προσομοιώσεις κατασκευάστηκε δίκτυο στο οποίο υπάρχει υψηλή διείσδυση αντιστροφέων που τηρούν τις προϋποθέσεις που θέτει το πρότυπο αλλά δημιουργείται τελικά πρόβλημα στην παραμόρφωση της τάσης του δικτύου.

Από προσομοιώσεις σεναρίων με ίδια φορτία και πηγές αρμονικών αλλά διαφορετικών χαρακτηριστικών γραμμών συμπεραίνεται ότι: η ωμική

αντίσταση της γραμμής σχετίζεται πιο άμεσα με το πρόβλημα της ανύψωσης της τάσης ενώ η επαγωγική αντίσταση της γραμμής με το πρόβλημα των αρμονικών. Με την αύξηση της επαγωγικής αντίστασης της γραμμής οι αρμονικές στην τάση εντείνονται ενώ με την μείωσή της μειώνονται σημαντικά. Ανάλογα με τον τύπο του αγωγού και άρα τον λόγο R/X της γραμμής καθορίζεται εάν στο δίκτυο θα εμφανιστεί πιο έντονο το πρόβλημα της ανύψωσης της τάσης ή της αρμονικής παραμόρφωσης.

Από τις προσομοιώσεις των ίδιων σεναρίων με διαφορετικά μοντέλα αρμονικών πηγών, βγήκε το συμπέρασμα ότι εφόσον υπάρχουν πολλές διακριτές πηγές αρμονικών στο δίκτυο που προσομοιώνεται, πρέπει να γίνεται μελέτη της κατανομής των φασικών γωνιών των αρμονικών ρεύματος. Προσομοιώσεις με σταθερές πηγές μπορούν να αποδώσουν ένα προσεγγιστικό αποτέλεσμα. Από την άλλη μια πλήρης μοντελοποίηση του εξοπλισμού που εισάγει τις αρμονικές θα είναι πιο ακριβής, αφού θα συμπεριλαμβάνεται στην επίλυση του προβλήματος η όποια δυναμική μεταβολή στις φασικές γωνίες καθώς και στα πλάτη των αρμονικών ρεύματος.

Η προσομοίωση με σταθερές πηγές αρμονικών είναι πιθανόν να δώσει αποτελέσματα με μικρότερη παραμόρφωση στην τάση σε σχέση με την προσομοίωση με υλοποιημένους τους αντιστροφείς, καθώς στη δεύτερη προσμετράται και η επιδείνωση της αρχικής εκπομπής τους λόγω της σταδιακής αύξησης στην παραμόρφωση της τάσης στην οποία συνδέονται. Τροχοπέδη αποτελεί όμως, όσον αφορά στις προσομοιώσεις με πλήρως υλοποιημένο τον εξοπλισμό που εισάγει τις αρμονικές, η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος.

Ως βελτίωση των μοντέλων των πηγών αρμονικών ρεύματος σταθερών χαρακτηριστικών προτείνεται η υλοποίηση πηγής αρμονικών η οποία θα εισάγει τα χαρακτηριστικά αρμονικών (πλάτη και φασικές γωνίες) από πραγματικές πηγές αρμονικών των οποίων οι κυματομορφές έχουν καταγραφεί σε πραγματικό δίκτυο σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας αλλά και παραμόρφωσης της τάσης στην οποία συνδέονται. Με αυτό τον τρόπο εκτιμάται ότι θα είναι δυνατή η εξαγωγή ρεαλιστικών συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις χωρίς να είναι απαραίτητη μια πλήρης μοντελοποίηση της συσκευής.

Μια ακόμη σημαντική προοπτική συνέχισης είναι η διενέργεια μελέτης αρμονικών σε τριφασικά δίκτυα και η περαιτέρω διερεύνηση της πρότασης της ισοδυναμίας μεταξύ μιας τριφασικής ανάλυσης και της ανάλυσης στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα. Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα είναι η επέκταση των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν στην παρούσα εργασία και για τη μέση τάση και η διερεύνηση της διάδοσης των αρμονικών που εισάγονται από τη χαμηλή τάση στη μέση.

Βιβλιογραφία

- [1]:<http://www.eco-info.net>
- [2]:<http://www.iea.org/>
- [3]:<http://www.ypeka.gr>
- [4]:<http://www.sunlightelectric.com>
- [5]:“Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Δέρβος Κ.Θ., έκδοση ΕΜΠ, 2010
- [6]:“Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος”, N.Mohan, T.Undeland, W.Robbins, 3η έκδοση, 2010
- [7]:“Μαθήματα ειδικής ηλεκτροτεχνίας Γραμμικά Κυκλώματα”, Ε.Ν.Πρωτονοτάριος, Μ.Ε.Θεολόγου, 1999
- [8]:“Βιομηχανικά ηλεκτρονικά”, Σ.Ν.Μανιάς, Α.Καλετσάνος, 2003
- [9]:“Electric Power Quality”, G.T.Heydt, Second Edition, 1994
- [10]:“Power systems harmonics”, J.Arillaga, N.R. Watson, second edition, 2004
- [11]:“Ηλεκτρονικά ισχύος ΙΙ”, Σ.Ν.Μανιάς, έκδοση ΕΜΠ
- [12]:“Electrical Power Systems Quality”, Third Edition, Surya Santoso, Mark F. McGranaghan, Roger C. Dugan, H. Wayne Beaty, 2012
- [13]:“Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems”, Henryk Markiewicz, Antoni Klajn Wroclaw University of Technology, July 2004
- [14]:“IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”, Std 519-1992
- [15]:“Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)”, Standard
- [16]:“CEI EN 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto”, Standard
- [17]:“Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design”, Svein Erik Evju, Master of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2007

- [18]: "PV INVERTER TEST PROCEDURES, DER-lab - JPA 2.2: DER testing procedures", DER-lab
- [19]: <http://www.iec.ch/>
- [20]: "Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις", Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής, Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας
- [21]: <http://www.yokogawa.com/>
- [22]: <http://www.sma-hellas.com>
- [23]: "Results of the OPTINOS Project - Deficits and Uncertainties in Photovoltaic Inverter Test Procedures", J. Kirchhof, G. Klein (Fraunhofer IWES), 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, September 2009, Hamburg, Germany
- [24]: Triphase NV: <http://www.triphase.com>
- [25]: "*Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project*", T. Loix, S. de Breucker, P. Vanassche, J. van den Keybus, J. Driesen and K. Visscher, Proceedings of the IEEE Powertech conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, 2009
- [26]: "*Control of the Single-Phase Three-Leg AC/AC Converter*", Jacobina C.B., Oliveira T.M., da Silva E.R.C., IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no.2, pp. 467-476, 2 April 2006
- [27]: "Harmonic Interaction between Large Numbers of Photovoltaic Inverters and the Distribution Network", Johan H.R. Enslin, Walter T.J. Hulshorst, IEEE Power Tech Conference, Bologna, 2003
- [28]: <http://www.wuerth-solar.de>
- [29]: <https://hvdc.ca/pscad/>
- [30]: "PSCAD/EMTDC User's Manual: Ver.4.2", Manitoba HVDC Research Centre, 2005
- [31]: "Time domain methods for the calculation of harmonic propagation and distortion", C.J. Hatziadoniu, IEEE Catalog 98TP-125-0, 1998
- [32]: "An Overview Of Harmonics Modeling And Simulation ", S. J. Ranade New Mexico State University Las Cruces, NM, USA , W. Xu University of Alberta Edmonton, Alberta, Canada
- [33]: "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις", Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, Αθήνα 1993
- [34]: "Σύνδεση Φωτοβολταϊκών σταθμών στο δίκτυο ΧΤ ", Παρασκούδης Π.

Πασχάλης

[35]: "Mobile Energy Resources in grids of electricity", Project Merge, Mohsen Ferdowsi, Power Quality Assessment, October 2011

[36]: "PSCAD/EMTDC Model of a 3-Phase Grid Connected Photovoltaic Solar System", Shah Arifur Rahman and Rajiv K. Varma , Electrical and Computer Engineering Department University of Western Ontario

[37]: <http://www.der-lab.net/>

[38]: "The FFT-an algorithm the whole family can use", Daniel N. Rockmore, Departments of Mathematics and Computer Science, October 11, 1999

[39]: "Έλεγχος AC/DC/AC Μετατροπέα Τριών Κλάδων για Λειτουργία Ενισχυτή σε Προσομοίωση Πραγματικού Χρόνου", Αλέξανδρος Ρήγας, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

[40]: "Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου", Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

[41]: "Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ. ", Χρήστος Ε. Γκιλφέςης, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

[42]: "Ηλεκτρολογική εγκατάσταση και μετρητικό σύστημα φωτοβολταϊκού σταθμού μικρής ισχύος ", Γεώργιος Α. Γιαννακόπουλος , Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

[43]: <http://www.elot.gr/>