



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μείωση των αρμονικών στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναστάσιος Αχελωνούδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Οκτώβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

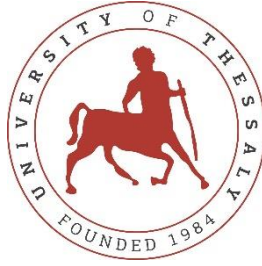
Μείωση των αρμονικών στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναστάσιος Αχελωνούδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Mitigation of harmonics in smart grid energy systems.

MSc Thesis

Anastasios Achelonoudis

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

October 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Δημήτριος Μπαργιώτας

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Αλέξανδρος Χροναίος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Ασπασία – Καλλιόπη Δασκαλοπούλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Αναστάσιος Αχελωνούδης

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this MSc thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Anastasios Achelonoudis

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα για την εμπιστοσύνη του σε εμένα και την προσφορά του σε χρήσιμες πληροφορίες όπου η παρούσα διπλωματική δεν θα είχε διεκπεραιωθεί χωρίς αυτές. Επιπρόσθετα, να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της επιτροπής κύριο Αλέξανδρο Χροναίο και την κυρία Ασπασία – Καλλιόπη Δασκαλοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια, τα πολλαπλά σχόλια και την δημιουργική παρέμβασή τους.

Επιπλέον οφείλω να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου από την εταιρεία που εργάζομαι (ΣΑΜΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Π.Ε) για την εξειδίκευση και την βοήθεια που με παρείχαν.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη της οικογένειάς μου αλλά και τους φίλους μου για την ηθική, ψυχολογική, υλική υποστήριξη όλων αυτών τον καιρό μέχρι αλλά και μετά το πέρας αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Μείωση των αρμονικών σε ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

Αναστάσιος Αχελωνούδης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκινάει με το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο όπου μας καθοδηγεί στο πώς θα εξελιχθεί η θεματολογία της διπλωματικής εργασίας πια φαινόμενα απασχολούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και ποια προβλήματα μπορεί να αντιμετωπίζουν τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθώντας στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται βιβλιογραφικά η θεωρία για να έχουμε μια εικόνα για την μελέτη των αρμονικών, τα προβλήματα ύπαρξης αρμονικών, τους δείκτες που περιγράφουν την αρμονική παραμόρφωση και την ποιότητα ισχύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο επίσης βιβλιογραφικά αναφέρονται οι τεχνικές εξάλειψης αρμονικών από παθητικά ενεργά φίλτρα συνδυασμούς αυτών, όπως και άλλων συστημάτων και μετατροπέων 6,8,12 και 18 παλμών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η προσομοίωση ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο διανέμει σε διάφορα φορτία ορισμένα από αυτά πλούσια σε αρμονικό περιεχόμενο, με σκοπό να δούμε πόσο σημαντική είναι η μελέτη των αρμονικών στο δίκτυο και κυρίως σε καταναλώσεις όπου παράγουν αυξημένα αρμονικά ρεύματα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα όπου επηρεάζουν αρνητικά τα ευφυή δίκτυα και οικονομικά και λειτουργικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο ως συμπεράσματα, τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποσκοπούν στην σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και καταγραφή της σε κάθε σημείο του χρόνου διασφαλίζοντας παράλληλα την ποιοτική λειτουργία του δικτύου και την συνακόλουθη εξοικονόμηση ενέργειας.

Λέξεις-κλειδιά:

Αρμονικές, φίλτρα, ευφυή δίκτυα, ΑΠΕ

Mitigation of harmonics in smart grid energy systems.

Anastasios Achelonoudis

Abstract

This thesis begins with the first introductory chapter where it guides us on how the topic of the thesis will evolve, how affecting electricity systems and what problems smart grids may face. In addition, in the second chapter, everything we need to know about the analysis of harmonics, the problems of existence of harmonics, the indicators that describe harmonic distortion and power quality is developed bibliographically.

The third chapter also bibliographically mentions the techniques for eliminating harmonics from passive active filters combinations of these, as well as other systems and converters 6,8,12 and 18 pulses.

In the fourth chapter the simulation of an electrical grid is carried out in which it distributes to various loads some of them rich in harmonic current, in order to see how important, the study of harmonics in the network is and especially in loads where they produce increased harmonic currents resulting in the creation of problems where they negatively affect smart grids both economically and operationally.

In the fifth chapter as conclusions, the smart grids aims at the stable supply of electricity and its recording at every point of time while ensuring the quality operation of the grid and the consequent energy savings.

Keywords: Harmonics, filters, smart grids, RES

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	vi
Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
Κατάλογος Διαγραμμάτων	xv
Συντομογραφίες	xvii
Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 ^ο Αρμονικές στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Τάξη αρμονικών.....	5
2.3 Ανάλυση ανώτερων αρμονικών	6
2.3.1 Σειρές Fourier	6
2.3.2 Μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου	8
2.3.3 Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου	8
2.3.4 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier.	9
2.3.5 Αλγόριθμοι Fast Fourier Transform.	9
2.3.6 Φασματογράφημα του σήματος.	10
2.4 Ακολουθία αρμονικών φάσεων.....	11
2.4.1 Τριπλές αρμονικές.....	12
2.5 Δείκτες που περιγράφουν την αρμονική παραμόρφωση	12
2.5.1 Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD).....	13
2.5.2 Ολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος προς μέγιστο ρεύμα φορτίου (TDD)	15
2.5.3 Συντελεστής κορυφής (Crest Factor)	15
2.5.4 Συντελεστής K (K Factor)	16
2.5.5 Συντελεστής ισχύος από την ολική αρμονική παραμόρφωση	16
2.6 Αιτίες παραγωγής αρμονικών	17
2.7 Προβλήματα ύπαρξης αρμονικών στα ευφυή δίκτυα	20
2.7.1 Αυξημένες θερμικές απώλειες.....	22
2.7.2 Αυξημένα ρεύματα σε διατάξεις πυκνωτών αντιστάθμισης.....	23

2.7.3 Παραμόρφωση τάσης του δικτύου διανομής	24
2.7.4 Επίδραση αρμονικών στις ηλεκτρικές μηχανές.....	24
2.8 Ποιότητα ισχύος	25
2.8.1 Ασυμμετρία τάσης	26
2.8.2 Διαρκείς διαταραχές τάσης	27
2.8.3 Υπόταση μακράς διάρκειας	28
2.8.4 Υπερτάσεις μακράς διάρκειας	29
2.8.5 Υπερτάσεις μικρής διάρκειας	30
2.8.6 Βυθίσεις τάσης.....	31
2.8.7 Διακοπές Τάσης.....	32
2.8.8 Διακυμάνσεις τάσης.....	32
2.8.9 Θόρυβος.....	33
2.8.10 Μεταβατικές υπερτάσεις.....	34
Κεφάλαιο 3 ^ο Τεχνικές εξάλειψης αρμονικών ρεύματος.....	36
3.1 Τεχνικές εξάλειψης αρμονικών και μείωση του προβλήματος	36
3.2 Παθητικά φίλτρα	36
3.3 Ενεργά φίλτρα.....	41
3.4 Κατηγορίες ενεργών φίλτρων.....	43
3.4.1 Σύνθετοι ρυθμιστές ποιότητας ισχύος	45
3.4.2 Υβριδικά ενεργά φίλτρα.....	46
3.4.3 Ενεργά φίλτρα συνδεσμολογίας σειράς	48
3.4.4 Ενεργά φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας.....	49
3.5 Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς και πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης	49
3.5.1 Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς	50
3.5.2 Πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης	51
3.5.3 Μεταβατικές διαταραχές της τάσης με εναλλασσόμενο πηνίο σειράς και πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης.....	53
3.6 Μείωση αρμονικών με μετατροπέα 12 και 18 παλμών.....	53
Κεφάλαιο 4 ^ο Προσομοίωση δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.....	59
4.1 Εισαγωγή.....	59
4.2 Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	60

4.3 Ολική αρμονική παραμόρφωση του δικτύου χωρίς φίλτρο	62
4.4 Ολική αρμονική παραμόρφωση με ένα παθητικό φίλτρο	68
4.5 Ολική αρμονική παραμόρφωση με δύο παθητικά φίλτρα	74
4.6 Σύγκριση όλων των ζυγών με τον ζυγό PCC χωρίς χρήση φίλτρων	79
4.7 Σύγκριση ζυγών με ένα και με δύο φίλτρα	83
4.7.1 Σύγκριση μεταξύ ζυγών χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο	84
4.7.2 Σύγκριση μεταξύ ζυγών χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	87
Κεφάλαιο 5 ^ο Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα.....	91
5.1 Γενικά.....	91
5.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα της προσομοίωσης	92
5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	94
Βιβλιογραφία.....	95

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Ανάλυση μιας παραμορφωμένης κυματομορφής στις αρμονικές συνιστώσες της θεμελιώδους, της πέμπτης και της έβδομης κυματομορφής (Chan – Ki et al., 2009)	7
Εικόνα 2. Κυματομορφές ρεύματος διαφόρων μη γραμμικών φορτίων (Κιοσκερίδης, 2019)	18
Εικόνα 3. Διαφορά πλάτους ανάμεσα φάσεων σε περίπτωση ασυμμετρία τάσης (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/what-is-voltage-unbalance/)	27
Εικόνα 4. Διαταραχές τάσης ανά κατηγορία χρονικής διάρκειας (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/).....	28
Εικόνα 5. Υπόταση μακράς διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Undervoltage) (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/).....	29
Εικόνα 6. Υπέρταση μακράς διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Overvoltage) (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/).....	30
Εικόνα 7. Υπερτάσεις μικρής διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Swell) (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/).....	31
Εικόνα 8. Βύθιση τάσης σε σχέση με τον χρόνο (Sag) (Engineers Hub - https://engineershub.co.in/).....	32
Εικόνα 9. Διακύμανση τάσης και "τρεμόπαιγμα" φωτός (Salih et al., 2013)	33
Εικόνα 10. Το φαινόμενο του θορύβου στα ηλεκτρικά σήματα στην τάση σε σχέση με τον χρόνο (Salih et al., 2013)	34
Εικόνα 11. Κρουστικές υπερτάσεις και αποσβεννύμενη ταλάντωση σε σχέση με τον χρόνο (Heydt, 2010).....	35
Εικόνα 12. Συντονισμένα παθητικά φίλτρα για συγκεκριμένες τάξης αρμονικών (Λαμπρίδης κ. ά, 2006).....	37
Εικόνα 13. Α) Παθητικό παράλληλο φίλτρο, Β) Παθητικό φίλτρο σειράς (Conti et al., 2006)	38
Εικόνα 14. Παθητικό συντονισμένο φίλτρο - Αρχή λειτουργίας του (Μπιτζιώνης & Μπιτζιώνης, 2011).....	40
Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου (Μπιτζιώνης & Μπιτζιώνης, 2011)	41
Εικόνα 16. Συνδεσμολογία ενεργού φίλτρου πηγής τάσης (Das, 2015).....	44
Εικόνα 17. Συνδεσμολογία ενεργού φίλτρου πηγής ρεύματος (Das, 2015)	44
Εικόνα 18. Γενικό κύκλωμα ενός σύνθετου ρυθμιστή ποιότητας ισχύος (UPQC) (Chan –Ki et al., 2009).....	45
Εικόνα 19. Ενεργό και παθητικό φίλτρο παράλληλης συνδεσμολογίας (Chan –Ki et al., 2009).....	46
Εικόνα 20. Ενεργό φίλτρο σειράς και παθητικό φίλτρο σε παράλληλη συνδεσμολογία (Chan –Ki et al., 2009).....	47
Εικόνα 21. Ενεργό φίλτρο σειράς και παθητικό φίλτρο σε συνδεσμολογία σειράς (Chan –Ki et al., 2009).....	47
Εικόνα 22. Ενεργό φίλτρο συνδεσμολογίας σειράς (Chan –Ki et al., 2009)	48

Εικόνα 23. Ενεργό φίλτρο παράλληλης συνδεσμολογίας (Chan –Ki et al., 2009).....	49
Εικόνα 24. (AC line reactor) τοποθετημένος πριν από τον ανορθωτή του οδηγού (Sato et al., 2015)	50
Εικόνα 25. (DC link choke) τοποθετημένο μεταξύ ανορθωτή οδηγού και φίλτρου πυκνωτή (Sato et al., 2015).....	52
Εικόνα 26. Σύστημα AFD (VFD) με μετατροπέα 12 παλμών (Sato et al., 2015)	54
Εικόνα 27. Μετατροπέας 18 παλμών με την κυματομορφή του ρεύματος εισόδου (Sato et al., 2015)	55
Εικόνα 28. Μείωση αρμονικών για κάθε μετατροπέα 6, 12, 18 παλμών αντίστοιχα (Masoum et al., 2010)	56
Εικόνα 29. Σχετική ανάλυση αγοράς μετατροπέων 6 παλμών, με ή χωρίς φίλτρο, σε σχέση με μετατροπείς 12 και 18 παλμών με Μ/Σ (Masoum et al., 2010).....	57
Εικόνα 30. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	61
Εικόνα 31.Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς φίλτρα.....	63
Εικόνα 32. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με ένα παθητικό φίλτρο.....	69
Εικόνα 33. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με δύο παθητικά φίλτρα	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός ενεργού φίλτρου.....	43
Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός εναλλασσόμενο πηνίου σειράς.....	51
Πίνακας 3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός πηνίου συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης.....	52
Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός μετατροπέα 12 παλμών.....	54
Πίνακας 5. Οφέλη και μειονεκτήματα ενός μετατροπέα 18 παλμών	55
Πίνακας 6. Πίνακας ποσοστού μείωσης του ρεύματος THD σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες τεχνικές μείωσης	57
Πίνακας 7. Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων μείωσης των ποσοστών ρεύματος THD	58
Πίνακας 8. Ολική αρμονική παραμόρφωση του δικτύου χωρίς φίλτρο	62
Πίνακας 9. Ολική αρμονική παραμόρφωση με ένα παθητικό φίλτρο	70
Πίνακας 10. Σχεδιασμός παθητικού φίλτρου	70
Πίνακας 11. Ολική αρμονική παραμόρφωση με δύο παθητικά φίλτρα	74
Πίνακας 12. Σχεδιασμός του δεύτερου παθητικού φίλτρου	76

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Σύνθετη αντίσταση σε όλους τους ζυγούς (συζεύξεις χωρίς φίλτρο)	64
Διάγραμμα 2. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης χωρίς φίλτρο	64
Διάγραμμα 3. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης χωρίς φίλτρο	65
Διάγραμμα 4. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας χωρίς φίλτρο	65
Διάγραμμα 5. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας χωρίς φίλτρο	66
Διάγραμμα 6. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου χωρίς φίλτρο	66
Διάγραμμα 7. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου χωρίς φίλτρο	67
Διάγραμμα 8. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού χωρίς φίλτρο	67
Διάγραμμα 9. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού χωρίς φίλτρο	68
Διάγραμμα 10. Αντίσταση σε όλους τους ζυγούς συζεύξεις με ένα παθητικό φίλτρο	71
Διάγραμμα 11. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης με ένα παθητικό φίλτρο	71
Διάγραμμα 12. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας με ένα παθητικό φίλτρο	72
Διάγραμμα 13. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου με ένα παθητικό φίλτρο	72
Διάγραμμα 14. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού με ένα παθητικό φίλτρο	73
Διάγραμμα 15. Αντίσταση σε όλους τους ζυγούς συζεύξεις με δύο παθητικά φίλτρα	76
Διάγραμμα 16. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης με δύο παθητικά φίλτρα	77
Διάγραμμα 17. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας με δύο παθητικά φίλτρα	77
Διάγραμμα 18. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου με δύο παθητικά φίλτρα	78
Διάγραμμα 19. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού με δύο παθητικά φίλτρα	78
Διάγραμμα 20. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό υποσταθμού βιομηχανίας – Χωρίς φίλτρο	79
Διάγραμμα 21. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό κινητήρα συνεχούς ρεύματος – Χωρίς φίλτρο	80

Διάγραμμα 22. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος – Χωρίς φίλτρο	80
Διάγραμμα 23. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό υποσταθμού αιολικού πάρκου – Χωρίς φίλτρο	81
Διάγραμμα 24. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό εμπορικού υποσταθμού – Χωρίς φίλτρο	81
Διάγραμμα 25. Σύγκριση σύνθετων αντιστάσεων όλων των ζυγών με χωρίς, με ένα και με δύο παθητικά φίλτρα	83
Διάγραμμα 26. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό PCC χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο	84
Διάγραμμα 27. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό βιομηχανίας χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.....	84
Διάγραμμα 28. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο	85
Διάγραμμα 29. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο	85
Διάγραμμα 30. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό αιολικού πάρκου χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο	86
Διάγραμμα 31. Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση στον Εμπορικό ζυγό χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.....	86
Διάγραμμα 32. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό PCC χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	87
Διάγραμμα 33. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό βιομηχανίας χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	87
Διάγραμμα 34. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	88
Διάγραμμα 35. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	88
Διάγραμμα 36. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό αιολικού πάρκου χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	89
Διάγραμμα 37. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στον εμπορικό ζυγό χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα	89

Συντομογραφίες

AC:	Alternating Current
BPF:	Band Pass Filter
CTFS:	Continuous Time Fourier Series
DC:	Direct Current
DFT:	Discrete Fourier Transform
DTFT:	Discrete Time Fourier Transform
FFT:	Fast Fourier Transform
HAF:	Hybrid Active Filter
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards
MOV:	Metal Oxide Varistor
PCC:	Point of Common Coupling
PWHD:	Partial Weighted Harmonic Distortion
SAF:	Shunt Active Filter, Series Active Filter
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition
SPD:	Surge Protection Device
STFT:	Short Time Fourier Series
TDD:	Total Demand Distortion
THD:	Total Harmonic Distortion
THDi:	Total Harmonic Distortion Current
THDv:	Total Harmonic Distortion Voltage
UPQC:	Unified Power Quality Conditioner
UPS:	Uninterruptible power supply
VFD:	Variable Frequency Drive
VFF:	Voltage Fluctuations and Flicker
VSD:	Variable speed Drive
ΑΠΕ:	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Μ/Σ:	Μετασχηματιστές
Υ.Τ:	Υψηλή Τάση
Χ.Τ:	Χαμηλή Τάση

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή

Μερικά από τα σπουδαιότερα ζητήματα που θα πρέπει να διαχειριστούν οι υπεύθυνοι των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διατήρηση της τάσης και ισχύς σε κάθε ζυγό του δικτύου στα επιτρεπτά όρια. Αν και τα ηλεκτρικά δίκτυα αντιμετώπιζαν αρχικά μόνο μεταβατικά προβλήματα όπως υπόταση, υπέρταση κ.λπ. η αρχή της αξιόπιστης διανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε σε αντιστάθμιση της άεργους ισχύος, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση επιπρόσθετων διαταραχών στο δίκτυο [1],[2]. Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα σχετίζεται με την επίδραση της αξιοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), με την έγχυση άεργης ισχύος να έχει άμεσο αντίκτυπο στην τάση του δικτύου και, κατ' επέκταση, στη λειτουργία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού [3].

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν μια βιώσιμη πρόταση στην υφιστάμενη κρίση ενέργειας σε ολόκληρο τον κόσμο, λόγω της εξάντλησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και του αυξανόμενου κόστους που συνδέεται με αυτήν. Το γεγονός αυτό, απαιτεί στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να διαθέτει την απαιτούμενη ενεργή ισχύς, η οποία τοποθετείται για να ανταποκριθεί σε λειτουργίες όπως είναι η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας, της άεργου ισχύος, όπως και των αρμονικών ρευμάτων. Από την άλλη πλευρά, για τους μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο, οι αρμονικές που παράγονται από αυτούς οδηγούν σε ένα νέο κύκλο ερευνητικών προβλημάτων και επιζητούμενων λύσεων. Το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά και τις αρμονικές τάσης του δικτύου. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, τα οποία έχουν ως γενεσιουργό αιτία τους τις αρμονικές συνιστώσες ρεύματος, καθιστά απαραίτητη τον μετριασμό τους με κατάλληλες τεχνικές, προκειμένου να επιτευχθεί ισχύς καλύτερης ποιότητας στο δίκτυο. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα όρια ελέγχου για την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion - THD) σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, όπως το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών IEEE 519 (Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης CENELEC EN 50160 (European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC). Όπου υπάγονται όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες. Με δεδομένο ότι η συχνότητα και η ένταση δημιουργίας αυτών των προβλημάτων

αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, οι προσπάθειες μετασχηματισμού των υφιστάμενων δικτύων σε έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ολοένα εντείνονται [4].

Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι η χρήση τεχνικών του κλάδου των τηλεπικοινωνιών και της πληροφορικής, με στόχο τη συνεχή εποπτεία της λειτουργικής κατάστασής τους, καθώς και την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών για τον έλεγχό τους, ενώ, παράλληλα, προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες ελέγχου, στην προσπάθεια της αποτελεσματικής αντιμετώπισης των τεχνικών προβλημάτων που προκύπτουν από τη ένωση των μονάδων διανεμημένης ηλεκτρικής παραγωγής στο δίκτυο. Είναι προφανές ότι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των έξυπνων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας διασφαλίζεται από τις αυξημένες δυνατότητες εποπτείας και ελέγχου τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες, το πρόβλημα των αρμονικών ρεύματος και τάσης ξεκίνησε να έχει αισθητή παρουσία κυρίως λόγω της εκτεταμένης χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος στις εργοστασιακές εγκαταστάσεις και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς, όμως, να υπάρχει επαρκής γνώση του φαινομένου αυτού, με αποτέλεσμα να σημειώνονται σημαντικά προβλήματα και δυσλειτουργίες από την ύπαρξή τους στον εξοπλισμό των βιομηχανιών και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Βασική προϋπόθεση για τον έλεγχο των προβλημάτων και την απαλοιφή τους είναι η εκτέλεση ειδικών μετρήσεων μέσω εξειδικευμένων οργάνων και τεχνικών, οπότε να βρεθεί το μέγεθος των αρμονικών ρευμάτων, το οποίο συνοδεύεται κατά βάση από τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου, προκειμένου να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα περιορισμού τους. Αυτό γίνεται συχνά με τη χρήση φίλτρων ή με την αύξηση των ημιαγωγικών στοιχείων των μετατροπέων. Σε κάθε περίπτωση, σε όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και υποσταθμούς θα πρέπει, επιτακτικά, να θεσπιστεί μια τεχνική έκθεση, τεκμηριωμένη στα αποτελέσματα μετρήσεων, ωστόσο να συγκροτηθεί η βέλτιστη πρόταση για την ουσιαστική εξάλειψή του φαινομένου των αρμονικών.

Η ρύθμιση της τάσης έχει ως σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση τόσο των υποτάσεων, όσο και των υπερτάσεων, μέσω του κατάλληλου συντονισμού όλων των στοιχείων ενός έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει δύο βασικές μεθόδους λειτουργίας των μονάδων διανεμημένης παραγωγής. Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται στην εφαρμογή τεχνικών περιορισμένης ενεργής ισχύος, με βασικό της μειονέκτημα την μείωση της συνολικά παραγόμενης ισχύος με άμεσο αρνητικό οικονομικό αντίκτυπο [5]. Η δεύτερη μέθοδος,

που αξιοποιείται ευρέως από τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο έλεγχος της τάσης με την άεργη ισχύ [6]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, μια από τις εφαρμογές της είναι η αξιοποίηση της διαθέσιμης άεργης ισχύος των μονάδων διανεμημένης παραγωγής ως μέσο ελέγχου της τάσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της απορρόφησης άεργης ισχύος από τις μονάδες διανεμημένης παραγωγής, με στόχο τη μείωση της επίδρασης της αντίστροφης ισχύος στην εμφάνιση υπερτάσεων, προκειμένου να αποφευχθεί η μείωση της παραγόμενης ενέργειας [7].

Κεφάλαιο 2° Αρμονικές στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Τον 19° αιώνα ο Γάλλος φυσικό-μαθηματικός Jean Baptiste Fourier δημιούργησε τη θεωρία της ανάλυσης ενός σήματος σε σήματα απλών συχνοτήτων. Ανέπτυξε την ανάλυση μιας σύνθετης εξίσωσης για πρώτη φορά σε άθροισμα συναρτήσεων απλών συχνοτήτων, για να ερευνήσει φαινόμενα διάδοσης συχνότητας και ύστερα αποτύπωσε πως μια περιοδική μη τριγωνομετρική συνάρτηση με ακριβείς συχνότητα f γίνεται να αποδοθεί ως σύνολο τριγωνομετρικών συναρτήσεων με συχνότητες πολλές φορές πάνω της συχνότητας f .

Η γρήγορη και μεγάλη πρόοδος της τεχνολογίας την σήμερα ημέρα έχει ως επίπτωση την, όλο και γρηγορότερη, αξιοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος, όπως είναι οι μετατροπείς και οι ηλεκτρονικές συσκευές, στην βιομηχανία της οικονομίας και της βιομηχανίας, όσο και στην προσωπική ζωή. Η αξιοποίηση καθώς των ορισμένων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν αρμονικές ρεύματος, οι οποίες «μολύνουν» το δίκτυο διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προκαλώντας αρμονικές στην τάση [8].

Το γεγονός αυτό, συνεπάγεται στη χειροτέρευση της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το φαινόμενο αυτό προβλέπει αναγκαστική την ανάγκη εφεύρεσης οδών για την μείωση των αρμονικών τάσης και ρεύματος από τα δίκτυα διανομής, μεταφοράς, καθώς και στην έξοδο των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος.

Η παρουσία αρμονικών στο ρεύμα και στην τάση εμπίπτει πρωτίστως στην ύπαρξη μη γραμμικών καταναλώσεων, όπου το ρεύμα έχει ανόμοια κυματομορφή από αυτήν της τάσης. Η τάση σε σχέση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που δημιουργούνται σε ένα μέρος διαδίδονται και γίνετε να προκαλέσουν θέματα στους καταναλωτές, καθιστώντας την λειτουργία τους μη λειτουργική, ενώ, σε μερικές περιπτώσεις καθίσταται λειτουργική, με μεγάλες απώλειες.

Η θεμελιακή αρμονική (χρήσιμη) έχει συχνότητα f ή $2f$, $3^{\text{η}} = 3f$ και η n έχει συχνότητα nf . Στην Ευρώπη, όπως και στην Ελλάδα, η θεμελιακή αρμονική έχει συχνότητα 50Hz, $2^{\text{η}} = 100\text{Hz}$ και η $3^{\text{η}} = 150\text{Hz}$. Από την άλλη πλευρά, στις ΗΠΑ και σε αντίστοιχες χώρες, όπου η θεμελιακή αρμονική έχει συχνότητα δικτύου 60Hz, η $2^{\text{η}}$ έχει 120Hz και η $3^{\text{η}} = 180\text{Hz}$.

Ορίζεται ότι ανεξαρτήτως περιοδικής απόκλισης από την εντελώς ημιτονοειδή καμπύλη της τάσης μπορεί να απεικονιστεί με ένα σύνολο από καθαρά συνημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ως πολλαπλάσια αυτής. Η $1^{\text{η}}$ αρμονική, ονομάζεται

θεμελιακή αρμονική ή θεμελιώδης συχνότητα. Μία ημιτονοειδής κυματομορφή με συχνότητα i συχνά μεγαλύτερη από τη $1^{\text{η}}$ αρμονική [το i είναι ακέραιος αριθμός (integer)] ονομάζεται αρμονική διαταραχή. Η σχέση ανάμεσα της ανώτερης αρμονικής συχνότητας και της θεμελιώδους αρμονικής συχνότητας ονομάζεται τάξη της αρμονικής.

2.2 Τάξη αρμονικών

Η τάξη αρμονικών (n) παραπέμπει στις διάσπαρτες συχνότητες όπου διαμορφώνουν μία κυματομορφή. Για σύνοψη, ο συμβολισμός $n=6$ παραπέμπει στην $6^{\text{η}}$ αρμονική και η συχνότητά της είναι ίση με την εξαπλάσια συχνότητα της θεμελιώδους, συγκεκριμένα της $1^{\text{ης}}$ αρμονικής: $f_n = n * f_1$. Επικεντρώνουμε παραπάνω στην τάξη της αρμονικής, όχι τόσο στη συχνότητά της, επειδή οι συχνότητες ρεύματος και τάσης ποικίλουν στην έκαστη χώρα. Επίσης, κάθε ηλεκτρική κατανάλωση ωμικό φορτίο ή μηχανή έχει διαφορετικό ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας. Επομένως, η τάξη αρμονικών απλοποιεί την μέθοδο που αναφερόμαστε στις αρμονικές κάθε χρήσης ή λειτουργίας. Ένας επιπλέον λόγος που εκμεταλλευόμαστε την τάξη αρμονικών είναι ότι απλουστεύει σημαντικά τις μαθηματικές εξισώσεις όπου υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες.

Οι αρμονικές ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: στις άρτιες και στις περιττές. Άρτιες είναι οι αρμονικές 2,4,6,8,10, ..., ενώ περιττές είναι οι 3,5,7,9,11, ... Η αρμονική τάξη παραπέμπει στην $1^{\text{η}}$ αρμονική και στη λειτουργική συνιστώσα της συχνότητας της κυματομορφής. Στις τριφασικές καταναλώσεις μας ενδιαφέρουν μόνο οι περιττές αρμονικές, ενώ οι άρτιες αρμονικές ακυρώνονται. Η αρμονική τάξη 0 παραπέμπει στην συνεχή (Direct Current - DC) συνιστώσα της κυματομορφής, η οποία είναι η απόκλιση του θετικού μισού ενός κύκλου με το αρνητικό μισό. Για παράδειγμα, αν μία κυματομορφή έχει ευμέγεθες αρνητικό μισό σε έναν κύκλο, σχετικά με το θετικό μισό, τότε θα εισάγει μία αρνητική αρμονική DC συνιστώσα.

Οι DC συνιστώσες έχουν δυσάρεστες συνέπειες στο δίκτυο και προκαλούν θέματα συνήθως στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του φαινομένου του κορεσμού του πυρήνα. Ο κορεσμός στον πυρήνα αναπτύσσεται όταν ο πυρήνας λειτουργεί σε ένταση μαγνητικού πεδίου ευμεγέθους της κορυφής της μαγνητικής καμπύλης. Η εργασία στην περιοχή κορεσμού απαιτεί ευμεγέθη απορρόφηση ενέργειας. Επίσης, ο μετασχηματιστής εξαιτίας των αυξημένων απωλειών του πυρήνα, αυξάνεται η θερμοκρασία του, ενώ παρατηρούνται επιπλέον δονήσεις στο πυρήνα.

Οι υποαρμονικές με μικρότερες συχνότητες από αυτές της θεμελιώδους συχνότητας, συγκεκριμένα της 1^{ης} αρμονικής είναι σπάνιες στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Υποαρμονικές είναι φυσικό να αναπτυχθούν όταν ένα δίκτυο είναι αρκετά επαγωγικό ή όταν το δίκτυο έχει μεγάλες ομάδες πυκνωτών για την καλυτέρευση του φιλτραρίσματος ή συντελεστή ισχύος. Αυτές οι καταστάσεις παράγουν βραδύς ταλαντώσεις, που είναι σχεδόν αποσβενόμενες όπου οδηγούνται σε διαταραχές ποιότητας ισχύος, τρεμόπαιγμα φωτός (light-flickering) και όπως βυθίσεις τάσεις (sags).

Επίσης οι διαρμονικές (Interharmonics) είναι μια άλλη κατηγορία αρμονικών, οι οποίες συντελούν κυματομορφές ρεύματος ή τάσεις που οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της 1^η αρμονικής. Αφορμή της παραγωγής τους είναι ειδικά η ασύμμετρη φόρτιση τριφασικών αντιστροφών, πτώσεις τάσεως σε ουδέτερους αγωγούς, επιστροφές και ακανόνιστες εναύσεις-σβέσεις διακοπών.

2.3 Ανάλυση ανώτερων αρμονικών

Ο Joseph Fourier (1768-1830) όπου από τον οποίο πήραν την ονομασία τους οι σειρές Fourier, καθώς εξαιτίας του καθορίστηκε η ανάλυση των τριγωνομετρικών σειρών, όπου χάρη των μελετών του τα αποτελέσματα βάζουν τις βάσεις για την ανάλυση των αρμονικών σημάτων. Κύριοι συνεχιστές αυτών των εργασιών της ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας ήταν οι Bernhard Riemann και Peter Dirichlet.

Η ανάλυση Fourier αξιοποιείτε σε μεγάλη κλίμακα στη μελέτη αρμονικών προβλημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Εν συνεχεία, αυτό μας επιτρέπει να μελετήσουμε το δίκτυο ή σύστημα για κάθε μια αρμονική ξεχωριστά. Καταλήγοντας ότι με αυτήν την μέθοδο μπορεί πιο εύκολα να βρούμε τη συνολική απόκριση του δικτύου.

2.3.1 Σειρές Fourier

Το ανάπτυγμα σειρών Fourier εκδηλώνει ένα περιοδικό σήμα ως την ένωση ημιτόνων και συνημίτονων με ξεχωριστές φάσεις ή διαφορετικά ως το συνδυασμό αρμονικά συνδεδεμένων μιγαδικών εκθετικών αριθμών [9]. Ο Θεμελιώδης χαρακτηρισμός της σειράς Fourier εδράζεται στις τριγωνομετρικές συναρτήσεις και για ένα σήμα με περίοδο 2π αποκτά τη μορφή.

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos \frac{n\pi t}{T} + B_n \sin \frac{n\pi t}{T} \right] \quad (1)$$

Από την μορφή της σχέσης (1) είναι προφανές ότι η συνάρτηση $x(t)$ πρέπει να είναι περιοδική. Θεωρούμε επομένως μια συνάρτηση $x(t)$ η οποία ορίζεται σ' ένα διάστημα $(-\pi, \pi)$. Για να ισχύει η σχέση αυτή για κάθε x πρέπει:

$$\cos(A_n x) = \cos[A_n(x + 2L)] \quad \text{και} \quad \sin(B_n x) = \sin[B_n(x + 2L)] \quad (2)$$

όπου προκύπτει, με τους συντελεστές Fourier A_n και B_n να δίνονται από τις σχέσεις

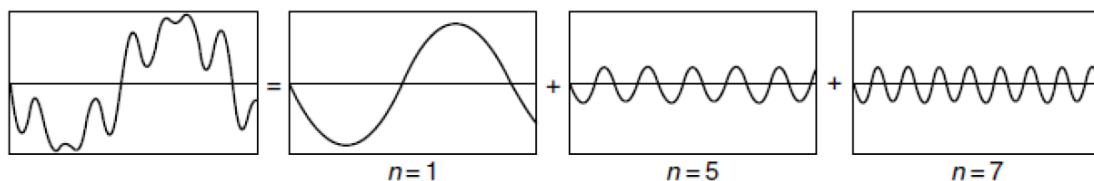
$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cos(nt) dt \quad \text{και} \quad B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \sin(nt) dt \quad (3)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σειρά Fourier της $x(t)$.

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(nt) + B_n \sin(nt)) \quad (4)$$

Οι σειρές Fourier έχουν ξεχωριστά γνωρίσματα ένωσης και μια συνεχής ανάλυση θα προϋπέθετε τη μελέτη αυτής της ιδιαιτερότητας για ένα ορισμένο σήμα. Επίσης γνωστό είναι ότι ένα τετραγωνικά ολοκληρώσιμο σήμα σε ένα διάστημα $(-\pi, \pi)$ ενώνεται περίπου σε όλα τα τμήματα. Επιπλέον, για τα σήματα που συγκλίνουν στην πραγματικότητα, η σειρά Fourier ενώνεται κανονικά σε όλα τα μέρη εκτός από τις ασυνέχειες, θα ήταν σωστό να αναφερθεί ότι η σειρά Fourier της $x(t)$ ενώνεται ακριβώς και σταθερά στην αρχική συνάρτηση $x(t)$ αν η παράγωγος της $x(t)$ είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμο σήμα.

Η αναφορά αυτή έχει βάση την τριγωνομετρική σχέση του Euler και τα τελευταία χρόνια δεσπόζει στο χώρο της επεξεργασίας σήματος. Στην Εικόνα 1 βλέπουμε την ανάλυση μια παραμορφωμένης κυματομορφής.



Εικόνα 1. Ανάλυση μιας παραμορφωμένης κυματομορφής στις αρμονικές συνιστώσες της θεμελιώδους, της πέμπτης και της έβδομης κυματομορφής. [10]

2.3.2 Μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου

Ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου (Continuous Time Fourier Series - CTFT) είναι η απλούστευση της μιγαδικής σειράς Fourier, ωστόσο ο αριθμός σημείων που θεωρείται υπό εξέταση καταλήγει στο άπειρο [11]. Ειδικά, καθορίζουμε $x(t)$ με περίοδο $T=T_0$ να διατυπώνεται ως:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{jn\omega_0 t} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{jn(2\pi F_0)t} \quad (5)$$

Αναπτύσσοντας το περιοδικό σήμα $x_p(t)$ σε εκθετική σειρά Fourier,

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \alpha_n e^{jn\omega_0 t} \quad (6)$$

Ορίζεται με ονομασία εξίσωση ανάλυσης η σχέση :

$$x(j\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

Αντίστροφα με την ονομασία εξίσωση σύνθεσης έχει τη μορφή:

$$x(t) = F^{-1}\{x(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου έχει ένα άθροισμα συναρπαστικών και πολύ ευνοϊκών χαρακτηριστικών, όπως αυτήν της διαμόρφωσης, γραμμικότητας και άλλων χαρακτηριστικών.

2.3.3 Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (Discrete Time Fourier Transform - DTFT) συγκροτεί το ανάλογο του CTFT στο φάσμα των διακριτών σημάτων, έχοντας σημαντικά σημασία στην μηχανική. Ο DTFT ενός διακριτού σήματος είναι συνέχεια μια περιοδική συνάρτηση, η οποία εμπεριέχει όλη την ενημέρωση που υπάρχει και στην θεμελιώδη αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο του χρόνου. Ο λόγος του DTFT για ένα άθροισμα πραγματικών ή μιγαδικών αριθμών $x[n]$ είναι:

$$x(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (9)$$

Ο DTFT εκτελείται τακτικά επάνω σε διακριτά σήματα που καταλήγουν από τη δειγματοληψία συνεχών σημάτων. Όπου εννοούμε ότι, ο DTFT απαρτίζει μια εκτίμηση του CTFT, μέρος που γίνεται να αναδειχθεί καλύτερα αν συλλογιστούμε τη σχέση που έχει ο

Poisson και καθιερώνει ότι ένα περιοδικό σύνολο μιας συνάρτησης $x(f)$ μπορεί να δημιουργηθεί από δείγματα μιας συνάρτησης $x(t)$:

$$X_{1/T}(f) = X_{2\pi}(2\pi fT) \triangleq \sum_{n=-\infty}^{\infty} T \times X \times (nT) e^{-i2\pi fTn} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f - k/T) \quad (10)$$

Όπου:

$X_{1/T}(f)$ περιλαμβάνει λεπτομερή διπλότυπα της $x(f)$ που είναι μετακινημένα κατά τουλάχιστον διπλάσια της συχνότητας δειγματοληψίας f_s και συναρτάται με την όψη του συνόλου. Για ικανοποιητική ευμεγέθους συχνότητα δειγματοληψίας, η σχέση που ισοδυναμεί σε $k = 0$ είναι δυνατόν να παρατηρηθεί στο διάστημα $[-f_s/2, f_s/2]$ με ελάχιστη έως μηδενική αλλοίωση από τις άλλες σχέσεις.

2.3.4 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier.

Ο DTFT και CTFT δημιουργούν τα θεμέλια για την μελέτη σημάτων και συστημάτων στο πεδίο της συχνότητας. Με δεδομένο, ότι περιλαμβάνουν λεπτομερές μετασχηματισμούς που γίνετε να μετασχηματίσουν ένα σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας χωρίς έλλειμμα ενημέρωσης, οι θεωρητικές τους προϋποθέσεις απαλείφουν τη δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής.

Λόγο αυτού, έχει δημιουργηθεί ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) ο οποίος προϋποθέτει από το σήμα να είναι μόνο διακριτό και περιορισμένου χρόνου, κάτι που συνεπάγεται ότι γίνεται να λειτουργήσει σε κομμάτια ευρύτερων σημάτων. Συγκριτικά με τον DTFT καθορίζετε ο μετασχηματισμός μόνο πάνω σε συχνοτικές συνιστώσες, οπότε για να αναλυθεί το δεδομένο μέρος του σήματος, κάτι που τον χρήζει υπολογιστικά δυνατό, όμως αφαιρεί τη ικανότητα σχολαστικής δημιουργίας του σήματος στο πεδίο του χρόνου [11]:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \times e^{\frac{i2\pi}{N}xn} \quad (11)$$

Είναι σπουδαίο να σημειωθεί ότι ο DFT γίνετε, τελικά, να διαπιστωθεί αποτελεσματικά, μέσω αλγορίθμων ταχέως μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform - FFT).

2.3.5 Αλγόριθμοι Fast Fourier Transform.

Ο FFT είναι ένα αλγόριθμος υπολογισμού του σήματος DFT, όπου ελαττώνει το νούμερο των υποχρεωτικών υπολογισμών που απαιτούνται για N σημεία, από $2N^2$ σε $2N \log 2N$. Αν η συνάρτηση, όπου ο μετασχηματισμός θα λογαριαστεί, δεν είναι αρμονικά

ίδια με τη συχνότητα της μέτρησης, τότε το FFT δείχνει με μια sinc συνάρτηση, οπότε με μια συνάρτηση δειγματοληψίας, ανεξάρητος αν η ισχύς του σήματος που υπολογίζεται από ολοκλήρωση εξακολουθεί να μένει ακριβείς.

Η κατάσταση της αλλοίωσης μπορεί να ελαττωθεί με τη εφαρμογή συναρτήσεων, το οποίο όμως περιορίζει την επάρκεια απόκρυψης μεγαλύτερου φάσματος του σήματος. Με την χρήση του FFT υπολογίζετε ο DFT με τη βοήθεια του Danielson-Lanczos Lemma αν το νούμερο των σημείων είναι πολλαπλάσιο του δύο, καθώς γίνεται να οριστεί σε αθροίσματα που εναρμονίζονται στους πρώτους αριθμούς του σήματος, μολονότι αυτό ελαττώνει την ετοιμότητα υπολογισμού.

Το FFT πρωτίστως μελετήθηκε με ουσία από τον Gauss, αλλά η μεθοδική του σύσταση αναφέρεται στους Tukey και Cooley. Το FFT πλαισιώνει ένα κλασικό υπολογιστικό εργαλείο σε ένα μεγάλο σύνολο εργασιών όπου σχετίζονται δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, βιολογία, ρομποτική, τη μηχανική αλλά και την ακουστική.

2.3.6 Φασματογράφημα του σήματος.

Το φασματογράφημα (spectrogram) συντελεί ένα προσβάσιμο όργανο παρακολούθησης των συχνοτικών ιδιοτήτων ενός σήματος [12]. Το φασματογράφημα ορίζεται ως η ένταση σε λογαριθμική κλίμακα dB, του μεγέθους του STFT (Short Time Fourier Transform) του σήματος. Στην ουσία ένα FFT είναι ένα STFT πάνω σε στατικά φάσματα ενός σήματος, όπου τα αρχικά έχουν συμπεριληφθεί με ένα σύστημα αρμονικού παραθύρου (harmonic window). Το STFT συνεχούς χρόνου εφαρμόζεται από την εξίσωση:

$$x(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t}dt \quad (12)$$

Οπότε:

$w(t)$ είναι η συνάρτηση όπου συμβατικά είναι μια Hamming συνάρτηση και $x(t)$ είναι το σήμα.

Παράλληλα, ο διακριτικός τύπος του STFT προσδιορίζετε ως:

$$x(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n - m]e^{-j\omega n} \quad (13)$$

Καθώς:

$w[n]$ και $x[n]$ συσχετίζονται στις διακριτές όψεις του σήματος και της συνάρτησης (Window function). Μία σπουδαία ακολουθία στον υπολογισμό του φασματογραφήματος είναι η λύση της αρμονικής αναδίπλωσης (Harmonic Overlapping Windows). Το φασματογράφημα είναι ένα διαισθητικό μέσο προβολής του συχνοτικού μεγέθους ενός σήματος και γίνεται να αξιοποιηθεί για τη σύντομη παρακολούθηση των θεμελιωδών ιδιοτήτων του.

2.4 Ακολουθία αρμονικών φάσεων

Στα συμμετρικά τριφασικά δίκτυα απαρτίζεται από τρεις τάσεις με ίσα μεγέθη και με σταθερή διαφορά φάσεως 120° . Σε ένα συμμετρικό δίκτυο, με ασύμμετρα φορτία, οι τάσεις και τα ρεύματα δεν έχουν συμφασική φάση δηλαδή συμμετρία. Για την ανάλυση και των τριών φάσεων συνηθίζεται η μεθοδικότητα των συμμετρικών συνιστωσών.

Η ανάλυση των συμμετρικών συνιστωσών θεσμοθετήθηκε από τον C.L. Fortescue το 1918. Ο Fortescue απέδειξε ότι ένα ασύμμετρο δίκτυο με ασύμμετρα διανύσματα, γίνεται να μελετηθεί σε n δίκτυα με n συμμετρικά διανύσματα ξεχωριστά. Επιπλέον, καλούνται συμμετρικές συνιστώσες των πρώτων διανυσμάτων, ενώ τα υπόλοιπα δίκτυα κατονομάζονται ακολουθιακά. Οι συμμετρικές συνιστώσες απαρτίζονται από τις συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, τις συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$ και τις συνιστώσες θετικής ακολουθίας $(0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$. Η θεμελιώδη αρμονική δεν έχει όμοια διαδοχή φάσεων σχετικά με τις ανώτερες αρμονικές. Στα τριφασικά συμμετρικά δίκτυα, η φασική ακολουθία της n -ιστής αρμονικής υφίσταται αν πολλαπλασιάσουμε την τάξη της αρμονικής με τη θετική διαδοχή των φάσεων $(0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$. Παραστατικά, για τη τέταρτη αρμονική ακολουθία $4 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, που είναι η αρνητική ακολουθία, ενώ για την πέμπτη αρμονική ακολουθία $5 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, που είναι η μηδενική ακολουθία. Ισχύει στην ακολουθία αρμονικών φάσεων ότι:

1. Αρμονικές συνιστώσες $n=1,4,7,10,13,\dots, 3n + 1$ είναι θετικής ακολουθίας.
2. Αρμονικές συνιστώσες $n=2,5,8,11,14,\dots, 3n - 1$ είναι αρνητικής ακολουθίας.
3. Αρμονικές συνιστώσες $n=3,6,9,12,\dots$ Είναι μηδενικής ακολουθίας. Τα περιττά πολλαπλάσια της τρίτης αρμονικής ονομάζονται και τριπλές αρμονικές.

2.4.1 Τριπλές αρμονικές

Οι τριπλές αρμονικές είναι τα περιττά πολλαπλάσια της τρίτης αρμονικής. Η παρουσία τους είναι ένα σπουδαίο θέμα για τα δίκτυα σε αστέρα με διαρροές ρεύματος στον ουδέτερο αγωγό. Μερικές συμβατικές περιπτώσεις επιπτώσεων που δημιουργούνται από τις τριπλές αρμονικές είναι οι τηλεφωνικές παρεμβολές και η υπερφόρτωση του ουδέτερου αγωγού. Για τριφασικά συμμετρικά δίκτυα, το σύνολο των συνιστωσών του ρεύματος στη πρώτη αρμονική στον ουδέτερο είναι ίση με μηδέν. Αντίστοιχα, το σύνολο των τριπλών αρμονικών στον αγωγό του ουδέτερο συνεπάγεται με το τριπλάσιο της τριπλής αρμονικής, επειδή συνυπάρχουν σε χρόνο ή σε φάση.

Επιπλέον, η διαρροή των τριπλών αρμονικών ρευμάτων στον αγωγό του ουδέτερου μεταβάλλεται από την μέθοδο που ενώνονται τα τυλίγματα του μετασχηματιστή καθώς και από το εάν ο ουδέτερος αγωγός του μετασχηματιστή είναι ισοδυναμικά γειωμένος. Μετασχηματιστής όπου είναι στον αστέρα με συνδεδεμένο τον ουδέτερο αγωγό, οι τριπλές αρμονικές ρεύματος προκαλούν από την μεριά του αστέρα σε σχέση με την φάση, να αθροίζονται τα ρεύματα στον ουδέτερο. Παράλληλα, επειδή δεν υπάρχει ουδέτερος στην σύνδεση τριγώνου τα ρεύματα δεν γίνετε να διαρρέουν στις γραμμές που ενώνονται γιατί δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής γι αυτά στο τρίγωνο του μετασχηματιστή. Όμως, οι τριπλές αρμονικές ρεύματος γίνεται να εμφανίζονται στα μέρη του τριγώνου.

2.5 Δείκτες που περιγράφουν την αρμονική παραμόρφωση

Κατόπιν μελέτης και ανάλυσης της ποιότητας ισχύος έχουν σχηματιστεί κάποιοι δείκτες, Αυτοί οι δείκτες μας ευκολύνουν να κρίνουμε την ποιότητα της τρέχουσας συνεισφερόμενης υπηρεσίας ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που έχει παραμορφωθεί από την ύπαρξη ανώτερων αρμονικών. Οπότε, οι δείκτες αρμονικής παραμόρφωσης είναι ένα πρακτικό εργαλείο μέτρησης [13].

Αν και υπάρχουν πολλοί δείκτες ποιότητας ισχύος, κάποιοι μας παρέχουν ελάχιστες ενημερώσεις ή δεν γίνετε να μας βοηθήσουν κατά την ανάλυση εξειδικευμένων στοιχείων του κυκλώματος. Ωστόσο, σε αυτήν την διπλωματική εργασία θα αναφέρουμε τους πιο γνωστούς δείκτες μέτρησης αρμονικού περιεχομένου μιας κυματομορφής ρεύματος ή τάσης.

2.5.1 Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD)

Ο υπολογισμός των αρμονικών πραγματοποιείται μετρώντας τον μέσο όρο των αρμονικών για ορισμένη χρονική ώρα και ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η ύπαρξη αρμονικών καθορίζετε από τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Η σχέση του δείκτη αυτού, είναι ανάλογο του συνόλου των ισχύων P (RMS τιμή ρεύματος ή τάσης) ή το σύνολο όλων των ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων προς την ισχύ της βασικής συχνότητας (θεμελιώδης αρμονική).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{\max}} M_n^2}}{M_1} 100\%$$
$$THD = 100 \frac{\sum P_{\text{αρμονικών συχνοτήτων}}}{P_{\text{θεμελιώδη συχνότητα}}} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1} \quad (14)$$

Όπου:

M_n είναι η ενεργός τιμή της αρμονικής τάξης n ενός σήματος M.

Για την ποσοστιαία τιμή της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος, αποκτά την μορφή:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{\max}} I_n^2}}{I_1} 100\% \quad (15)$$

Τα πλεονεκτήματα του THD είναι:

- Συνηθίζεται κοινώς για μια σύντομη αξιολόγηση της αρμονικής παραμόρφωσης.
- Οι προβλέψεις του είναι απλοϊκός.

Τα μειονεκτήματα του THD είναι:

- Δεν μας δίνει ενδείξεις για το μέγεθος της τιμής.
- Οι επουσιώδεις ενδείξεις για το πλάτος του σήματος έχουν αλλοιωθεί.

Σε περίπτωση αν ο THD% είναι μεγαλύτερος από 8%, όπου καθίσταται ένα ευρέως αποδεκτό όριο ανάμεσα υψηλής και χαμηλής αρμονικής παραμόρφωσης, καθώς έχουμε ευμέγεθες επίπεδο παραμόρφωσης. Επιπλέον, είναι αρκετό να μελετάμε το αρμονικό μέγεθος από τη 2^η έως την 25^η αρμονική, όμως αρκετά πρότυπα το περιορίζουν έως την 50^η αρμονική. Επιπρόσθετα, η ενεργός τιμή του ρεύματος συνεπάγεται:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2} \quad (16)$$

Αντίστοιχα, για την ολική αρμονική παραμόρφωση τάσης έχουμε:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} V_n^2}}{V_1} 100\% \quad (17)$$

Όπου:

U_n = Η ενεργός (rms) τιμή της αρμονικής τάξης n.

U_1 = Η ενεργός τιμή της 1^η αρμονικής της τάσης.

Συνήθως, για καταστάσεις απλοποίησής, αν και απόλυτα σωστό δεν είναι, χρησιμοποιείται η ονομαστική τάση U_n αντί για τη 1^η αρμονική U_1 . Η υψηλότερη τάξη αρμονικών n_{max} είναι 40^η κατά IEC ($F_{max} = 2\text{KHZ}$) και 50^η κατά IEEE ($F_{max} = 2.5\text{KHZ}$). Στην πραγματικότητα, ο THD δύναται να μας παραθέσει μια τίμια εντύπωση, συγκριτικά με την ποσοστιαία τιμή θερμότητας που εκλύεται, όταν μια αλλοιωμένη τάση ασκεί στους ακροδέκτες ενός ωμικού φορτίου. Αντίστοιχα, γίνετε να μεταδώσει έναν δείκτη των επιπλέον απωλειών που δημιουργούνται από τη διαρροή ρεύματος μέσω αγωγών.

Ο δείκτης που αξιοποιείτε πολλάκις, είναι αυτός με την παραμόρφωση της τάσης, δηλαδή ο THD_v , διότι οι αναταραχές της τάσης συντηρούνται σε ένα μικρό επίπεδο. Καθώς σε αντίθεση, δεν εφαρμόζετε για ρεύματα, επειδή ένα ελάχιστο ρεύμα γίνετε να δείχνει ευμέγεθες τιμή THD_i , όμως να μην συνιστά σημαντικό πρόβλημα στο δίκτυο. Εκτός από τον συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης έχουμε και τον συντελεστή μερικής αρμονικής παραμόρφωσης. Απαρτίζετε το μέγεθος της αρμονικής παραμόρφωσης υψηλής τάξης (Partial Weighted Harmonic Distortion - PWHD) και προσδιορίζετε από την συνάρτηση 18:

$$PWHD\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} n \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \times 100 \quad (18)$$

I_n = Η ενεργός (rms) τιμή της αρμονικής τάξης n.

I_1 = Η ενεργός τιμή της 1^η αρμονικής του ρεύματος.

Στον υπολογισμό του PWH, παίρνουμε υπόψιν τις ανώτερες αρμονικές τάξης της 14^{ης} μέχρι και της 50^{ης}. Ο συντελεστής αυτός συνηθίζεται στην εκτίμηση ένωσης καταναλωτών χαμηλής τάσης και διασφαλίζει ότι οι αρμονικές συνιστώσες ευμεγεθών συχνοτήτων του ρεύματος είναι αρκετά χαμηλές, ωστότου να μην χρειάζεται η ανάλυση των επιπλέον αρμονικών.

2.5.2 Ολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος προς μέγιστο ρεύμα φορτίου (TDD)

Εξαιτίας των αναφερόμενων ελαττωμάτων του THDi%, το πρότυπο, όπως το IEEE-519, θέτουν το δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος ως προς το μέγιστο ρεύμα φορτίου (Total Demand Distortion - TDD). Διατυπώνεται καθαρά από την σχέση:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{\max}} I_n^2}}{I_L} 100\% \quad (19)$$

Όπου:

I_L : Είναι το μέσο του μέγιστου ρεύματος φορτίου.

Θα μπορούσε το ρεύμα να μετρηθεί ως η μέση τιμή των μέγιστων τιμών του ρεύματος φορτίου ανά βδομάδα για διάρκεια ενός χρόνου ή γίνεται να χρειαστεί να γίνει αξιολόγηση, αν κατά περίπτωση έγκειται να ενταχθεί στο δίκτυο ενός νέου καταναλωτή.

2.5.3 Συντελεστής κορυφής (Crest Factor)

Ο συντελεστής κορυφής (Crest Factor) είναι ένα μέτρο στο πεδίο του χρόνου, το οποίο παρουσιάζει συνολικά την αλλοιωμένη κορυφή του ημιτονοειδούς σήματος. Διατυπώνεται ως η σχέση του πλάτους προς την ενεργό τιμή του σήματος.

$$CF = \frac{V_{\max}}{V_{\text{rms}}} \quad (20)$$

Όπου:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (21)$$

Ο συντελεστής κορυφής ενός καθαρού ημιτόνου ισούται με 1,414 όπου μας ενημερώνει όχι μόνο για την διαύγεια ενός σήματος, καθώς και για την ικανότητα ενός δικτύου να προσφέρει στην αναχώρησή του μία συμπαγής τάση καθώς και ρεύμα.

2.5.4 Συντελεστής K (K Factor)

Ο συντελεστής K (K Factor) ενός ημιτόνου ρεύματος συνηθίζεται για να την ποσοτικοποίηση της επίδρασης μιας παραμορφωμένης κυματομορφής ρεύματος στο φορτίο ενός μετασχηματιστή. Όπου καθορίζετε από την σχέση:

$$K = \sqrt{\frac{\sum_n (I_n^2 n^2)}{\sum_n I_n^2}} \quad (22)$$

2.5.5 Συντελεστής ισχύος από την ολική αρμονική παραμόρφωση

Συγκροτεί έναν οδηγό για το κατά πόσο ικανά λειτουργεί ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Λειτουργεί το σύστημα αποδοτικότερα όταν η τιμή του βρίσκεται κοντά στη μονάδα. Ορίζεται από την εξής σχέση:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} = DPF \quad (23)$$

2.6 Αιτίες παραγωγής αρμονικών

Γραμμικά λέγονται τα φορτία, (όπως αντιστάσεις, πηνία, πυκνωτές κ.λπ.) στα οποία η κυματομορφή τάσης (ημιτονοειδής) εφαρμοζόμενη σε αυτά, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυματομορφής ρεύματος ημιτονοειδούς μορφής. Αντίθετα, ένα φορτίο χαρακτηρίζεται ως μη γραμμικό όταν το ρεύμα που προκύπτει δεν είναι ημιτονοειδές, παρότι η τάση τροφοδοσίας του είναι ημιτονοειδής. Τα ηλεκτρονικά ισχύος συμπεριφέρονται σαν μη γραμμικά φορτία. Τα μη γραμμικά φορτία συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος, όπου δημιουργούν και ανώτερες αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους. Όμως, μη γραμμικά φορτία δεν είναι μόνο τα ηλεκτρονικά ισχύος.

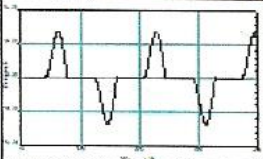
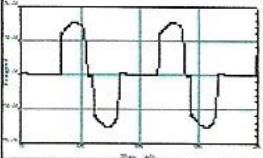
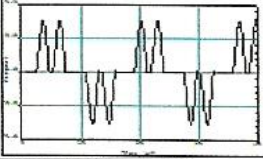
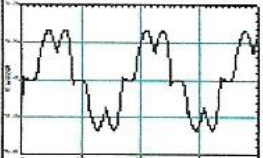
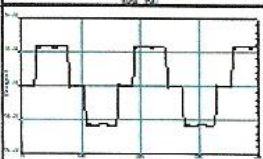
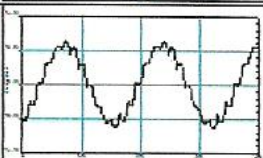
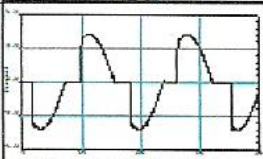
Ορισμένα από αυτά είναι :

1. Ρυθμιστές στροφών κινητήρων
2. Ηλεκτροσυγκολλήσεις
3. Ηλεκτρονικά Ballast
4. Τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής
5. Τροφοδοτικά υπολογιστών
6. Λαμπτήρες εκκένωσης
7. Επαγωγικοί φούρνοι
8. Φωτιστικά led

Πέραν όμως από την συχνή χρήση μη γραμμικών φορτίων και των ηλεκτρονικών ισχύος, από καταναλωτές μέσης τάσης όσο και χαμηλής τάσης, αρκετά σπουδαίος παράγοντας παραγωγής αρμονικών στη σήμερον ημέρες είναι και η λειτουργία μηχανισμών ένταξης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες στο δίκτυο [14]. Η ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας γίνεται να δημιουργήσει στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σπουδαία μεγέθη αρμονικής παραμόρφωσης κατά τον χρόνο της λειτουργίας της. Η αλλοίωσή μειώνεται μέχρι και τα προβλεπόμενα όρια που έχουν θεσπιστεί από Ευρωπαϊκά ή Αμερικανικά πρότυπα με την εγκατάσταση φίλτρων.

Η ημιτονοειδής τάση, κατά την διάρκεια ακόμα και της δημιουργίας της, περιλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση την συγκεκριμένη στιγμή είναι της τάξης του 1%. Σίγουρα, η παραγόμενη κυματομορφή τάσης μεταφέρεται

πολλά χιλιόμετρα μακριά, μετασχηματίζεται σε πολλαπλά στρώματα και τερματίζει στον καταναλωτή. Επιπλέον, ο καταναλωτής με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του, δημιουργεί ρεύματα που είναι άφθονο σε αρμονικές συνιστώσες, ιδιαίτερα σε μεγάλες εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ειδικά τα αρμονικά ρεύματα καταλήγουν στον καταναλωτή και επιδεινώνουν την παραμόρφωση στην τάση τροφοδοσίας, επιβαρύνοντας των εξοπλισμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, των μετασχηματιστών, καλωδίων κ.λπ. Στην Εικόνα 2 βλέπουμε τις τυπικές παραμορφώσεις ρεύματος σχετικά με τον τύπο του φορτίου που τροφοδοτείται.

Τύπος φορτίου	Τυπική κυματομορφή	Παραμόρφωση ρεύματος, THD_i
Μονοφασικό τροφοδοτικό		80% (υψηλή 3 ^η αρμονική)
Ημιανορθωτής		Υψηλή 2 ^η , 3 ^η , 4 ^η σε μερικό φορτίο
Ανορθωτής 6 παλμών, με χωρητική εξομάλυνση, χωρίς πηνίο σειράς		80%
Ανορθωτής 6 παλμών, με χωρητική εξομάλυνση, με πηνίο σειράς > 3%, ή τροφοδοσία dc κινητήρα		40%
Ανορθωτής 6 παλμών, με μεγάλο πηνίο για εξομάλυνση ρεύματος		28%
Ανορθωτής 12 παλμών		15%
Ρυθμιστής ac τάσης		Ανάλογα με την γωνία έναυσης
Λαμπτήρες φθορισμού		17%

Εικόνα 2. Κυματομορφές ρεύματος διαφόρων μη γραμμικών φορτίων. [8]

Αυτή η μείωση προέρχεται από ευμέγεθες θερμικές ελαττώσεις που δημιουργούνται στους αγωγούς όταν υπάρχουν αρμονικά ρεύματα, επειδή στις συχνότητες αυτές οι ωμικές αντιστάσεις των αγωγών είναι μεγαλύτερες, εξαιτίας του φαινομένου γειννίαςσης και του επιδερμικού φαινομένου που συνδέονται άμεσα από τη συχνότητα.

Η μελέτη της επάρκειας μετάδοσης γίνεται με τον υπολογισμό ενός συντελεστή μείωσης derating factor, ο συγκεκριμένος διατυπώνει την ελαχιστοποίηση της ικανότητας μετάδοσης λόγω της υπόστασης των αρμονικών και συνοδεύεται από την αθροιστική αρμονική παραμόρφωση THD%. Στις τριπλές αρμονικές όπως η 3^η, 9^η κ.α. το ρεύμα των τριών φάσεων είναι συμφασικά, με κατάληξη να προστίθενται αλγεβρικά και να παράγουν μεγάλα ρεύματα στον ουδέτερο αγωγό. Τα μεγάλα ρεύματα στον ουδέτερο προξενούν μεγάλο πρόβλημα στην αντίσταση των καλωδίων και σπουδαίες μειονεκτήματα λόγω δινορευμάτων στις αγωγίμες επιφάνειες.

Η τάση λειτουργίας που εκμεταλλεύεται ο καταναλωτής και η οποία δημιουργεί αρμονικές στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιείτε και από άλλους καταναλωτές. Αυτό ως συνεπακόλουθο έχει τη ποιότητα ισχύος του ενός καταναλωτή να επηρεάζει την ποιότητα ισχύος των υπόλοιπων καταναλωτών. Εξαιτίας αυτού, ορισμένα από τα πρότυπα ποιότητας ισχύος ορίζουν τα περιθώρια στο νούμερο των αρμονικών ρεύματος που γίνεται να διαρρέουν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που είναι $THD\% = 8\%$.

2.7 Προβλήματα ύπαρξης αρμονικών στα ευφυή δίκτυα

Η όλο και μεγαλύτερη αξιοποίηση ηλεκτρονικών και μη γραμμικών φορτίων παράγουν συνεχώς πολλά ζητήματα αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η υπόσταση των αρμονικών έχει ως συνέπεια σημαντικές επιπτώσεις στο δίκτυο, όπως δυσλειτουργία φορτίου και μεγάλη θερμική καταπόνηση κ.λπ. [15]. Ο εξοπλισμός συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με την αρμονική τάση και εξαρτάται αρκετά από τον τύπο του ηλεκτρικού φορτίου.

Αφετέρου, τα τυλίγματα των ηλεκτρικών κινητήρων θερμαίνονται υπερβολικά από τις αρμονικές συνιστώσες, προξενώντας σε μεγάλο βαθμό την εξάλειψη της αποτελεσματικότητας των μονώσεων, καθώς και την ελαχιστοποίηση του χρόνου ζωής τους. Οι αρμονικές τάσεις γίνεται να δημιουργήσουν ακόμα μεγαλύτερα ρεύματα από αυτά της πρώτης αρμονικής και για το λόγο αυτό μπορεί εύκολα ο αριθμός να υποτιμηθεί για τον βαθμό της υπερθέρμανσης στον ηλεκτρικό κινητήρα. Η λειτουργία ορισμένων συσκευών ανταποκρίνεται σε μία αξιόπιστη κυματομορφή τάσης με μειωμένες παραμορφώσεις, με επίδραση αυτές οι συσκευές να υπολειτουργούν στην ύπαρξη αρμονικών [16]. Υπόδειξη ορισμένων συσκευών συντελούν εξοπλισμοί που εμπεριέχουν ρυθμιστές μεταβλητής έντασης φωτισμού, θυρίστρος όπως και μηχανές συγκόλλησης.

Αρκετές από τις αρμονικές που εγχέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπάγεται στην παραμόρφωση που παρουσιάζουν μονοφασικά φορτία, όπως διαπιστώνεται σε εγκαταστάσεις που υπάρχουν γραφεία, μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλη τιμή ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό, όπου υπερβαίνουν την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Σε περιπτώσεις δίχως αρμονικές, ο αγωγός του ουδέτερου έχει πολύ μικρή τιμή ρεύματος, όπου επιπλέον έχει γίνει συνήθεια να εγκαθίστανται στον ουδέτερο αγωγό, που να επιτρέπουν να προσφέρουν ολόκληρη ή και την μισή από την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Με αυξημένο αριθμό αρμονικών υπάρχει το πρόβλημα υπερφόρτισης του ουδετέρου αγωγού με δύο πιθανές περιπτώσεις. Η πρώτη σχετίζεται με την υπερθέρμανση της μόνωσης του ουδετέρου, καθώς έχει ως συνέπεια την ελαχιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους και την πιθανότητα πυρκαγιάς. Παρομοίως, υπάρχουν ίχνη ότι η εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων στον ουδέτερο πειράζουν τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών και τον ψηφιακό εξοπλισμό, στην περίπτωση που δεν υπάρχει σωστή ισοδυναμική γείωση. Στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι υποσταθμοί και οι πυκνωτές αντιστάθμισης χρήζουν να υποφέρουν περισσότερο. Οι μετασχηματιστές

προσβάλλονται από την αλλοιωμένη κυματομορφή ρεύματος, που γίνεται να παράγουν συμπληρωματική θερμότητα ώστε να καταλήξει σε ελαχιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας τους. Οι πυκνωτές προσβάλλονται από την μεταβαλλόμενη μορφή της τάσης, καθώς όταν είναι αρκετά παραμορφωμένη γίνεται να παράγει υπερβολική θέρμανση στον πυκνωτή, με απερχόμενο κίνδυνο την καταστροφή τους.

Οι μηχανικοί στο μεγαλύτερο ποσοστό στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεριμνούν μόνο για ζητήματα στην συμφωνημένη ισχύ, καθώς παρουσιάζονται φανερά, αόφτου καταλήγουν σε άμεση αστοχία ή βλάβη του εξοπλισμού. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι το αποτέλεσμα των αρμονικών στον εξοπλισμό γίνεται να καταλήξει σε υπερθέρμανση και ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας σε έκταση έως και το μισό της προσδοκώμενης, με συνέπεια σπουδαίες επιπτώσεις στην οικονομία. Από την άλλη, με τα επιπλέον ζητήματα στο δίκτυο, οι αρμονικές είναι δυνατόν να ρέουν για πολύ καιρό απαρατήρητες, καθώς και αν συμπέσει να πραγματοποιηθεί καθορισμένη μέτρηση στην εγκατάσταση ή σε εξοπλισμό της εγκατάστασης, στην τάση στην οποία τροφοδοτείται. Μερικά από τα σημαντικότερα προβλήματα των αρμονικών είναι [17]:

1. Ο εξοπλισμός κίνησης και οι μετασχηματιστές θερμαίνονται λόγω της επιπλέον ισχύς που δέχονται. Επιπρόσθετα, επιβαρύνονται μηχανικά, με συνέπεια να δημιουργούνται δονήσεις και θόρυβος κατά την λειτουργία τους.
2. Ο Αγωγός του ουδετέρου δέχεται μεγάλο ρεύμα, αφού το διανυσματικό σύνολο των ρευμάτων που τον ρέουν δεν είναι ίσο με μηδέν για τα συμμετρικά φορτία. Τα ρεύματα των συχνοτήτων αθροίζονται και συντελούν υπολογίσιμο μέτρο, ενώ ο βαθμός τάσης ανάμεσα γείωσης και ουδετέρου είναι μη αποδεκτές. Όπου έχει ως συνέπεια, ο αγωγός του ουδετέρου να μην είναι εντός των επιτρεπτών ορίων αρκετές φορές όσο αφορά το ρεύμα που τον διαρρέει.
3. Υφιστάμενοι πυκνωτές κινδυνεύουν να χαλάσουν, σε περιπτώσεις όπου συνδέονται στον δίκτυο, κάποιες φορές παρουσιάζει ίδια συχνότητα από τις αρμονικές που ρέουν στο δίκτυο. Η κατάσταση τούτη, η σύνθετη αντίσταση του δικτύου ελαττώνεται με συνέπεια να μεγαλώνει αρκετά το ρεύμα που το διαρρέει. Όπου το μέγεθος των αρμονικών μεγαλώνει, μεγαλώνει η ενεργός ένταση και τάση, οι πυκνωτές θερμαίνονται παραπάνω με αποτέλεσμα να χαλάσει το

διηλεκτρικό τους στοιχείο είτε να καταστραφούν οι ασφάλειες τους με ενδεχόμενο να τεθούν εκτός.

4. Τα μέτρα προστασίας και σύνδεσης καταστρέφονται και είναι ενδεχόμενο να εκκινήσουν δυσάρεστα, ειδικά αν η λειτουργία τους βασίζεται για τον υπολογισμό της ενεργούς τιμής της έντασης και συνηθίζεται το μέγεθος της κυματομορφής της, να βρίσκεται σε αλλοιωμένη κατάσταση.
5. Η λειτουργία του ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και των γεννητριών τοποθετείτε ασταθής.
6. Υπάρχουν λανθασμένες μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών από τα μετρητικά όργανα.
7. Το απόθεμα της ηλεκτρικής εγκατάστασης μειώνεται, επιπλέον τα ρεύματα που ρέουν τους ηλεκτρικούς πίνακες και τα καλώδια, είναι διαστασιολογημένα για μεγαλύτερα ρεύματα λόγω των αρμονικών.
8. Παραπάνω χρήση ενέργειας λόγω αρμονικών, με συνέπεια οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υπέρογκοι.

Όλα αυτά τα φαινόμενα, καταλήγουν σε επιδείνωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης, όπου αναλογεί με οικονομική επιδείνωση και συγκεκριμένα:

1. Ακραία μείωση στην παραγωγή, πρόσθετο κόστος, χαμένος χρόνος παραγωγής.
2. Ζημίες του εξοπλισμού γρηγορότερα, όπου έχει ως συνέπεια επιπλέον χρηματισμό και επενδύσεις.
3. Υψηλές τιμές επισκευών και συντήρησης.
4. Ελάχιστη ποιότητα και υπηρεσία παραγωγής προϊόντος.

2.7.1 Αυξημένες θερμικές απώλειες

Η υπόσταση αρμονικών έχει ως συνέπεια την επαύξηση των απωλειών χαλκού σε αρκετές καταστάσεις. Ειδικά, οι απώλειες σε μία γραμμή εκφράζονται από τη σχέση:

$$P_{\text{loss}} = R_{\text{line}} \times I_{\text{total}}^2 \quad (24)$$

Όπου, I_{total} είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος της γραμμής και R_{line} είναι η αντίσταση της γραμμής. Η ενεργός τιμή του ρεύματος παρουσιάζεται από την σχέση:

$$I_{\text{total}}^2 = I_1^2 + \sum_{n=2}^{n=50} I_n^2 \quad (25)$$

Διαπιστώνουμε, εν συνεχεία, πως η ολική ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής μεγαλώνει εξαιτίας των αρμονικών. Οι αρμονικές του ρεύματος δεν συμβάλουν στην μεταδιδόμενη ενεργό ισχύ, όμως φέρνουν περαιτέρω απώλειες στις γραμμές μεταφοράς, όπου εκφράζονται από την σχέση:

$$P_{\text{loss,harmonic}} = R_{\text{line}} \times \sum_{n=2}^{n=50} I_n^2 \quad (26)$$

Η R_{line} λαμβάνεται ακριβώς για όλες τις συχνότητες, φαινόμενο που δεν είναι απόλυτα κατάλληλο, αφού επειδή του επιδερμικού φαινομένου, η αντίδραση μεγαλώνει με την επαύξηση της συχνότητας. Ανεξαιρέτος αυτού τις επαυξημένες απώλειες χαλκού, οι αρμονικές προξενούν επαυξημένες απώλειες σιδήρου, οι οποίες διακρίνονται σε υστέρησης και δινορευμάτων στους M/Σ ισχύος και στους ηλεκτρικούς κινητήρες και γεννήτριες. Αυτό γίνεται επειδή οι απώλειες σιδήρου είναι ίση με το τετράγωνο του μεγέθους των ρευμάτων των αρμονικών.

2.7.2 Αυξημένα ρεύματα σε διατάξεις πυκνωτών αντιστάθμισης

Οι πυκνωτές που συνηθίζονται για την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος στη πρώτη αρμονική συνιστώσα είναι διαστασιολογημένα για τάσεις στη συχνότητα αυτή. Καθώς, σε κατάσταση που στους πυκνωτές επιδρούν τάσεις με επαυξημένο βαθμό σε αρμονικές, το ρεύμα των πυκνωτών πολλαπλασιάζεται.

$$I_n = U_n \times C \times \omega \times n \quad (27)$$

όπου I_n , U_n , n είναι το ρεύμα, η τάση και η τάξη της αρμονικής ανάλογα και C , ω είναι η χωρητικότητα και η γωνιακή ταχύτητα.

Διαπιστώνουμε, εν συνεχεία, ότι παρόλο και ελάχιστες, σε μέγεθος, τάσεις μεγάλης αρμονικής συχνότητας γίνεται να υποκινούν σημαντικά μεγάλα ρεύματα στους πυκνωτές αντιστάθμισης, με φυσική συνέπεια την υπερφόρτωση τους και σε αρκετές περιστάσεις και την καταστροφή τους.

2.7.3 Παραμόρφωση τάσης του δικτύου διανομής

Όπως σχετίζονται, τα ρεύματα που παράγουν τα μη γραμμικά φορτία στο δίκτυο, αποτελούνται από αυξημένο βαθμό αρμονικών ρεύματος. Η ροή αυτών των αρμονικών ρευμάτων στη γραμμή του δικτύου, συνεπάγεται στην παραγωγή αρμονικών και ακολούθως την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, με επακόλουθο την αλλοίωση της τάσης του συστήματος. Ειδικά, η αρμονική πτώση τάσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\Delta U_n = Z_n \times I_N \quad (28)$$

$$Z_n = L \times n \times \omega = L \times n \times 2\pi f \quad (29)$$

Όπου, Z_n είναι η σύνθετη αντίσταση του δικτύου, I_N είναι η αρμονική του ρεύματος που αφομοιώνει το φορτίο και n είναι η τάξη της αρμονικής.

Αυτή η περίπτωση οδηγεί σε λανθασμένη λειτουργία έως και χαλασμό πολλών ηλεκτρικών καταναλωτών, οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στις αρμονικές τάσης, και είναι αρκετά πιο έντονα σε μικρής ισχύος δίκτυα, τα οποία εμφανίζουν αυξημένη επαγωγική αντίσταση γραμμής. Καταλήγουμε οπότε, ότι η αλλοίωση της τάσης είναι ένα θέμα όπου παρουσιάζεται αρκετά στα δίκτυα της σύγχρονης τεχνολογίας.

Από αυτό το ζήτημα, έχουν δημιουργηθεί αρκετά πρότυπα, όπου ορίζουν συγκεκριμένες προδιαγραφές, όσον αποτελούν στις αρμονικές τάσης, εκ των οποίων γίνετε να τηρούνται. Ειδικά, σχετικά με το πρότυπο EN50160, η προσφερόμενη τάση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και στους καταναλωτές θα πρέπει να πληροί τα απαραίτητα.

2.7.4 Επίδραση αρμονικών στις ηλεκτρικές μηχανές

Η συνεχή τροφοδοσία μη ημιτονοειδούς τάσης στις ηλεκτρικές μηχανές μπορεί να οδηγήσει, στην περεταίρω θέρμανσή τους, οπότε και μια σημαντική ελαχιστοποίηση του χρόνου ζωής των μονώσεων των τυλιγμάτων του κινητήρα. Από την άλλη, το άθροισμα από τα αρμονικά ρεύματα προξενεί την δημιουργία ροπής, όπου υπάρχει στην ίδια μεριά με την ταχύτητα του πεδίου που δημιουργείται από τη καθορισμένη αρμονική. Ακολούθως, όλες οι αρμονικές από τις οποίες θεωρείται το κύκλωμα της θετικής ακολουθίας (τάξης $3n+1$), δημιουργούν μια κατάσταση που βοηθούν την κίνηση που επακολουθεί από τη θεμελιώδη αρμονική, ενώ οι αρμονικές με ίδιο κύκλωμα το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας (τάξης $3n-1$), αναπτύσσουν μια κατάσταση που εναντιώνεται στην αρχική κατάσταση από τη 1^{η} αρμονική [18].

Καθώς οι ροπές αντλούνται κυρίως από μικρά αρμονικά ρεύματα έχουν και αυτές, με τη σειρά τους, ελάχιστο πλάτος. Επιπλέον, οι περισσότερες ροπές προκύπτουν να αυτοκαταστρέφονται ανά ζεύγη, όπως, για παράδειγμα, οι ροπές 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής. Εν συνεχεία, οι αρμονικές έχουν αρκετά ελάχιστα έως και καθόλου αποτέλεσμα στη αθροιστική ροπή που δημιουργείται σε έναν κινητήρα. Πάραυτα, παράγουν, σπουδαίες ταλαντώσεις και κραδασμούς στον άξονα του κινητήρα.

2.8 Ποιότητα ισχύος

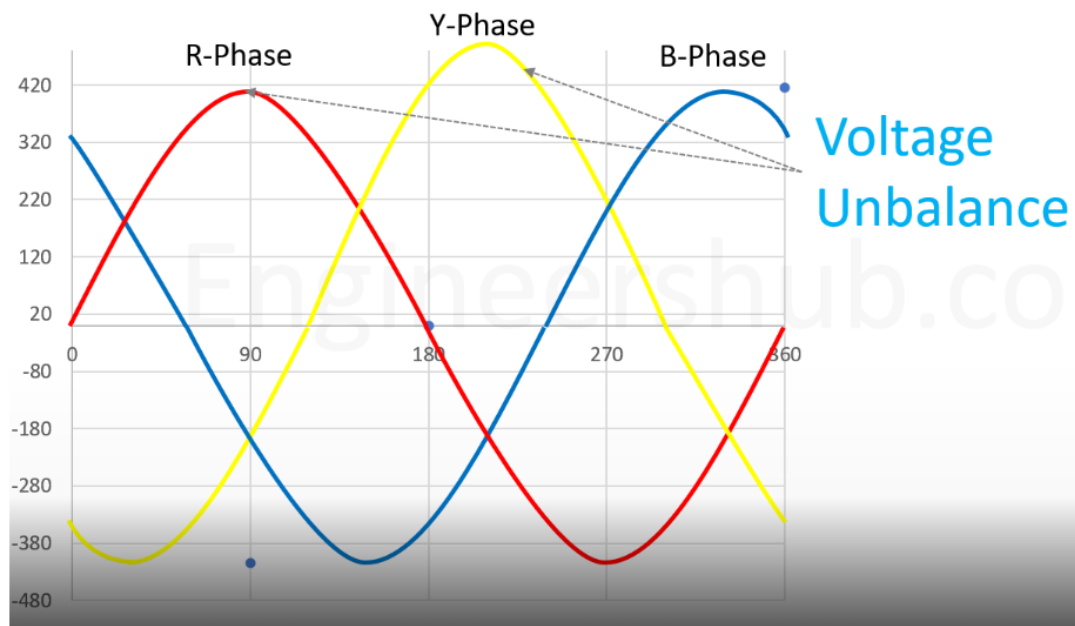
Υφίστανται αρκετές περιπτώσεις βλαβών όπου καταλήγουν στην στέρηση αξιοπιστίας ενός δικτύου. Το αξιοσημείωτο είναι η ελάχιστη ποιότητα ισχύος κατά την διανομή των καταναλωτών, καθώς συνεπάγεται στην περίπτωση μίας μη αποδεκτής τιμής συχνότητας διανομής και τάσης. Τα προβλήματα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, και επιπλέον των ευφυών δικτύων, είναι η ποιότητα ισχύος, η οποία έχει αποκτήσει σημαντικό σκοπό, ειδικά την σήμερον εποχή, με την αξιοποίηση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [19]. Ως προς τον ορισμό του όρου «ποιότητα ισχύος» δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας. Ορίζεται από τον Heydt ότι η ποιότητα ισχύος ως το πλάτος που συνηθίζετε για τον υπολογισμό του πόσο βέλτιστα μπορούν οι καταναλώσεις ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργήσουν. Ένας απλούστερος και σωστός ορισμός θα ήταν ο εξής: «Ποιότητα ισχύος είναι ένα σύνολο ηλεκτρολογικών προδιαγραφών, που επιτρέπουν σε ένα μέρος εξοπλισμού να λειτουργήσει εντός των ορίων του, χωρίς σπουδαίες επιπτώσεις στην απόδοση και διάρκεια λειτουργίας του». Οποιαδήποτε διαταραχή, υπονομεύει την απόδοση σε σχέση με τον χρόνο, αποτελώντας θέμα μελέτης του επιστημονικού πεδίου της ποιότητας ισχύος.

Την σήμερον ημέρα, οι ηλεκτρονικές συσκευές μικραίνουν σε μέγεθος ακόμα πιο πολύ. Αφετέρου, ως κατάληξη η ποιότητα ισχύος να λαμβάνει ακόμα σπουδαιότερο ενδιαφέρον, λόγω των ευφυών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η εποπτεία και λειτουργία τους θα εξαρτάται από ψηφιακά ηλεκτρονικά, μέχρι και ηλεκτρονικά ισχύος. Το πρόβλημα υφίσταται και υπό την έννοια ότι οι μηχανικοί ψηφιακών ηλεκτρονικών έχουν ελάχιστη έως καθόλου αίσθησή του αντικειμένου της ποιότητας ισχύος, Αφετέρου, οι μηχανικοί ευφυών ηλεκτρικών δικτύων παραμελούν την ευαισθησία και την λειτουργία των ηλεκτρονικών και ηλεκτρονικών ισχύος [20].

Στην Ελλάδα, όπως και στην υπόλοιπη Ευρώπη, ακολουθείται το πρότυπο για την τάξη των αρμονικών και ποιότητα ισχύος της CENELEC EN50160, καθώς, αντίστοιχα, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ακολουθούν το IEEE 519. Το πρότυπο EN50160, ανάμεσα πολλών, προσδιορίζει τη διακύμανση της τάσης και της συχνότητας, όμως δεν παρέχει αποδεκτά όρια για τον καταναλωτή, τόσο η αντοχή στην μεταβολή της τάσης, όσο και για προσδοκώμενες διακοπές ρεύματος. Οπότε, θα ήταν χρήσιμο να υπάρχει μια πιο συγκεκριμένη τοπολογία όσον αφορά στον εξοπλισμό, διότι σε πολλές περιπτώσεις το όριο των αρμονικών δεν τον καλύπτει.

2.8.1 Ασυμμετρία τάσης

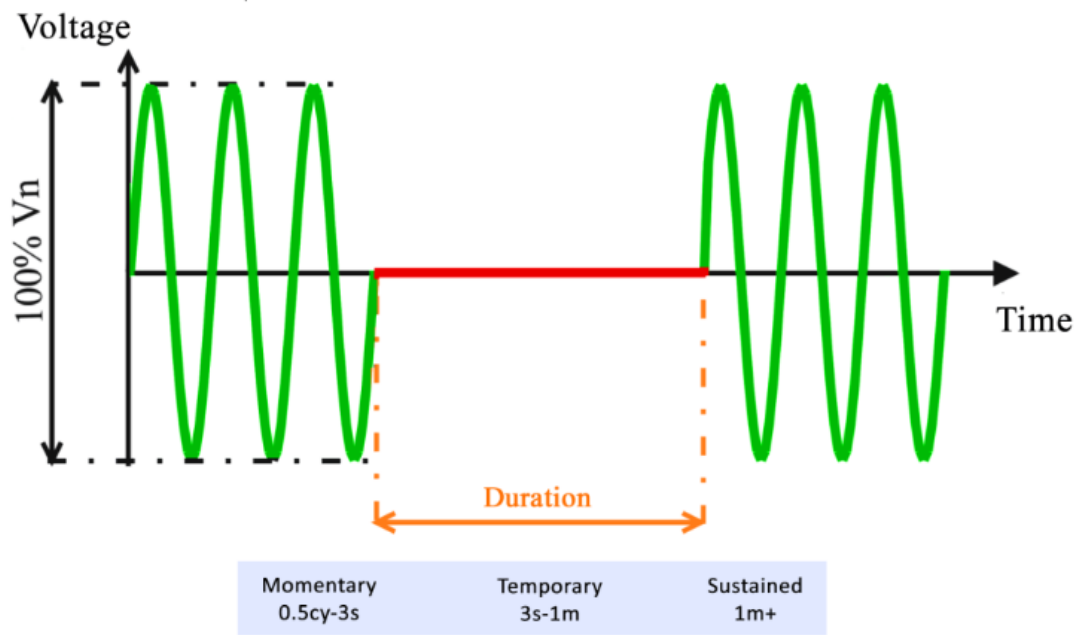
Σε συμμετρικό τριφασικό δίκτυο, οι φασικές τάσεις των τριών φάσεων είναι ισότιμες σε μέγεθος και έχουν διαφορά κατά 120 μοίρες. Η ασυμμετρία τάσης (Voltage unbalance) φαίνεται όταν υφίσταται ανομοιότητα στην ενεργό τιμή της τάσης ανάμεσα των φάσεων είτε όταν η γωνία ανάμεσα φάσεων εκτρέπεται από τις 120 μοίρες. Σχετικά του προτύπου EN50160, η ασυμμετρία τάσης σχετίζεται ως το μέτρο της συνιστώσας μηδενικής ή αρνητικής ακολουθίας προς την αρμονική θετικής ακολουθίας της τάσης. Πιο ρεαλιστικά, η τάση κάθε φάσης δεν είναι ισορροπημένες μεταξύ τους. Όμως, όταν η ασυμμετρία υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια, δημιουργούνται θέματα, κυρίως στις τριφασικές μηχανές, λόγω υπερθέρμανσης. Εν συνεχεία, η ασυμμετρία στο ρεύμα προκαλεί υπερθέρμανση στα τυλίγματα της μηχανής, οπότε προκαλείται βλάβη στη μόνωση της μηχανής, προκαλώντας καταστροφή. Αυτή η κατάσταση βλάβης γίνεται να καταλήξει σε υπερβολικά οικονομικά ασύμφορες διακοπές της λειτουργίας των καταναλωτών. Στην Εικόνα 3 βλέπουμε την διαφορά πλάτους μεταξύ των 3 φάσεων όταν υπάρχει ασυμμετρία τάσης στο δίκτυο.



Εικόνα 3. Διαφορά πλάτους ανάμεσα φάσεων σε περίπτωση ασυμμετρίας τάσης. [21]

2.8.2 Διαρκείς διαταραχές τάσης

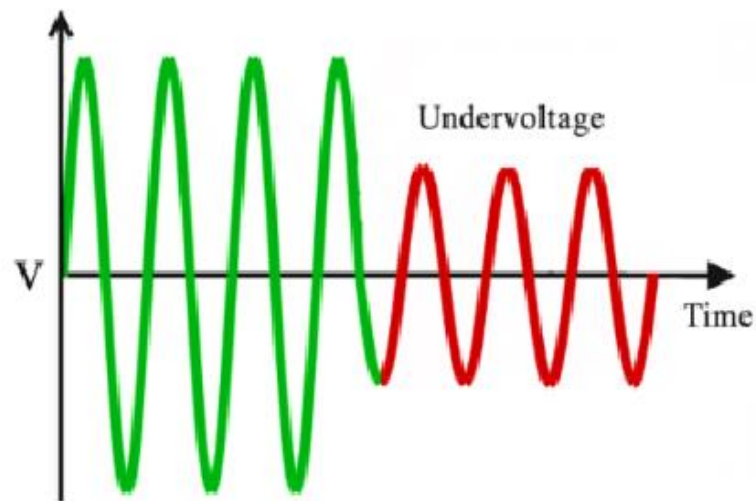
Καθώς η τροφοδοσία τάσης είναι αμελητέα για ένα χρόνο μεγαλύτερο του ενός λεπτού, συγκεκριμένα η συνεχής διάρκειας αλλαγής της τάσης λαμβάνει μια εκτεταμένη παύση, ως μια διαρκής διαταραχή τάσης (Sustained Interruption). Οι διακοπές που υπάρχουν περισσότερο από 60 δευτερόλεπτα στην τάση είναι πολλάκις μόνιμες και επιτάσσουν ανθρώπινη παρεμβολή για την επιδιόρθωση του δικτύου. Οι συνεχείς παύσεις τάσης είναι το παλαιότερο και σπουδαιότερο ζήτημα ποιότητας ισχύος. Στην Εικόνα 4 βλέπουμε ότι η διάρκεια αυτής της διαταραχής είναι μικρότερη ή ίση του ενός λεπτού όπου γίνεται και αντιληπτή από τους καταναλωτές.



Εικόνα 4. Διαταραχές τάσης ανά κατηγορία χρονικής διάρκειας. [22]

2.8.3 Υπόταση μακράς διάρκειας

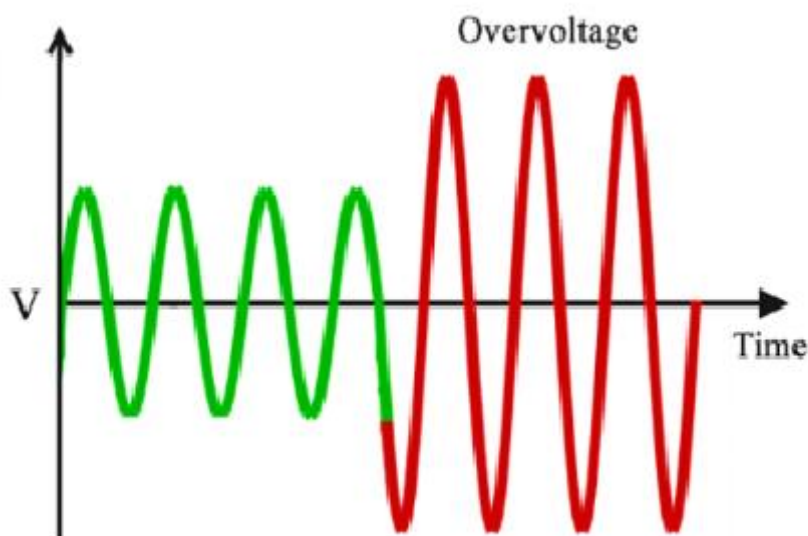
Η υπόταση μακράς διάρκειας (Undervoltage) είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργούς τιμής της τάσης, ποσοστού μικρότερου από 90% στη συχνότητα της τάσης, για χρόνο μεγαλύτερο από 60 δευτερόλεπτα. Οι υποτάσεις είναι η ακολουθία διακοπτικών καταστάσεων, τα οποία είναι αντίθετα των καταστάσεων που προξενούν υπερτάσεις. Η απενεργοποίηση μιας συστοιχίας πυκνωτών ή το ξεκίνημα ενός φορτίου γίνεται να προκαλέσει υπόταση, ώσπου ο εξοπλισμός ρύθμισης της τάσης του δικτύου να αποδώσει την τάση εντός των ορίων ανεκτικότητας του. Επιπλέον, κυκλώματα με υπέρταση γίνετε να προκύψουν σε υποτάσεις, στην Εικόνα 5 βλέπουμε και σχηματικά την αλλαγή της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 5. Υπόταση μακράς διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Undervoltage) [22]

2.8.4 Υπερτάσεις μακράς διάρκειας

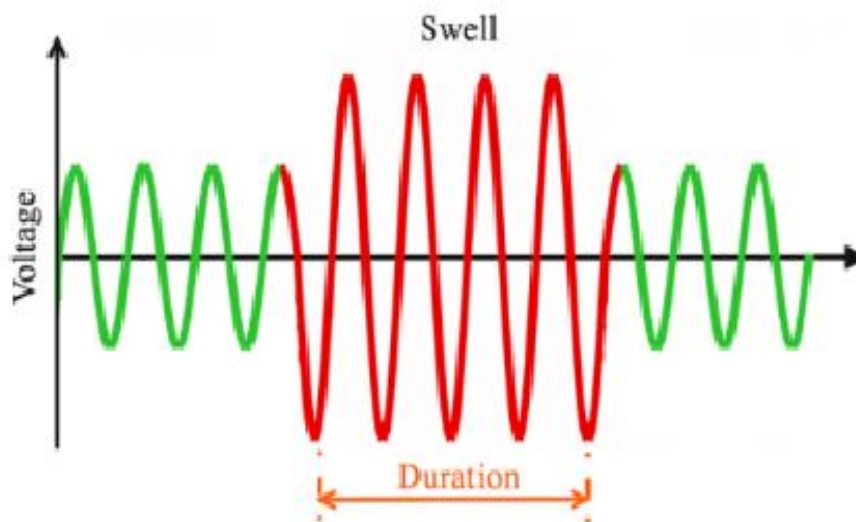
Η υπέρταση μακράς διάρκειας (Overvoltage) είναι μια επαύξηση της ενεργού τιμής της τάσης, μεγαλύτερη από 110% στη συχνότητα της τάσης, για χρόνο μεγαλύτερο από 60 δευτερόλεπτα. Κανονικά, οι υπερτάσεις είναι η συνέχεια των διακυμάνσεων φορτίου και τυχαίνουν είτε επειδή το δίκτυο είναι πολύ λιγοστό για την επιτρεπτή ρύθμιση της τάσης είτε επειδή οι έλεγχοι της τάσης είναι μη επαρκείς. Οι υπερτάσεις γίνεται να καταλήξουν επιπλέον σε εσφαλμένες ρυθμίσεις στους μετασχηματιστές ισχύος. Στην Εικόνα 6 όπως βλέπουμε και σχηματικά την αλλαγή της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 6. Υπέρταση μακράς διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Overvoltage). [22]

2.8.5 Υπερτάσεις μικρής διάρκειας

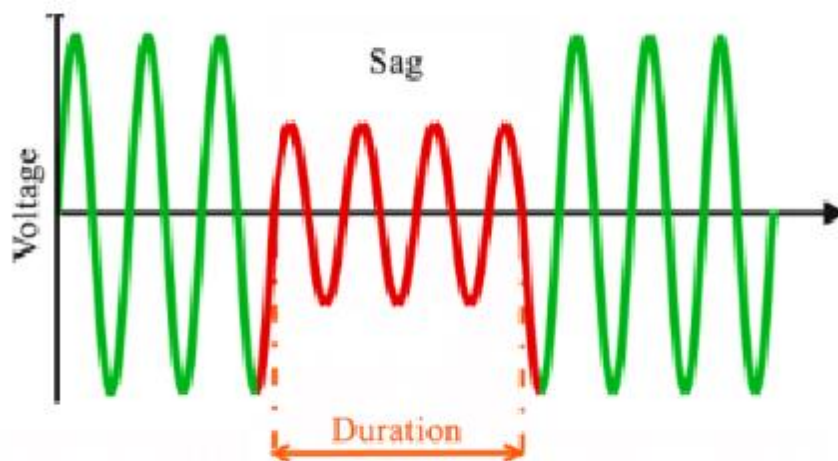
Ως υπέρταση μικρής διάρκειας (Swell) ή στιγμιαία υπέρταση αναφέρεται μια επαύξηση μεταξύ 1,1 pu και 1,8 pu στην ενεργό τιμή του ρεύματος ή της τάσης στην συχνότητα τους, για διάρκεια από 0,1 δευτερόλεπτα μέχρι 60 δευτερόλεπτα. Καθώς, επιπλέον οι βυθίσεις τάσης, οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας συχνά ενώνονται με φαινόμενα προβλημάτων του δικτύου, όμως δεν είναι τόσο κοινή παραμόρφωση, όσο η βύθιση τάσης. Καθώς η περίπτωση υπέρτασης είναι η μικρή σε διάρκεια επαύξηση τάσης στην φάση κατά την χρονική ενός με τη γη μονοφασικού βραχυκυκλώματος. Επίσης υπέρταση γίνεται να προκαλέσει την απενεργοποίηση ενός επαυξημένου φορτίου ή την ενεργοποίηση μιας επαυξημένης συστοιχίας πυκνωτών. Οι υπερτάσεις διακρίνονται από την διάρκεια τους και το μέγεθος τους. Η σπουδαιότητα της διαταραχής της υπέρτασης κατά την στιγμή του προβλήματος είναι μια συνάρτηση της τοποθεσίας του σφάλματος, της γείωσης και της αντίστασης του συστήματος. Οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας βελτιώνονται με τον ίδιο μέσο που προκαλούνται και οι βυθίσεις τάσης, καθώς UPS (Uninterruptible Power Supply) και με επιτηρητές ισχύος. Στην Εικόνα 7 όπως βλέπουμε και σχηματικά την αλλαγή της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 7. Υπερτάσεις μικρής διάρκειας σε σχέση με τον χρόνο (Swell). [22]

2.8.6 Βυθίσεις τάσης

Η βύθιση τάσης (Sag) είναι ο περιορισμός της ενεργού τιμής της τάσης ανάμεσα 0,1 pu και 0,9 pu. Οι βυθίσεις τάσης έχουν διάρκεια από 0,1 δευτερόλεπτα μέχρι 60 δευτερόλεπτα. Συχνά παρουσιάζονται από ενεργοποίηση ευμεγέθων φορτίων, εκκίνηση επαυξημένων επαγωγικών κινητήρων, από βραχυκυκλώματα γης με μια φάση, μεταβίβαση φορτίου από μια πηγή τάσης σε άλλη, καθώς επίσης από ηλεκτροδότηση Μ/Σ. Οι βυθίσεις τάσης είναι ο σπουδαιότερος λόγος σφαλμάτων των ηλεκτρικών καταναλωτών χαμηλής τάσης. Ειδικά, εμφανίζονται αντίκτυπα στα ηλεκτρονικά ισχύος, στην εκκίνηση και λειτουργία των κινητήρων και των προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών PLC (Programmable Logic Controller). Τα αντίκτυπα αυτής της διαταραχής διαχειρίζονται με την λειτουργία συσκευών αποθήκευσης ενέργειας όπως πυκνωτές. Στην Εικόνα 8 βλέπουμε και σχηματικά την αλλαγή της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 8. Βύθιση τάσης σε σχέση με τον χρόνο (Sag). [22]

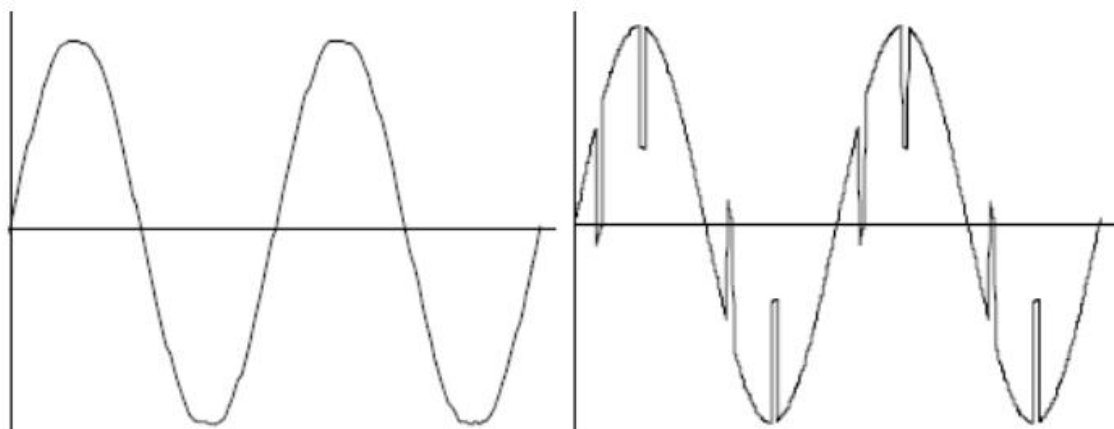
2.8.7 Διακοπές Τάσης

Διακοπή τάσης (Interruption) τυχαίνει όταν η τάση τροφοδοσίας ή το ρεύμα καταναλωτή είναι μικρότερο από 0,1 ρυ, μέσα σε διάρκεια που δεν περνά τα 60 δευτερόλεπτα. Οι διακοπές τάσης γίνεται να συμβαίνουν σε ελαττώματα του δικτύου, σε σφάλματα του των συστημάτων ελέγχου ή σε σφάλματα εξοπλισμού. Ο χρόνος μιας παύσης εξαιτίας βλάβης του δικτύου ορίζεται από την διάρκεια λειτουργίας των συσκευών προστασίας του δικτύου. Η άμεση επαναφορά του δικτύου μετά από ένα πρόβλημα, ειδικά εμποδίζει την διάρκεια της παύσης σε λιγότερο από 30 κύκλους (HZ). Ο χρόνος μιας παύση τάσης λόγω προβλημάτων του φορτίου ή μη σωστών ενώσεων μεταξύ των αγωγών.

2.8.8 Διακυμάνσεις τάσης

Αν διαφέρει το μέτρο της τάσης, συνήθως θα διαφέρει και η ροή ισχύς στο φορτίο. Το αποτέλεσμα του εξοπλισμού γίνεται να αλλάξει, αν οι VFF (Voltage Fluctuations and Flicker) είναι επαυξημένες ή βρεθούν σε μια συγκεκριμένη επικίνδυνη περιοχή συχνотήτων. Καταστάσεις, όπου οι διακυμάνσεις τάσης επιδρούν στη συμπεριφορά του φορτίου είναι λιγοστές, εκτός τα κυκλώματα φωτισμού. Αν η φωτεινότητα ενός λαμπτήρα αλλάζει στις συχνότητες ανάμεσα 50HZ, και με επακόλουθο ότι τα ανθρώπινα μάτια είναι αρκετά ευαίσθητα σε αυτό το σφάλμα, πάνω από ένα καθορισμένο μέγεθος της τάσης, το "τρεμόπαιγμα" του φωτισμού μπορεί να γίνει ενοχλητικό. Έγκειται για ευαισθησία του

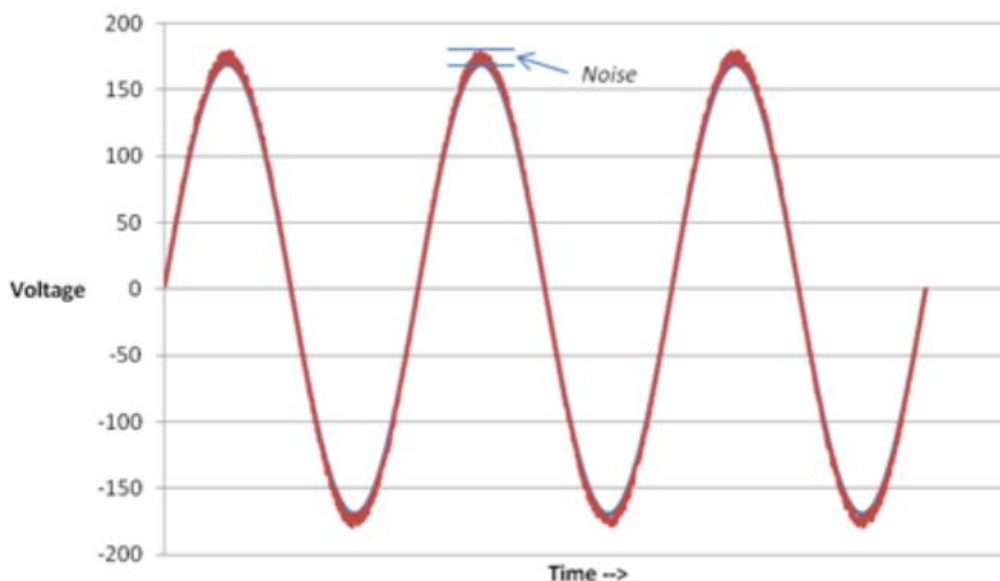
ανθρώπινου ματιού, καθώς αυτό αναλύει την ζήτηση επίλυσής γι' αυτό το σφάλμα. Η βέλτιστη αλλαγή του μέτρου της τάσης αποκαλείται διακύμανση τάσης, ενώ η οπτική ευαισθησία, όπως αυτό είναι κατανοητό από τον εγκέφαλό μας, αποκαλείται "τρεμόπαιγμα" του φωτισμού όπως μπορούμε να δούμε και στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Διακύμανση τάσης και "τρεμόπαιγμα" φωτός. [3]

2.8.9 Θόρυβος

Ως «θόρυβος» (Noise) καθορίζονται δυσάρεστα ηλεκτρικά σήματα με ευρυζωνικό φασματικό περιβάλλον, κάτω από 150 kHz, όπου αντιστέκονται στο ρεύμα ή στην τάση του δικτύου. Θόρυβος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται να παρουσιαστεί από κυκλώματα ελέγχου, ηλεκτρονικά ισχύος ή και εξαρτήματα ηλεκτροσυγκόλλησης. Τα συνδεδεμένα με το θόρυβο σφάλματα αυξάνονται, αν η γείωση είναι ανύπαρκτη, καθώς αδυνατεί να γειωθεί ο θόρυβος από τον καταναλωτή. Ο θόρυβος προσβάλλει κυρίως ηλεκτρονικές συσκευές όπως υπολογιστές μέχρι PLC. Στην Εικόνα 10 βλέπουμε το φαινόμενο του θορύβου όπου μπορεί να μειωθεί αξιοποιώντας φίλτρα, ρυθμιστές τάσης και μετασχηματιστές απομόνωσης.



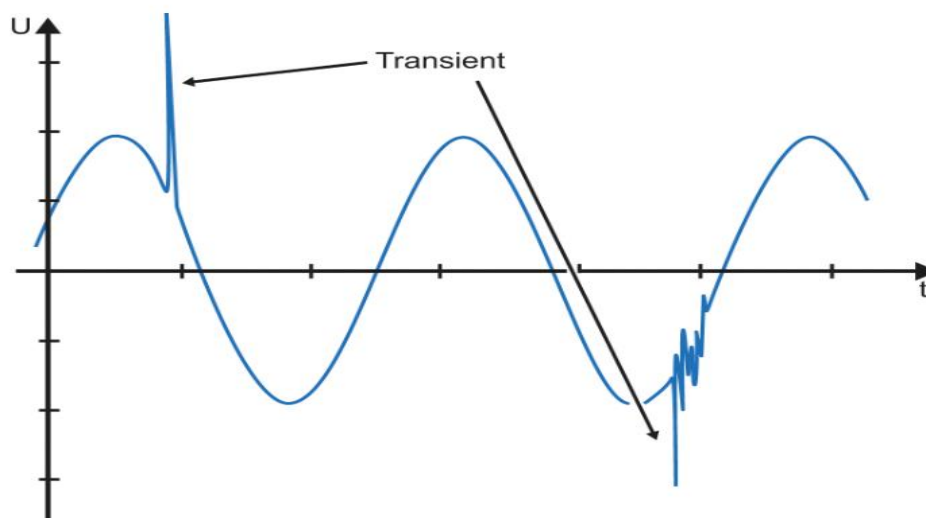
Εικόνα 10. Το φαινόμενο του θορύβου στα ηλεκτρικά σήματα στην τάση σε σχέση με τον χρόνο. [3]

2.8.10 Μεταβατικές υπερτάσεις

Η έννοια μεταβατική υπέρταση (transient) αξιοποιείται στην ανάλυση ποιότητας ισχύος, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίσει μίας μη αποδεκτής, βέλτιστης και μεγάλης χρονικά διαταραχή στην τάση. Οι κυματομορφές και η ιδιομορφία των μεταβατικών υπερτάσεων είναι συνδεδεμένα άμεσα από το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου στο σημείο που εφαρμόζεται. Οι μεταβατικές υπερτάσεις γίνεται να διαχωριστούν με βάση ορισμένες ιδιαιτερότητες τους, όπως μέγεθος, χρόνος ανόδου, χρόνος, συχνότητα εμφάνισης ή μέγεθος φασματικής πυκνότητας. Οι μεταβατικές υπερτάσεις, συχνά διαχωρίζονται σε δύο περιπτώσεις στις κρουστικές υπερτάσεις (impulsive transients) και στις υπερτάσεις με αποσβεννύμενη ταλάντωση (oscillatory transients). Οι κρουστικές υπερτάσεις είναι ασυνεχής διακυμάνσεις στη μόνιμη λειτουργία του ρεύματος, της τάσης ή και των δυο, όπου δεν φέρνουν μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου και είναι μίας ορισμένης πολικότητας, κυρίως θετική. Το συχνότερο πρόβλημα των κρουστικών υπερτάσεων είναι οι κεραυνοί. Οι κρουστικές υπερτάσεις είναι υπερβολικά βέλτιστες, μικρότερες από 50nsec. Οι κρουστικές υπερτάσεις γίνετε να συντονίζουν τα κυκλώματα συντονισμού ισχύος του

δικτύου και να δημιουργούν το ανάποδο αποτέλεσμα δηλαδή υπερτάσεις με αποσβεννύμενη ταλάντωση.

Οι υπερτάσεις με αποσβεννύμενη ταλάντωση καθιστούν αιφνίδια μεταβολή της μόνιμης κατάστασης της τάσης, ανεξαιρέτου αν αλλάζει η συχνότητα του δικτύου, τόσο προς τη αρνητική όσο και προς την θετική μεριά της πολικότητας. Μια υπέρταση με αποσβεννύμενη ταλάντωση παράγεται σε τάση, των οποίων η τιμή μεταβάλλει πολικότητα απότομα. Το σφάλμα αυτό καθορίζετε από τη συχνότητα το πλάτος και το φασματικό μέγεθος. Οι υπερτάσεις με αποσβεννύμενη ταλάντωση διαχωρίζονται με γνώμονα το φασματικό τους μέγεθος σε υψηλής, μεσαίας και χαμηλής συχνότητας. Ταλαντώσεις με αυτή την ομάδα διαταραχών έχουμε αρκετά σε δίκτυα διανομής, συχνά εξαιτίας ζεύξης και απόζευξης καταναλωτών, συστοιχιών πυκνωτών κ.λπ. Βλέπουμε στην Εικόνα 11 και την συμπεριφορά της ταλάντωσης σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 11. Κρουστικές υπερτάσεις και αποσβεννύμενη ταλάντωση σε σχέση με τον χρόνο. [4]

Κεφάλαιο 3^ο Τεχνικές εξάλειψης αρμονικών ρεύματος

3.1 Τεχνικές εξάλειψης αρμονικών και μείωση του προβλήματος

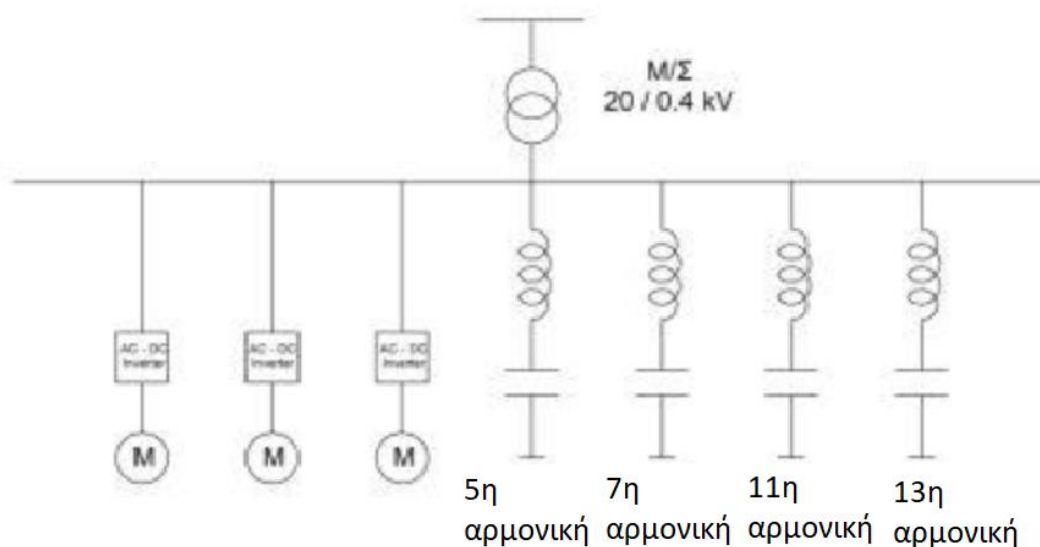
Τα προβλήματα αρμονικών ρεύματος και τάσης, όπως προαναφέρθηκαν, χρήζουν άμεσης λύσης με διάφορους τρόπους. Για συστήματα (Variable Speed Drive - VSD) και άλλους μετατροπείς, που παράγουν μικρή ισχύ, υπάρχουν λύσεις φθηνές, με τις οποίες μπορούμε να έχουμε πολύ καλή μείωση των αρμονικών. Σε περίπτωση που η ισχύς των μετατροπέων είναι μεγάλη και η απαίτηση για την καλύτερη δυνατή λειτουργία είναι μεγαλύτερη, υπάρχουν και πιο ακριβές λύσεις, όπως τα ενεργά φίλτρα [23]. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένα φίλτρα, τα οποία βοηθούν στην ολική ή στη μερική εξάλειψη των αρμονικών ρευμάτων και τάσεων. Τα παθητικά και ενεργά φίλτρα απαρτίζουν τις δύο θεμελιώδεις τάξεις φίλτρων που υπάρχουν σήμερα στην αγορά παγκοσμίως [24].

Πρώτα από όλα το ερώτημα που θα ήταν σωστό να απαντηθεί από τον επενδυτή που σκέφτεται την αγορά φίλτρων, ωστόσο να διαφυλάξει τις συσκευές του, να κάνει οικονομία ενέργειας και να συλλέξει τα αθροιστικά πλεονεκτήματα της εγκατάστασης φίλτρων είναι αν θα ήταν σωστό να προσφύγει στην αγορά παθητικών ή ενεργών φίλτρων. Τα παθητικά φίλτρα όσο και τα ενεργά φίλτρα αποζητούν στην μείωση των αρμονικών. Όμως, οι δύο κατηγορίες ξεχωρίζουν αρκετά ως προς τη βελτίωση συνημίτονου, τις λειτουργίες του, τον χρόνο λειτουργίας τους, τον τρόπο λειτουργίας, τον βαθμό μείωσης αρμονικών, και το κόστος.

3.2 Παθητικά φίλτρα

Τα παθητικά φίλτρα κανονικά επιδιώκουν στην απαλοιφή μιας ξεχωριστής τάξης αρμονικής (3^{ης}, 9^{ης} κ.λπ.) ή σε μια ομάδα αρμονικών και σχεδιάζονται ισόμετρα με το πλάτος των αρμονικών ρεύματος ή τάσης της εγκατάστασης, υλοποιώντας τις κατάλληλες μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι, είναι σκόπιμο για περιπτώσεις όπου υπάρχει μικρός αριθμός αρμονικών να προτιμώνται παθητικά φίλτρα, επειδή στις καταστάσεις που υφίσταται μεγάλος αριθμός αρμονικών, απαιτείται και ειδικό νούμερο παθητικών φίλτρων, πολλαπλασιάζοντας το κόστος συνολικά.

Σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως της Εικόνας 12, τα μη γραμμικά φορτία παράγουν αρμονικές 5^{ης}, 7^{ης}, 11^{ης} και 13^{ης} τάξης, αυτό απαιτεί την χρήση τεσσάρων διαφορετικών συντονισμένων παθητικών φίλτρων, ένα για κάθε αρμονική.



Εικόνα 12. Συντονισμένα παθητικά φίλτρα για συγκεκριμένες τάξης αρμονικών. [14]

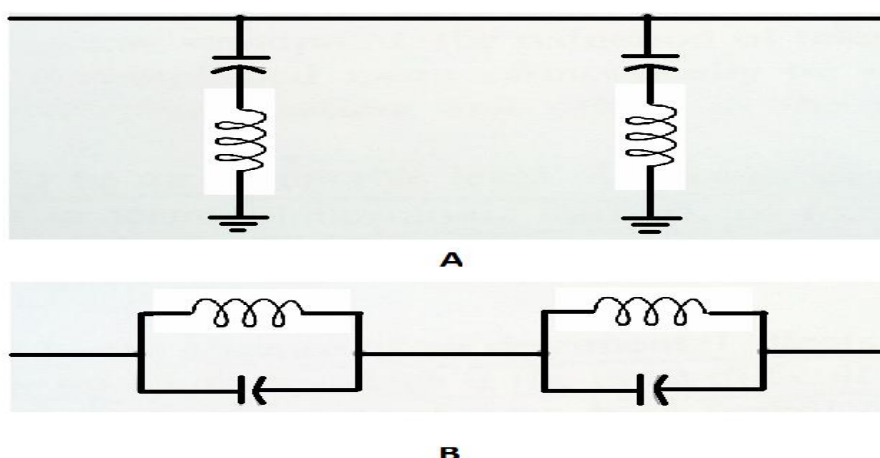
Τα παθητικά φίλτρα δεν απαλείφουν τελείως το πλάτος των αρμονικών, παρά όμως ένα ποσοστό από αυτές. Όστε, σε καταστάσεις που οι ανώτερες αρμονικές δεν είναι αξιοσημείωτα αυξημένες σε σύγκριση με τη θεμελιώδη 1^η αρμονική, η επίπτωση των παθητικών φίλτρων καταστέλλει το πλάτος των αρμονικών σε λογικά πλαίσια. Σε περίπτωση που υπάρχει, μια αρκετά αυξημένη τάξη αρμονικών, θα οφείλει το φίλτρο που θα εγκατασταθεί να έχει αρκετά αυξημένη δυνατότητα απόσβεσης, άρα να την μειώσει ουσιαστικώς. Τα παθητικά φίλτρα είναι χρήσιμα για καταστάσεις τοπικής αντιστάθμισης και μειωμένου αριθμών αρμονικών, όπου η λειτουργία ενεργών φίλτρων θεωρείται αδύνατη οικονομικά. Σε εγκαταστάσεις όπου οι αρμονικές παράγονται σε ορισμένα μη γραμμικά φορτία και δεν χρήζει ανάγκης κεντρικής αντιστάθμισης, σε πολλές εφαρμογές συνηθίζεται η χρησιμοποίηση παθητικών φίλτρων. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι κατασκευαστές αυτών των εξοπλισμών όπως inverters κ.λπ. παρέχουν παθητικά φίλτρα ως συμπληρωματικό εξοπλισμό [25].

Ο χρόνος λειτουργίας των παθητικών φίλτρων είναι συγκεκριμένος, αφότου οι πυκνωτές, που συγκροτούν και το κύριο κατασκευαστικό στοιχείο, έχουν μικρή διάρκεια λειτουργίας, ενώ συχνά παρουσιάζουν φαινόμενα συντονισμού και υπερτάσεων. Η τιμή ενός παθητικού φίλτρου είναι αρκετά μικρότερη σχετικά με την αντίστοιχη τιμή ενός ενεργού, πρωτίστως εξαιτίας της αρκετά απλής κατασκευής τους. Παρ' όλα αυτά, για

διάφορους λόγους, στις μεγάλες εγκαταστάσεις είναι υποχρεωτικό να εγκατασταθεί μεγάλος αριθμός φίλτρων, οπότε ο αριθμός των παθητικών φίλτρων εξαρτάται από το πόσο μεγάλη είναι η εγκατάσταση. Σκοπός των παθητικών φίλτρων είναι η μείωση των αρμονικών τάσεων και των ρευμάτων στο δίκτυο σε ανεκτά επίπεδα.

Τα παθητικά φίλτρα μπορούν να ξεχωρίσουν από τον τρόπο σύνδεσής τους στο κυρίως κύκλωμα, τη θέση τους, αν συντονίζονται εύκολα και τέλος από την ζήτηση που έχουν στον αριθμό των συχνοτήτων και των εφαρμογών. Τα παθητικά φίλτρα γίνετε να τοποθετηθούν στην εναλλασσόμενη και στη συνεχή πλευρά των μετατροπών. Μπορούν, επίσης, να τοποθετούνται στο κοινό σημείο σύζευξης (Point of Common Coupling - PCC).

Οι αρμονικές μπορούν να εμποδίζονται να εισρεύσουν από τα μη γραμμικά φορτία στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας λόγω, μεγάλης σειράς μιγαδικής αντίστασης, μίας παράλληλης μικρής αντίστασης, η οποία αποτρέπει τις αρμονικές και με συνδυασμό των δύο προηγούμενων καταστάσεων. Ένα παθητικό φίλτρο εν σειρά θα χρειαστεί να διανέμει όλο το ρεύμα του αρχικού κυκλώματος και επιπρόσθετα, καλό θα ήταν το φίλτρο να είναι μονωμένο. Το φίλτρο που συνδέεται παράλληλα γειώνεται και μεταφέρει μόνο το αρμονικό ρεύμα για το οποίο είναι κατασκευασμένο, επιπρόσθετα με ένα μικρό ρεύμα, πολύ ελάχιστο όμως από αυτό του κύριου δικτύου. Οπότε, ένα παθητικό φίλτρο σειράς είναι πολύ ακριβότερο, συγκριτικά με ένα παράλληλο φίλτρο παρόμοιας αποδοτικότητας όπως βλέπουμε και την δομή τους στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Α) Παθητικό παράλληλο φίλτρο, Β) Παθητικό φίλτρο σειράς. [5]

Τα παθητικά φίλτρα χωρίζονται επίσης στα αποσυντονισμένα φίλτρα και στα συντονισμένα φίλτρα. Τα αποσυντονισμένα φίλτρα είναι κατασκευασμένα να αποκόβουν ρεύματα σε συχνότητες κοντά σε αυτές των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιτία που υλοποιούνται με αυτήν την μέθοδο είναι για να καταφέρουν να αποκόβουν ένα μέρος αρμονικών ρευμάτων σε ένα σημείο ενδιαφέροντος, μειώνοντας παράλληλα επιπλέον από μία αρμονικές και ελαχιστοποιώντας παράλληλα την ολική αρμονική παραμόρφωση THD%. Τα παθητικά φίλτρα χρήζουν σπουδαία τεχνογνωσία κατά το σχεδιασμό τους και την κατασκευή τους, αφού, δεν συντονίζονται τέλεια στις αρμονικές που παρουσιάζονται στο υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κι έτσι δεν δημιουργείται κίνδυνος παρουσίας μεγάλων ρευμάτων στους κόμβους και βρόχους που ενώνονται.

Στην κατάσταση που εγκαθίσταται παθητικό αποσυντονισμένο φίλτρο σε κάποια περιοχή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό παρουσιάζει μία αρκετά ελάχιστη σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού του, τόσο σε αυτήν όσο και σε γειτονικές συχνότητες σε αυτήν του συντονισμού του παθητικού φίλτρου, να περνούν τα πάντα από τον συγκεκριμένο κλάδο. Οπότε, τα αποσυντονισμένα παθητικά φίλτρα αποκόβουν ένα μέρος των αρμονικών ρευμάτων και όχι μία ορισμένη αρμονική ρεύματος. Τα μειονέκτημά τους, ωστόσο, είναι ότι δεν γίνεται να εξαλείψουν όλο το αρμονικό περιεχόμενο της αρμονικής αλλοίωσης, με συνέπεια να υπάρχουν και ύστερα υπολείμματα αρμονικών στο δίκτυο.

Στην Εικόνα 14 όσον αφορά στα συντονισμένα παθητικά φίλτρα, αυτά είναι μελετημένα και σχεδιασμένα να αποκόβουν ρεύματα σε συχνότητες παρόμοια με αυτά των αρμονικών ρευμάτων που παρουσιάζονται στο δίκτυο. Απαρτίζονται από αριθμό πηνίων και πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα από το δίκτυο. Το κάθε φίλτρο έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού και ιδιαίτερα, παρόμοια, που να αποκόβει μία ακριβείς αρμονική ρεύματος.

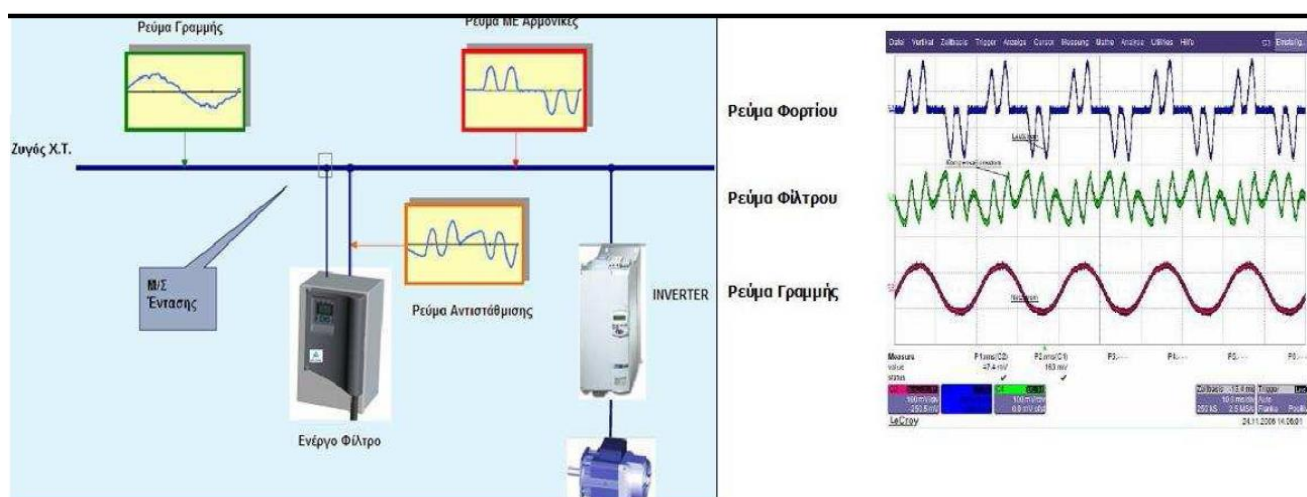


Με τα συντονισμένα παθητικά φίλτρα μείωσης αρμονικών πετυχαίνουμε εξαιρετική απαλοιφή της αρμονικής παραμόρφωσης συνολικά στο δίκτυο, αφού εξαλείφουν όλες τις αρμονικές για τις οποίες σχεδιάστηκαν και υπάρχουν στο δίκτυο. Οι συντονισμένες συχνότητες των συντονισμένων παθητικών φίλτρων υπάρχουν αρκετά κοντά στις παράλληλες συχνότητες των αρμονικών ρευμάτων που αποκόβουν με επίδραση οι σύνθετες αντιστάσεις των παθητικών φίλτρων να είναι σπουδαία μικρότερες με αποτέλεσμα να παράγονται ευμεγέθη ρεύματα αρμονικών, τα οποία καταλήγουν τους πυκνωτές του φίλτρου σε μεγάλη εξάντληση. Σύμφωνα με τα υπόλοιπα, σε συνδυασμό με το φαινόμενο ότι δεν αντισταθμίζουν ομαλά την άεργο ισχύ σε δυναμικά φορτία και εμπεριέχουν την ανασφάλεια αφομοίωσης αρμονικών ρευμάτων από τη μεριά της Μ.Τ. του μετασχηματιστή ισχύος, τοποθετούνται σημαντικά σχολαστικά στο σχεδιασμό, στην εφαρμογή και τέλος στην τοποθέτησής τους στη βιομηχανία και δίκτυο.

Συγχρόνως, κύρια τους πλεονεκτήματα συγκροτούν η άψογη εξάλειψη των αρμονικών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε βαθμό παραπάνω από αυτό που επιτυγχάνεται με τα αποσυντονισμένα παθητικά φίλτρα, συγχρόνως με την εξάλειψη των αρμονικών, αντισταθμίζουν και την άεργο ισχύ του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

3.3 Ενεργά φίλτρα

Τα ενεργά φίλτρα είναι ηλεκτρονικά ισχύος, που δημιουργούν και εγχέουν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το απεναντίας ρεύμα αρμονικών, από αυτό που παράγουν οι πηγές αρμονικών της εγκατάστασης. Τα ενεργά φίλτρα δεν καθορίζονται ακριβώς με τις ανάγκες καθορισμένων εγκαταστάσεων και καταναλωτών. Η Εικόνα 15 μας δίνει την σχηματική απεικόνιση ότι οι ενέργειες τους είναι μεταβαλλόμενες, ωστόσο να γίνετε να επαρκούν σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών και καταναλωτών, πάραυτα και στις δυναμικές αλλαγές των αρμονικών ρευμάτων. Οπότε, ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται μόνο ένα ενεργό φίλτρο για την μείωση ή απαλοιφή των αρμονικών όλων των συχνοτήτων, επιπλέον και αν τα μεγέθη των αρμονικών ρευμάτων διακυμαίνονται [25].



Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου. [19]

Αυτό θέτει τα ενεργά φίλτρα πρώτη προτίμηση για καταναλωτές με αρμονικές παραπάνω διαφορετικών συχνοτήτων, όμως και για καταναλωτές με τακτικές διακυμάνσεις στις συνθήκες λειτουργίας. Τα ενεργά φίλτρα επιτυγχάνουν μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης αρμονικών, σε σχέση με τα παθητικά φίλτρα, που επιτυγχάνουν σχεδόν και σε όλες τις αρμονικές χαμηλής συχνότητας (150 HZ – 350 HZ). Μερικά, πολύ ακριβά ενεργά φίλτρα έχουν σχηματιστεί ακριβώς για να αποκόπτουν αρμονικές, επιπλέον σε υψηλές συχνότητες 5-6 kHz [26].

Τα ενεργά φίλτρα είναι αξιόπιστα σε καταστάσεις εγκαταστάσεων μεγάλης ισχύος και εξειδικευμένων περιπτώσεων. Αντίστοιχες εγκαταστάσεις είναι βιομηχανικοί καταναλωτές με αρκετό αριθμό μη γραμμικών φορτίων μηχανές CNC, inverters, αντλίες, ηλεκτροσυγκολλήσεις και καταναλωτές με ευμέγεθες όγκο ηλεκτρονικού εξοπλισμού H/Y,

τηλεφωνικά κέντρα, τυπογραφεία, data centers επιπρόσθετα καταναλωτές με αρκετό αριθμό αρμονικών, συγκεκριμένοι καταναλωτές που χρήζουν σημαντικά ελάχιστα επίπεδα αρμονικών ρευμάτων, όπως τα αεροδρόμια και νοσοκομεία $THD\% < 3\%$. Ακόμη σε περιπτώσεις, στις οποίες χρειάζεται έλεγχος των ενεργών φίλτρων από εκσυγχρονισμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου όπως PLC - SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), καθώς και από καταναλώσεις που αντικρίζουν ζητήματα από μεταβατικά φαινόμενα, όπως εκκινήσεις κ.λπ., αλλά και από συγκεκριμένα προβλήματα, που προέρχονται από αρμονικές, όπως οι δια-αρμονικές, ο συντονισμός, και το flickering.

Τα ενεργά φίλτρα έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής, σε σχέση με τα παθητικά. Οφείλεται στον τρόπο υλοποίησής τους, είναι ολότελα προστατευμένα σε περιπτώσεις υπερφορτίσεων, καθώς η απαίτηση συντήρησής τους είναι μηδαμινές, αφότου αναφέρονται μόνο σε αναλώσιμα περιφερειακά όπως ασφάλειες, πυκνωτές κ.λπ. Σε περίπτωση όπου λειτουργούν χωρίς σταματημό όλο το 24ώρο, έχουν εξασφαλισμένη διάρκεια λειτουργίας άνω τις δεκαετίας.

Η κοστολόγηση των ενεργών φίλτρων διαφέρει ανά μονάδα εγκατάστασης και ισχύος. Η επάρκεια τους, ωστόσο, να υλοποιούν κεντρική αντιστάθμιση, επιπρόσθετα και εξάλειψη αρκετού μέρους αρμονικών συχνοτήτων, επιτρέπει στην πράξη πολύ μικρότερο αριθμό φίλτρων, στις περισσότερες εφαρμογές ένα ενεργό φίλτρο αρκεί. Επιπρόσθετα, εξαιτίας του μεγάλου χρόνου λειτουργίας τους, τα μεγάλα μέτρα προστασίας, τις ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και την σπουδαία εξοικονόμηση ενέργειας που συνεισφέρουν, διασφαλίζουν άμεση πτώση του αρχικού προϋπολογισμού αγοράς τους και εξαιτίας αυτού, απαρτίζουν την οικονομικότερη επιλογή σε βάθος χρόνου. Στον Πίνακα 1 βλέπουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ενεργών φίλτρων, όπως και επίσης παρατηρούμε ότι τα οφέλη είναι περισσότερα ενός ενεργού φίλτρου.

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός ενεργού φίλτρου.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Αποτελεσματική λύση	1. Πολύ πιο ακριβή λύση από τα παθητικά φίλτρα και άλλες μεθόδους
2. Συντελεστής ισχύος κοντά στη μονάδα	2. Μεγάλο μέγεθος, άρα περισσότερος εξοπλισμός
3. Δεν απαιτείται ειδικός μετασχηματιστής	3. Ενεργή λύση, οπότε βασίζεται στην αξιοπιστία των ηλεκτρονικών
4. Οι χαμηλές απώλειες μετασχηματισμού αντισταθμίζουν τη συνολική απόδοση	
5. Αρμονική σταθερή απόδοση έναντι ανισορροπιών στην τροφοδοσία	
6. Μειώνει το μέγεθος των εφεδρικών γεννητριών	
7. Η μόνη λύση που μπορεί να δώσει ώθηση ο DC bus τάσης μέχρι 15%, όταν απαιτηθεί από τον κινητήρα	

3.4 Κατηγορίες ενεργών φίλτρων

Στην ουσία, ένα ενεργό φίλτρο είναι όμοιο κατασκευαστικά με έναν αντιστροφέα (inverter), δηλαδή είναι ένας μετατροπέας, ο οποίος μεταποιεί το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Υφίστανται δύο είδη κυκλωμάτων όπου αξιοποιούνται για την παραγωγή ενεργών φίλτρων:

- Ενεργά φίλτρα πηγής τάσης
- Ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος

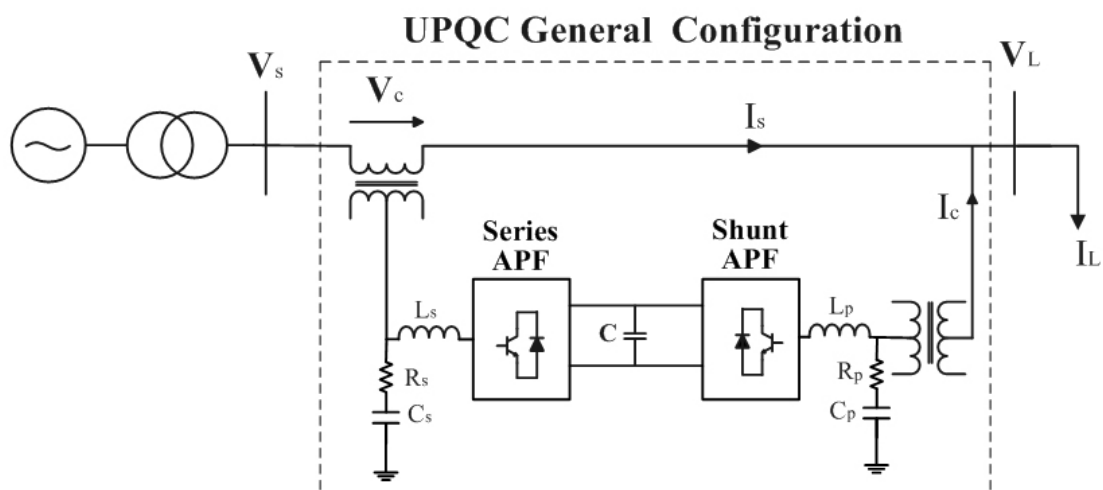
Στην Εικόνα 16 παρουσιάζετε η συνδεσμολογία ενός ενεργού φίλτρου πηγής τάσης με έναν εκλεκτή αρμονικών και την μονάδα ελέγχου.

Σε αυτήν την συνδεσμολογία αξιοποιείται ένα πηνίο ως εξοπλισμός αποθήκευσης ενέργειας, για την αδιάκοπη εκροή του ρεύματος στον κλάδο συνεχούς ρεύματος. Τα συγκεκριμένα ενεργά φίλτρα, παρουσιάζουν τίμια λειτουργία, όμως έχουν σπουδαίες φθορές και χρήζουν παραπάνω πυκνωτές στην έξοδό τους, οι οποίοι συμπεριφέρονται ως φίλτρα που αποκόβουν τις μη επιθυμητές αρμονικές υψηλής συχνότητας.

Όμως, υπάρχει μια παραπάνω κατηγορία των ενεργών φίλτρων, που θα μπορούσε να γίνει με μέτρο την τοπολογία του κυκλώματος. Πρόκειται για τους σύνθετους ρυθμιστές ποιότητας ισχύος (Unified Power Quality Conditioner - UPQC), τα υβριδικά ενεργά φίλτρα (Hybrid Active Filter - HAF), τα ενεργά φίλτρα συνδεσμολογίας σειράς (Series Active Filter - SAF) και τα ενεργά φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας (Shunt Active Filter - SAF).

3.4.1 Σύνθετοι ρυθμιστές ποιότητας ισχύος

Οι σύνθετοι ρυθμιστές ποιότητας ισχύος (Unified Power Quality Conditioner - UPQC) όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 18 αποτελούνται από ένα μείγμα ενεργών φίλτρων παράλληλης και σειράς συνδεσμολογίας. Η συνδεσμολογία του φίλτρου σειράς εμποδίζει και αποκόπτει τις αρμονικές της τάσης και το φίλτρο της παράλληλης συνδεσμολογίας αντίστοιχα τις αρμονικές του ρεύματος.



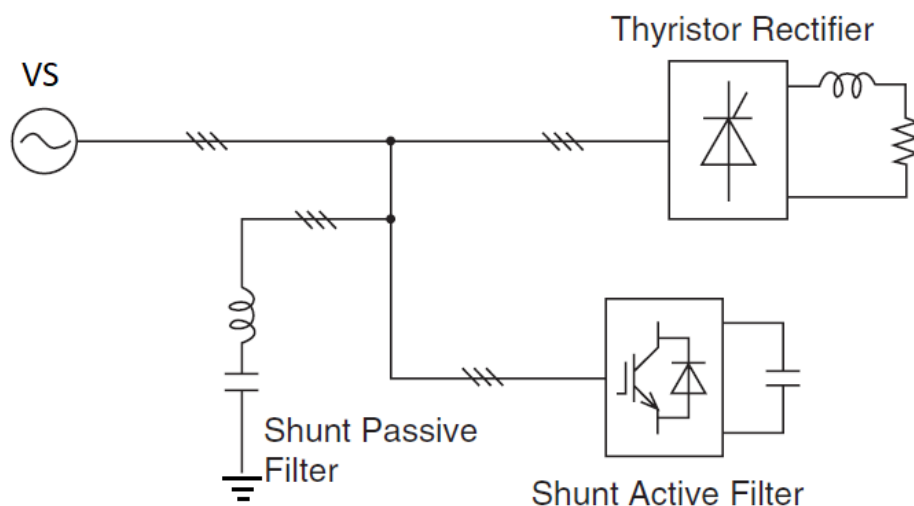
Εικόνα 18. Γενικό κύκλωμα ενός σύνθετου ρυθμιστή ποιότητας ισχύος (UPQC). [23]

Υπάρχουν δύο κατηγορίες φίλτρων :

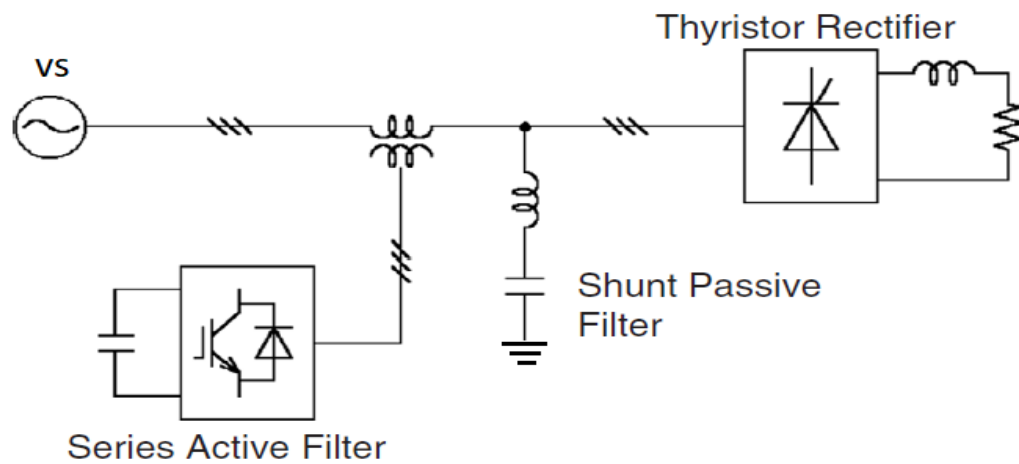
- Το ενεργό φίλτρο σειράς, το οποίο τοποθετείται κοντά στο φορτίο και το παράλληλο φίλτρο κοντά στο δίκτυο, με το σειράς να συνηθίζεται για την μείωση των αρμονικών της τάσης του φορτίου και το παράλληλο για την απαλοιφή των αρμονικών του ρεύματος στο δίκτυο και τη καλυτέρευση του συντελεστή ισχύος.
- Το παράλληλο ενεργό φίλτρο, το οποίο εγκαθίσταται κοντά στον εξοπλισμό για την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος στον εξοπλισμό και το ενεργό φίλτρο σειράς στην μεριά του συστήματος για την εξάλειψη των αρμονικών της τάσης του συστήματος.

3.4.2 Υβριδικά ενεργά φίλτρα

Τα υβριδικά ενεργά φίλτρα συντελούν μία ένωση των παθητικών και ενεργών τεχνικών λειτουργίας όπως βλέπουμε στην Εικόνα 19 και απευθύνεται όχι μόνο για την εξάλειψη των αρμονικών, όμως και για την αρμονική μόνωση ανάμεσα φορτίου και δικτύου, καθώς και τον έλεγχο των παραμορφώσεων της τάσης. Η εφαρμογή αυτή απαρτίζει συχνά μία οικονομοτεχνική μελέτη, σε σύγκριση των ενεργών φίλτρων. Ορισμένες από τις υβριδικές τοπολογίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 20 και στην Εικόνα 21.

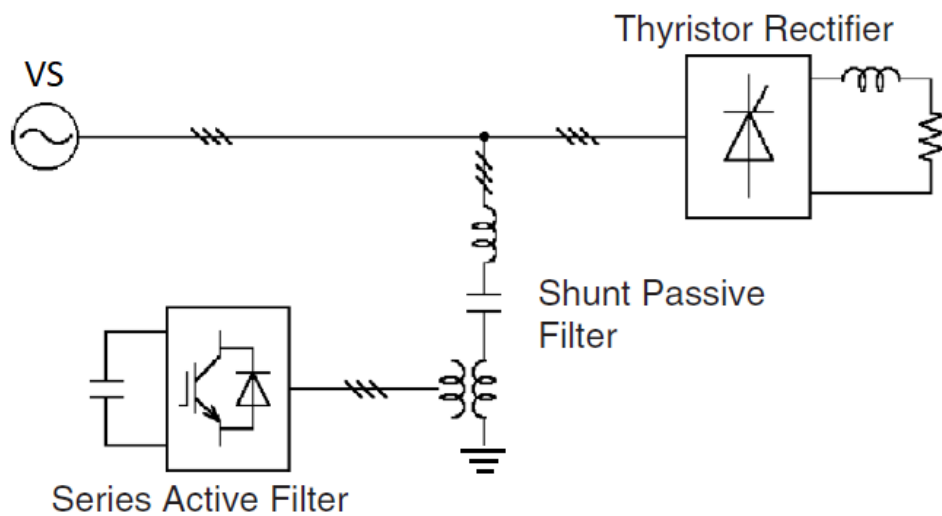


Εικόνα 19. Ενεργό και παθητικό φίλτρο παράλληλης συνδεσμολογίας. [23]



Εικόνα 20. Ενεργό φίλτρο σειράς και παθητικό φίλτρο σε παράλληλη συνδεσμολογία. [23]

Να επισημανθεί ότι τα παθητικά φίλτρα LC είναι συντονισμένα σε ορισμένες συχνότητες για την απαλοιφή αρμονικών ρευμάτων αμελητέων συχνοτήτων, ελαχιστοποιώντας και εξαλείφοντας έτσι αξιοσημείωτα τον όγκο του ενεργού φίλτρου.



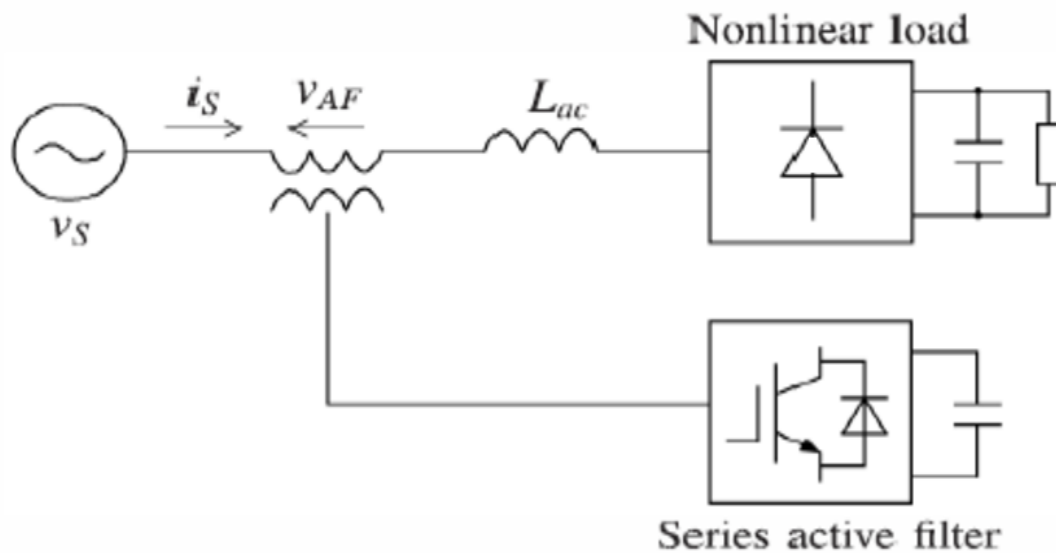
Εικόνα 21. Ενεργό φίλτρο σειράς και παθητικό φίλτρο σε συνδεσμολογία σειράς. [23]

3.4.3 Ενεργά φίλτρα συνδεσμολογίας σειράς

Τα ενεργά φίλτρα συνδεσμολογίας σειράς, λειτουργούν ως πηγές τάσεις, όπου τοποθετούνται σε σειρά με φορτίο και το δίκτυο με την χρήση μετασχηματιστών και συμπεριφέρονται αντίστοιχα με την αρχή της απομόνωσης των αρμονικών. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις ενεργών φίλτρων συνδεσμολογίας σειράς, με τα οποία επιτυγχάνεται:

1. Μηδενική έγχυση στη πρώτη συχνότητα ή θεμελιώδης συχνότητα
2. Μεγάλη έγχυση στην υψηλή τάξη αρμονικών

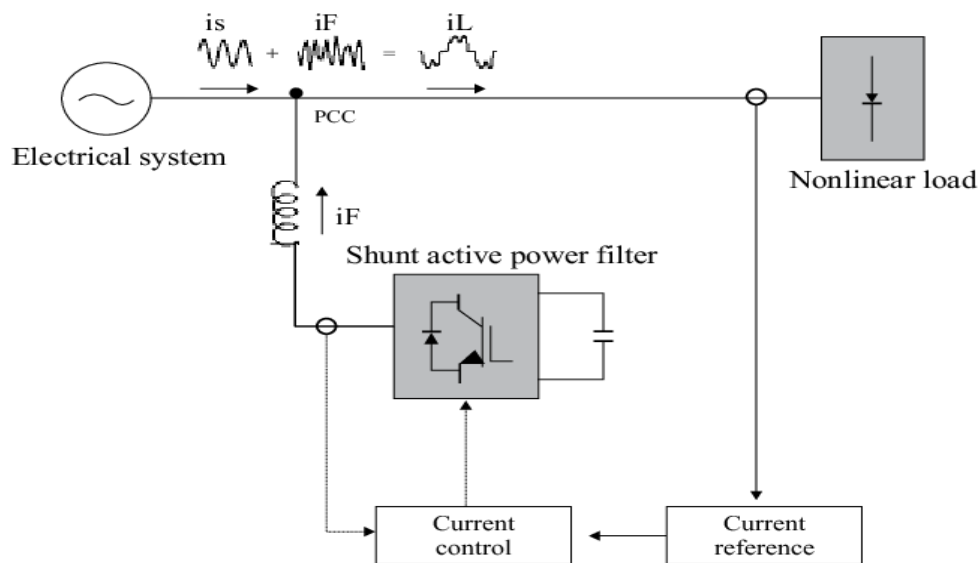
Οπότε, περιορίζεται η διαρροή των αρμονικών από και προς το δίκτυο, καθώς βλέπουμε την συνδεσμολογία στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22. Ενεργό φίλτρο συνδεσμολογίας σειράς. [23]

3.4.4 Ενεργά φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας

Τα ενεργά φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας αυτού του τύπου τα φίλτρα όπου τοποθετούνται παράλληλα στο φορτίο, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 23. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στον εντοπισμό ρευμάτων αρμονικών στο φορτίο και στην συνέχεια στην εξάλειψή τους, εξαιτίας της δημιουργίας ενός ρεύματος φιλτραρίσματος στο σημείο κοινής σύζευξης. Στην ουσία συμπεριφέρονται ως πηγές ρεύματος. Το ρεύμα φιλτραρίσματος είναι όμοιο με το ρεύμα παραμόρφωσης του φορτίου, επομένως το ρεύμα δικτύου που παράγεται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ημιτονοειδές.



Εικόνα 23. Ενεργό φίλτρο παράλληλης συνδεσμολογίας. [23]

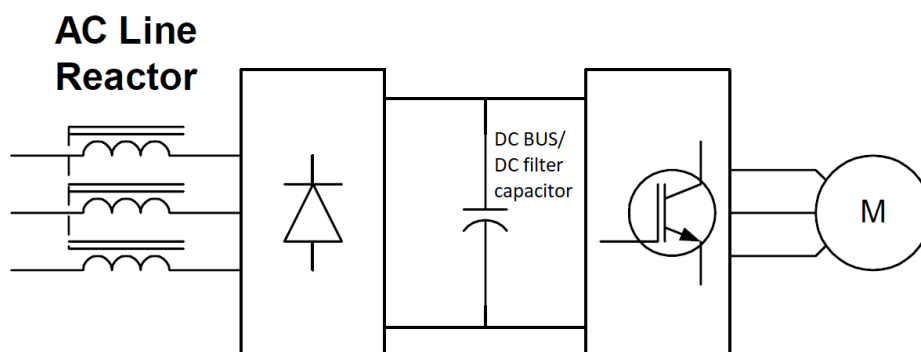
3.5 Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς και πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης

Ένα εναλλασσόμενο πηνίο σειράς (AC line reactor) ή ένα πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης (DC link choke) είναι ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, όταν το ρεύμα περνάει ανάμεσα του. Αυτό το μαγνητικό πεδίο αυξάνει τη σύνθετη αντίσταση (Z) της γραμμής και μειώνει το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο που εγχύθηκε στις εγκαταστάσεις της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ανάλυση των αρμονικών, μπορούμε να εξετάσουμε το αρμονικό περιεχόμενο, χωρίζοντας σε τμήματα μια μη ημιτονοειδής κυματομορφή. Οι αρμονικές, όπως η 5^η και η 7^η, έχουν μεγάλο πλάτος ρεύματος και, επιπλέον, έχουν μεγαλύτερη επίδραση πάνω στην συνολική αρμονική παραμόρφωση.

Αυτό συμβαίνει επειδή ένας AC οδηγός με 3% line reactor ή 5% dc link choke παρουσιάζει μια συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάξης, περίπου, 30-35%, ενώ το πλάτος της αρμονικής είναι περίπου στο διπλάσιο. Η γείωση στον AC line reactor είναι σημαντική, σχετικά με τα ρεύματα σφάλματος κατά την γείωση, έτσι, ώστε να μην μπορούν να ρέουν μέσα από τον εξοπλισμό και να τον καταστρέψουν.

3.5.1 Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς

Ένα εναλλασσόμενο πηνίο σειράς AC line reactor εγκαθίσταται σε σειρά με τη γραμμή τροφοδοσίας και την είσοδο του μετατροπέα. Βοηθούν στο να μετριάζουν τις αρμονικές και επειδή είναι μεταξύ της γραμμής και του οδηγού, είναι ικανοί να δρουν σαν ρυθμιστές σε στιγμιαίες αυξήσεις της τάσης και άλλων φαινομένων, που έχουν σχέση με την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο επιδιωκόμενος σκοπός ενός AC line reactor δεν είναι να προσφέρει υψηλά επίπεδα προστασίας από την υπέρταση. Αν κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό, δηλαδή μεγαλύτερη προστασία, διατίθεται στην αγορά ειδικές συσκευές, οι οποίες προστατεύουν τον εξοπλισμό από τέτοια φαινόμενα. Τέτοιες μπορεί να είναι ένα μεταλλικό οξείδιο βαρίστορ (Metal Oxide Varistor - MOV) ή ένας απαγωγός υπερτάσεως αλλιώς αντικεραυνικά (Surge Protection Device - SPD), που από τις εφαρμογές αποδεικνύεται ότι είναι η καλύτερη λύση. Το μειονέκτημα ενός AC line reactor είναι ότι είναι μεγαλύτερο σε όγκο από το DC link choke και συνήθως, πιο ακριβό κατά την αγορά. Στην Εικόνα 24 βλέπουμε το διάγραμμα ενός AC line reactor και στον Πίνακα 2 τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός τέτοιου εξοπλισμού [27].



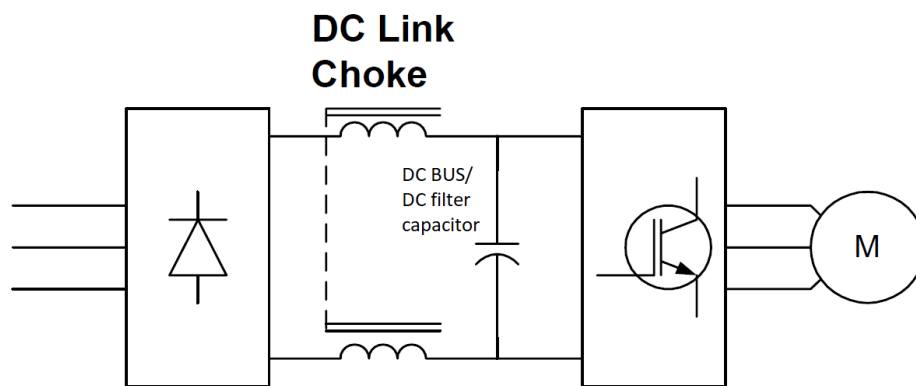
Εικόνα 24. AC line reactor τοποθετημένος πριν από τον ανορθωτή του οδηγού. [17]

Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός εναλλασσόμενου πηνίου σειράς.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Μειώνει τις αρμονικές ρεύματος	1. Πτώση τάσης στη μέγιστη ισχύ
2. Μειώνει τα ρεύματα εισόδου στον οδηγό	2. Πρόσθετη θερμότητα στο χώρο εγκατάστασης
3. Καταστέλλει τις μεταβατικές τάσεις	
4. Αντισταθμίζει την μη ισορροπημένη τάση γραμμής	
5. Εξαιρετικά αξιόπιστη παθητική λύση	

3.5.2 Πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης

Ένα πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης (DC link choke) συνδέεται μεταξύ των διόδων του ανορθωτή και του φίλτρου πυκνωτή DC BUS και μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό στο να εξαλείφει τις αρμονικές από ότι ένας AC line reactor, κάτι που εξαρτάται από τη σειρά της κάθε αρμονικής. Ένα DC link choke, σε σύγκριση με έναν AC line reactor, είναι μικρότερο σε μέγεθος και προσθέτει την απαραίτητη σύνθετη αντίσταση για την μείωση των αρμονικών, χωρίς να υπάρχει πτώση τάσης στη γραμμή του δικτύου. Επιπλέον, ένα DC link choke δεν παρέχει καμία προστασία ενάντια στις υπερτάσεις που εισέρχονται στον ανορθωτή του εξοπλισμού, παρέχει όμως προστασία ενάντια στις υπερεντάσεις. Στην Εικόνα 25 βλέπουμε την συνδεσμολογία και στον Πίνακα 3 τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός DC link choke.



Εικόνα 25. DC Link choke τοποθετημένο μεταξύ ανορθωτή οδηγού και φίλτρου πυκνωτή. [17]

Πίνακας 3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός πηνίου συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Αυξάνει την αξιοπιστία του οδηγού και βοηθά τις εγκαταστάσεις να συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα	1. Δεν παρέχει καμία προστασία στον ανορθωτή του οδηγού από πιθανή μεταβατική τάση που προκαλείται από κεραυνούς ή απότομη διακοπή της λειτουργίας των πυκνωτών
2. Δεν προκαλεί πτώση τάσης στο οδηγό και είναι κατάλληλο για περιπτώσεις, όπου είναι εγκατεστημένος σε μια γραμμή με συχνές πτώσεις τάσης	
3. Φθηνότερο από ένα AC line reactor για την ίδια σύνθετη αντίσταση και τον ίδιο βαθμό αρμονικής μείωσης	

3.5.3 Μεταβατικές διαταραχές της τάσης με εναλλασσόμενο πηνίο σειράς και πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης

Είναι επίσης σημαντικό ότι, όσον αφορά στις διαταραχές της τάσης, να έχουμε ένα εναλλασσόμενο πηνίο σειράς (AC line reactor) ή ένα πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης (DC link choke) στην είσοδο. Συγκεκριμένα, οι βυθίσες τάσης είναι πιο επιρρεπείς στο να προκαλούν βλάβες στους μετατροπείς από ότι οι απότομες μεταβολές της τάσης. Ακολουθώντας μια κατάσταση υπότασης, το DC BUS πρέπει να είναι φορτισμένο για να ταιριάζει με την τάση της πηγής και, δεδομένου ότι η τάση δεν μπορεί να αλλάξει από τον πυκνωτή, σε μια άμεση εισροή ρεύματος είναι αυτό που θα προσπαθήσει να σταθεροποιήσει το σύστημα και την τάση του πυκνωτή.

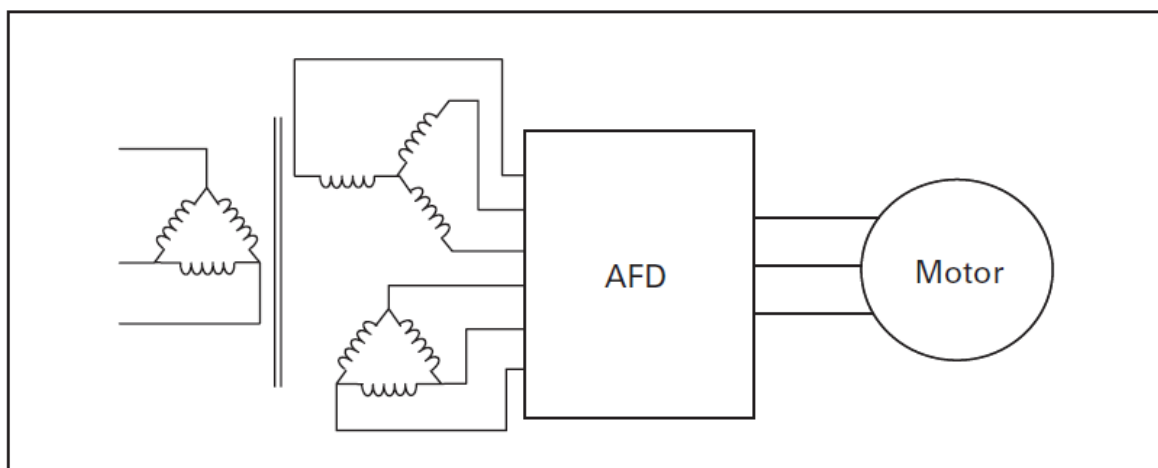
Κατά την διάρκεια ενός κανονικού ξεκινήματος, το μη φορτισμένο κύκλωμα περιορίζει αυτά τα ρεύματα εισόδου, αλλά ακολουθούν βυθίσες μικρές διακοπές της τάσης. Όταν δεν έχουμε κατά το ξεκίνημα ένα μη φορτισμένο κύκλωμα, το AC line reactor ή DC link choke πρέπει να περιορίσει το ρεύμα εισόδου. Τα εξαρτήματα του ανορθωτή κινδυνεύουν όταν η ισχύς βρεθεί στα κανονικά επίπεδα. Είτε με ένα AC line reactor ή DC link choke στην είσοδο του μετατροπέα, η επιπλέον επαγωγή αντιστέκεται στο υψηλό ρεύμα εισροής, προστατεύοντας τις ανορθωτικές διατάξεις και τον πυκνωτή DC BUS του οδηγού. Ένα ποσοστό της τάξης του 5% DC link choke είναι πιο αποτελεσματικό από ότι ένα ποσοστό 3% AC line reactor, επειδή προσφέρει πολύ περισσότερη επαγωγή στο κύκλωμα, ώστε να περιορίσει το ρεύμα εισροής. Για υπερτάσεις μικρής διάρκειας, όπως συμβαίνουν από τους πυκνωτές της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η επαγωγή που προσφέρουν ένα AC line reactor ή ένα DC link choke περιορίζει τα ρεύματα εισροής και εκροής μέσα στο φίλτρο πυκνωτή DC BUS, προστατεύοντας τον οδηγό.

3.6 Μείωση αρμονικών με μετατροπέα 12 και 18 παλμών

Ο πιο κοινός μετατροπέας σε ένα τριφασικό σύστημα, ο οποίος χρησιμοποιείται στα διάφορα συστήματα, όπως τα VFDs (Variable Frequency Drives), είναι αυτός των 6 παλμών. Ο μετατροπέας 6 παλμών είναι ο πιο στιβαρός μετατροπέας και, παράλληλα, η πλέον οικονομική λύση μέχρι σήμερα, αν και δημιουργεί στο ρεύμα της γραμμής αρκετές αρμονικές χαμηλής τάξης.

Ένας μετατροπέας 12 παλμών αποτελείται από 12 ημιαγωγικά στοιχεία. Ουσιαστικά, πρόκειται για δύο μετατροπείς 6 παλμών, συνδεδεμένους παράλληλα, ώστε να

τροφοδοτούν με τάση το ίδιο DC BUS. Ο μετατροπέας αυτής της τεχνολογίας τροφοδοτείται μέσω ενός μετασχηματιστή, όπου στο δευτερεύον τύλιγμα υπάρχει η σύνδεση αστέρα και τριγώνου ταυτόχρονα στους ακροδέκτες του, όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 26 και τα πλεονεκτήματα μειονεκτήματα στον Πίνακα 4.



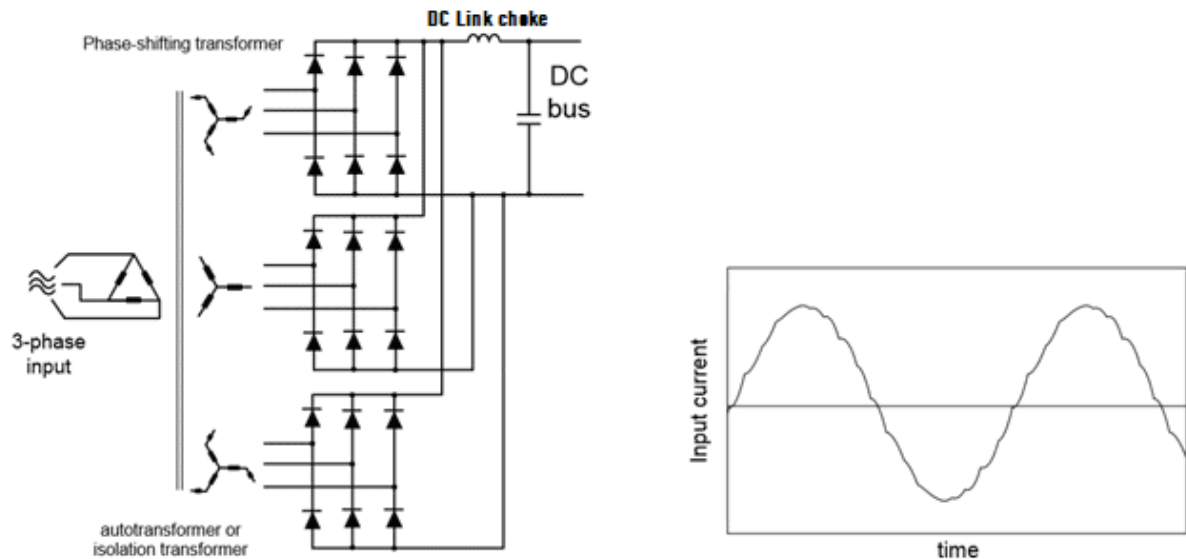
Εικόνα 26. Σύστημα AFD (VFD) με μετατροπέα 12 παλμών. [17]

Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός μετατροπέα 12 παλμών.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Λογικό κόστος αγοράς, αν και ακριβότερο από AC line reactors/DC link chokes	1. Συχνά, οι μετασχηματιστές χρειάζονται ξεχωριστή τοποθέτηση ή μεγαλύτερο περίβλημα στο VFD
2. Σημαντική μείωση αρμονικών τάσης και ρεύματος περίπου στο 85%	2. Δεν μειώνει τις αρμονικές σε σημείο, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς.
3. Παρέχει μεγάλη προστασία κατά της εισροής ρεύματος στους ημιαγωγούς από τη γραμμή του δικτύου	3. Δεν είναι δυνατή η εκ των υστέρων προσαρμογή για τους περισσότερους VFDs
	4. Η αντιστοίχιση σύνθετης αντίστασης μεταξύ άλλων πηγών είναι κρίσιμη στην απόδοση κατά την μεταβολή της τάσης

Ένας μετατροπέας 18 παλμών αποτελείται από 18 ημιαγωγικά στοιχεία. Στην ουσία πρόκειται για τρεις μετατροπείς 6 παλμών, συνδεδεμένους παράλληλα, ώστε να τροφοδοτούν με τάση το ίδιο DC BUS. Αυτός ο μετατροπέας τροφοδοτείται μέσω του δευτερεύοντος τυλίγματος ενός μετασχηματιστή, που, στην ουσία, είναι τρία κυκλώματα

[10]. Στην Εικόνα 27 βλέπουμε το διάγραμμα του μετατροπέα 18 παλμών ενώ τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καταγράφονται στον Πίνακα 5.



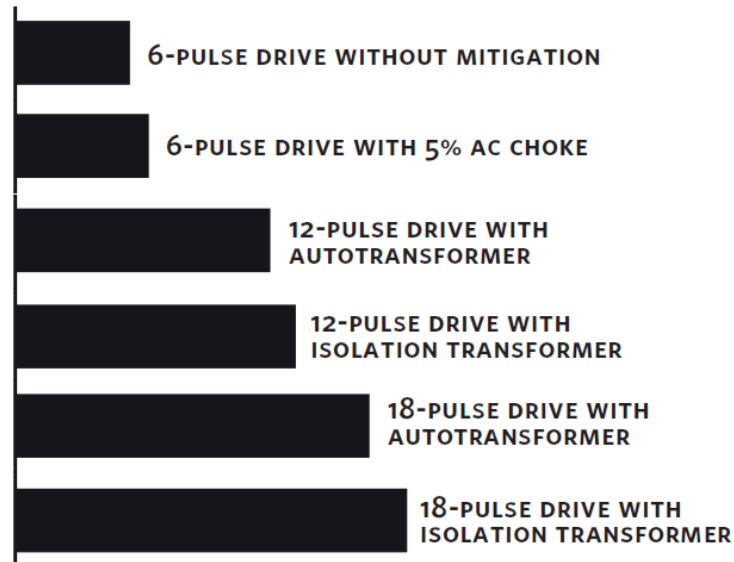
Εικόνα 27. Μετατροπέας 18 παλμών με την κυματομορφή του ρεύματος εισόδου. [17]

Πίνακας 5. Οφέλη και μειονεκτήματα ενός μετατροπέα 18 παλμών.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Εγγυάται ουσιαστικά τη συμμόρφωση διεθνή κανονισμών	1. Μπορεί να είναι πιο ακριβό από άλλες μεθόδους
2. Παρέχει αυξημένη προστασία εισόδου για το VFD και τους ημιαγωγούς του, από θέματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας της γραμμής	2. Μεγαλύτερα και βαρύτερα εξαρτήματα από άλλες μεθόδους
3. Μέχρι και τέσσερις φορές αρμονική μείωση σε σχέση με τους μετατροπείς 12 παλμών	
4. Μικρότερος μετασχηματιστής απομόνωσης από τον μετασχηματιστή απομόνωσης που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα 12 παλμών	

Αυτή η μέθοδος είναι ίδια με τον μετατροπέα 12 παλμών, αν και καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο στην εγκατάσταση. Με αυτήν την μέθοδο του μετατροπέα των 18 παλμών μπορούμε να πετύχουμε έως και 90% μείωση των αρμονικών και με τη συνολική

αρμονική παραμόρφωση να κυμαίνεται περίπου στο 2-3%. Στην Εικόνα 28 έχουμε διάφορους τύπους μετατροπέων, όπου υπάρχουν πολλές λύσεις στην προσπάθεια μείωσης της αρμονικής παραμόρφωσης.



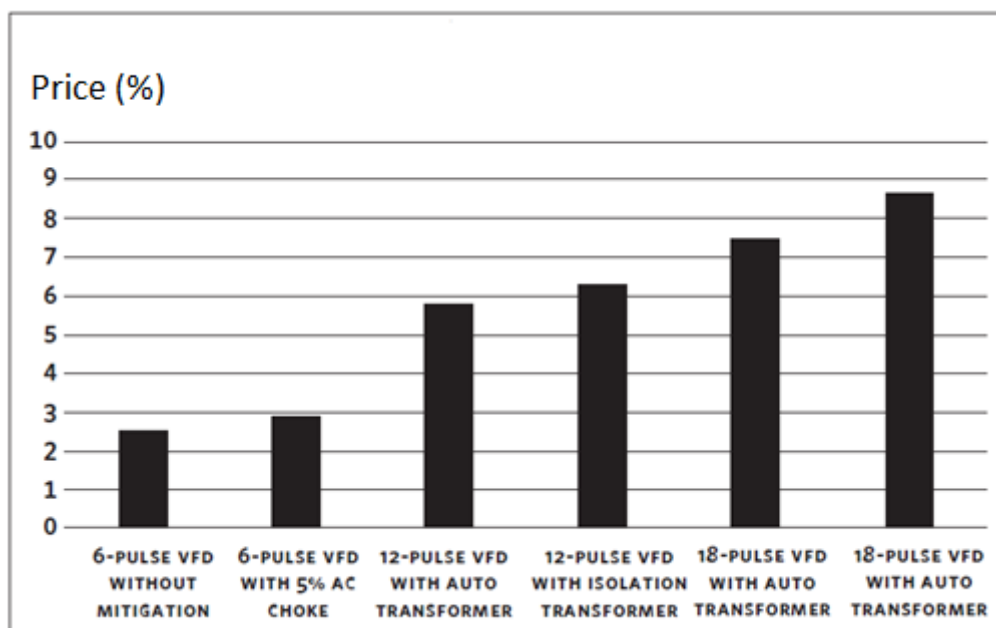
Εικόνα 28. Μείωση αρμονικών για κάθε μετατροπέα 6, 12, 18 παλμών αντίστοιχα. [16]

Όταν υπολογίζουμε για την καλύτερη λύση, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συνολική κοστολόγηση του συστήματος, όπου δεν θα συμπεριλαμβάνει μόνο το VFD και τα παρελκόμενα εξαρτήματα, αλλά και την εγκατάσταση, την συντήρηση, καθώς και το κόστος μεταφοράς.

Ένας μετατροπέας 12 παλμών θα αποτελείται από το ίδιο κύκλωμα ανόρθωσης, σαν να πρόκειται για 2 ίδιους μετατροπείς των 6 παλμών ο καθένας, με μετασχηματιστές. Το ίδιο ισχύει και με τους μετατροπείς των 18 παλμών, αυξάνοντας το μέγεθος και το κόστος στο τριπλάσιο, σε σύγκριση με έναν μετατροπέα 6 παλμών. Για να ικανοποιούνται τα διεθνή πρότυπα, είναι εφικτή η εφαρμογή των παρακάτω λύσεων:

- Μετατροπέας 6 παλμών με τοποθετημένο AC line reactor.
- Μετατροπέας 6 παλμών με τοποθετημένο AC line reactor και μαζί ένα εξωτερικό αρμονικό φίλτρο.
- Μετατροπέας 12, 18 ή παραπάνω παλμών.

Στην Εικόνα 29 βλέπουμε ότι η αγορά ενός μετατροπέα με περισσότερους παλμούς αυξάνει κατά πολύ το κόστος λόγω των παραπάνω ημιαγωγικών στοιχείων, σε σημείο που οι εταιρείες δεν τα προτιμούν ιδιαίτερα και προσπαθούν να βρουν άλλους τρόπους επίλυσης του προβλήματος των αρμονικών. Στον Πίνακα 6 βλέπουμε τις τεχνικές μείωσης σε σχέση με το ρεύμα THDi.



Εικόνα 29. Σχετική ανάλυση αγοράς μετατροπέων 6 παλμών, με ή χωρίς φίλτρο, σε σχέση με μετατροπείς 12 και 18 παλμών με M/Σ. [16]

Πίνακας 6. Πίνακας ποσοστού μείωσης του ρεύματος THD σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες τεχνικές μείωσης.

Τεχνικές μείωσης	Ρεύμα THDi%
Χωρίς μείωση	70-80%
3% Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς ή πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης	40-50%
5% Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς ή πηνίο συνεχούς ρεύματος παράλληλης σύνδεσης	25-40%
Μετατροπέας 12 παλμών	10-15%
Παθητικό αρμονικό φίλτρο	8-12%
Μετατροπέας 18 παλμών	4-6%
Ενεργό αρμονικό φίλτρο	3-5%

Ο Πίνακας 7 δίνει μια γενική εικόνα για τους τρόπους που μπορούμε να μειώσουμε τις αρμονικές και τα ποσοστά μείωσης, όσον αφορά στην ολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος.

Πίνακας 7. Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων μείωσης των ποσοστών ρεύματος THD.

Χαρακτηριστικά	Μετατροπέας 6 παλμών με Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς	Μετατροπέας 6 παλμών με τοποθετημένο Εναλλασσόμενο πηνίο σειράς και εξωτερικό παθητικό η ενεργό φίλτρο	Μετατροπέας 12 παλμών
Πληροί τους διεθνείς κανονισμούς για το THD%.	55%	85%	70%
Υποβάθμιση λόγω μη ισορροπημένης τάσης και όχι καλά κατασκευασμένα εξαρτήματα	Πολύ χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο
Πληροί τα όρια IEC THDi	Ναι	Ναι	Ναι
Πληροί τα όρια IEEE 519 THDi	Όχι	Ναι	Όχι
THDi% σε πλήρες φορτίο	≈ 28%	≈ 5%	≈ 15%
TDD	≈ 15%	≈ 2.5%	≈ 8%
Πολυπλοκότητα	χαμηλή	χαμηλή	Υψηλή
Κόστος	χαμηλό	Λίγο υψηλότερο από τον μετατροπέα 6 παλμών χωρίς πρόσθετα φίλτρα	Υψηλό
Μέγεθος	Όλα σε ένα, όπως ο μετατροπέας 6 παλμών	Μέτριο	Μεγάλο
Αποδοτικότητα	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Αξιοπιστία	Υψηλή και πολύ στιβαρή κατασκευή	Υψηλή και πολύ στιβαρή κατασκευή	Μέτρια ίσως και υψηλή εξαρτώνται από τα εσωτερικά εξαρτήματα

Κεφάλαιο 4^ο Προσομοίωση δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

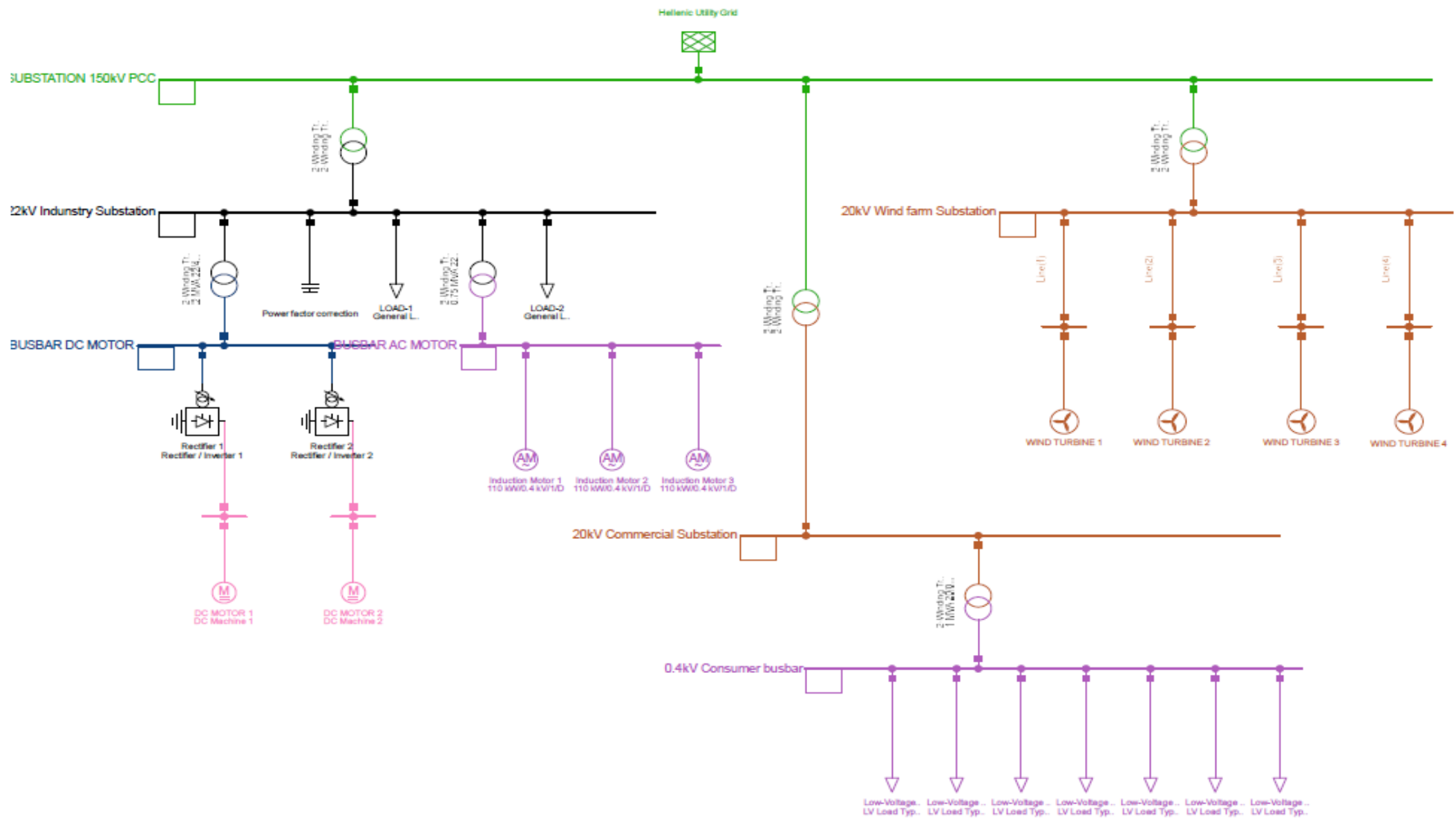
4.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα DigSILENT PowerFactory, η αδειοδότηση του οποίου αφορούσε σε σχετική άδεια 6 μηνών για ακαδημαϊκό σκοπό. Οι αλλαγές που ενσωματώνονται στο εξωτερικό δίκτυο αποτελούν αποτέλεσμα μοντελοποίησης της συμπεριφοράς της σύνθετης αντίστασης του εξωτερικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ζυγό PCC. Αυτή η λεπτομέρεια είναι σημαντική κατά την αξιολόγηση της αρμονικής παραμόρφωσης στον ζυγό PCC, ειδικά εάν υπάρχουν όρια που παραβιάζονται, γεγονός που οδηγεί στην εφαρμογή λύσεων μετριασμού των φαινομένων αυτών. Ακολουθεί η ανάλυση ροής αρμονικού φορτίου (harmonic load flow), η σάρωση συχνότητας (frequency sweep) και η αξιολόγηση αρμονικού μετριασμού (filter design). Προκειμένου να γίνει κατανοητό γιατί ορισμένες αρμονικές ενισχύονται περισσότερο από άλλες, απαιτείται επισκόπηση της σύνθετης αντίστασης του συστήματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο και με συγκεκριμένη συχνότητα. Έχοντας πραγματοποιήσει την επισκόπηση αυτή, και γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της σύνθετης αντίστασης, είναι εφικτός ο σχεδιασμός οποιουδήποτε κόμβου στο δίκτυο, ο οποίος πραγματοποιείται σε σχέση με τη συχνότητα του ρεύματος που το διαρρέει. Αν και η πλέον οικονομική λύση είναι το απευθείας φιλτράρισμα στην πηγή, επειδή κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό, αναζητείται συνδυασμένη λύση φιλτραρίσματος.

Στην προσομοίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα εισαχθούν παθητικά φίλτρα για την ελαχιστοποίηση της σύνθετης αντίστασης του συστήματος, οπότε και του αρμονικού περιεχομένου στις παρατηρούμενες προβληματικές περιοχές συχνοτήτων στο βιομηχανικό δίκτυο, προκειμένου να επιτευχθεί η συμμόρφωσή του με τα όρια στο σημείο κοινής σύζευξης. Τα φίλτρα θα σχεδιαστούν έτσι, ώστε η βασική ροή φορτίου να αλλάζει όσο το δυνατόν λιγότερο, ενώ μειώνεται η παραμόρφωση της αρμονικής τάσης στο PCC με ελάχιστες απώλειες.

4.2 Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στη δημιουργία του μονογραμμικού σχεδίου προσομοίωσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας απεικονίστηκε το εξωτερικό Ελληνικό δίκτυο υψηλής τάσης, το οποίο συνδέεται με τον υποσταθμό των 150kV στο σημείο κοινής σύζευξης PCC. Επιπρόσθετα, από το PCC σχεδιάστηκαν 3 αναχωρήσεις για τους παρακάτω υποσταθμούς: α) Υποσταθμός βιομηχανίας (Industry Substation), β) Υποσταθμός αιολικού πάρκου (Wind Park Substation) και γ) εμπορικός υποσταθμός (Commercial Substation), ο οποίος τροφοδοτεί καταναλωτές, δηλαδή οικίες, καταστήματα κ.λπ. Ακόμη, με δεδομένη την σημαντικότητα της αξιολόγησης της αρμονικής παραμόρφωσης στο PCC (και όχι μεμονωμένα σε κάθε υποσταθμό), ενσωματώθηκαν οι απαραίτητες αλλαγές για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης, οι οποίες αναφέρονται στη συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης του εξωτερικού δικτύου, το οποίο είναι συνδεδεμένο στο PCC, καθώς βλέπουμε και στην Εικόνα 30 το μονογραμμικό σχέδιο της προσομοίωσης.



Εικόνα 30. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

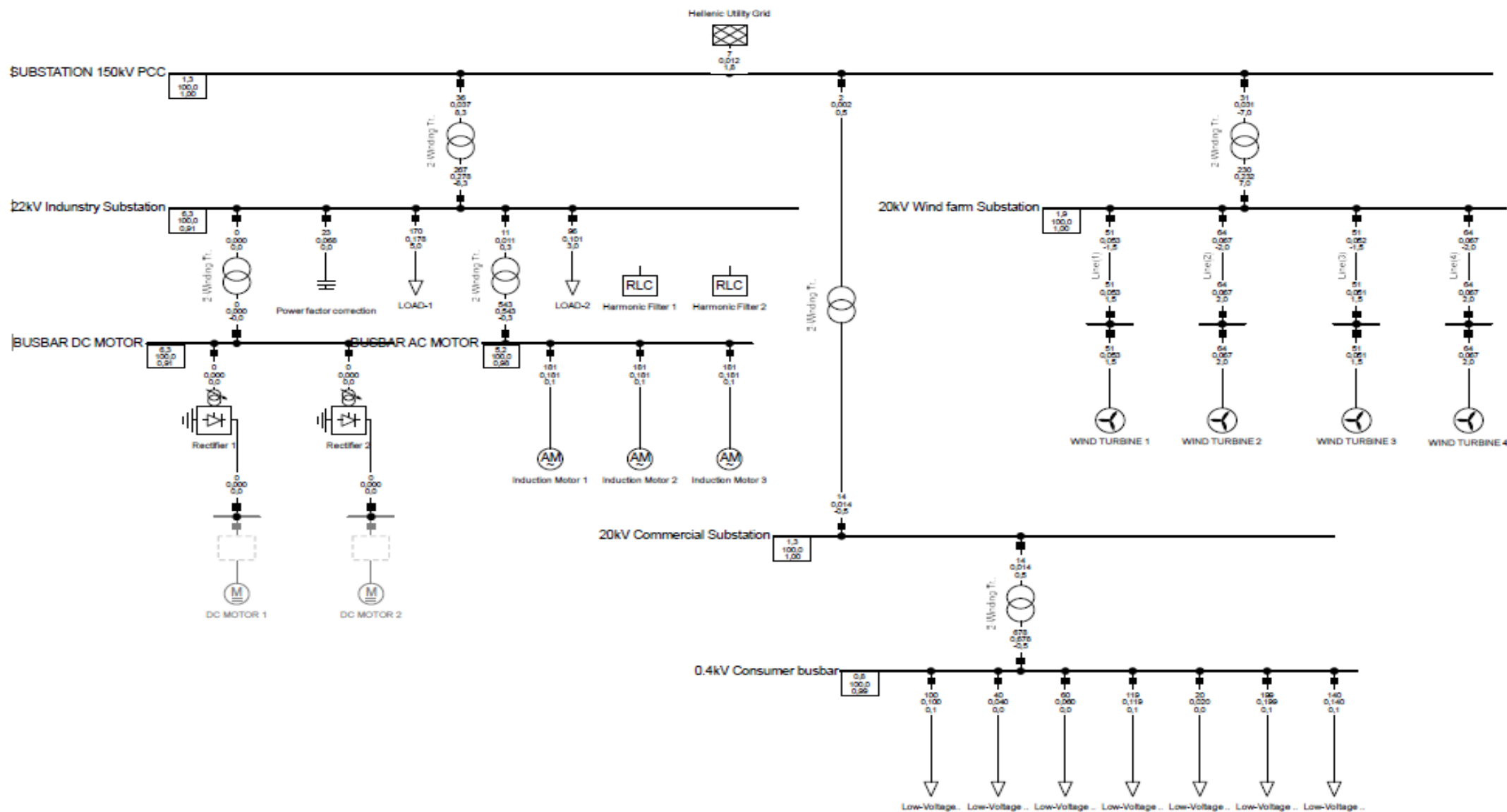
4.3 Ολική αρμονική παραμόρφωση του δικτύου χωρίς φίλτρο

Φαίνεται ότι η μεγαλύτερη αρμονική παραμόρφωση, όταν δεν χρησιμοποιείται παθητικό φίλτρο, εντοπίζεται στους ζυγούς της Βιομηχανίας, του κινητήρα συνεχούς ρεύματος, καθώς και του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος όπως μας δείχνει και ο Πίνακας 8. Επιπρόσθετα βλέπουμε και στην Εικόνα 31 το αντίστοιχο μονογραμμικό χωρίς φίλτρα.

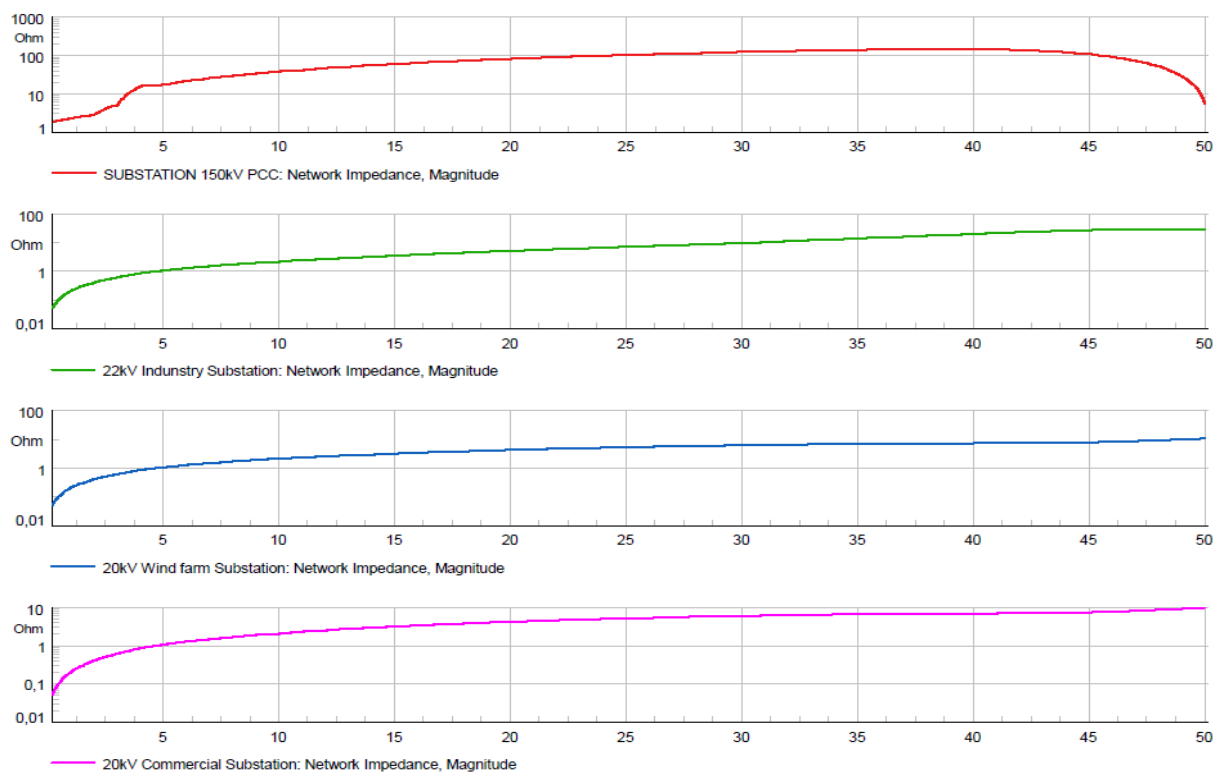
Πίνακας 8. Ολική αρμονική παραμόρφωση του δικτύου χωρίς φίλτρο

WITHOUT FILTER - THD ON BUSBARS	
BUSBAR	Percentage (%)
PCC	1.3%
INDUSTRY	6.3%
DC MOTOR	6.3%
AC MOTOR	5.2%
WIND FARM	1.9%
COMMERCIAL	1.3%
CONSUMER	0.8%

Η μεγαλύτερη έγχυση αρμονικών ρευμάτων προέρχεται από τον ανορθωτή, και ειδικότερα από το εύρος συχνοτήτων μεταξύ 100HZ και 2500HZ. Η επιλογή φίλτρων με μικρό εύρος ζώνης για την απορρόφηση των ισχυρότερων αρμονικών είναι μια κοινή και αποτελεσματική τεχνική – λύση για την αποφυγή επηρεασμού της σύνθετης αντίστασης του συστήματος σε άλλες περιοχές συχνοτήτων. Τοποθετούνται παθητικά φίλτρα στον ζυγό της βιομηχανίας, προκειμένου να εξαλειφθούν οι αρμονικές που κατά κύριο λόγο παράγονται από τους ανορθωτές. Ειδικότερα, τοποθετούνται παθητικά φίλτρα για τις ακόλουθες αρμονικές: 29^η, 31^η, 41^η, 43^η, 47^η και 49^η. Από τα Διαγράμματα 1 έως 9 βλέπουμε την συμπεριφορά του δικτύου στην περίπτωση χωρίς φίλτρα.



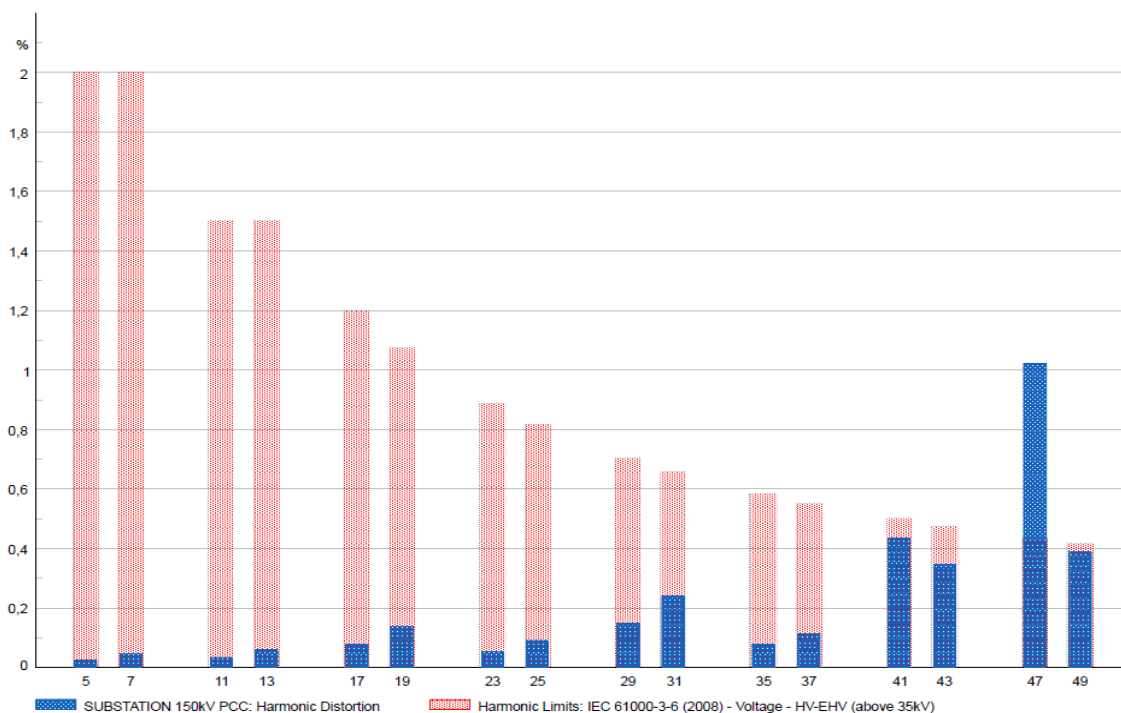
Εικόνα 31. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς φίλτρα.



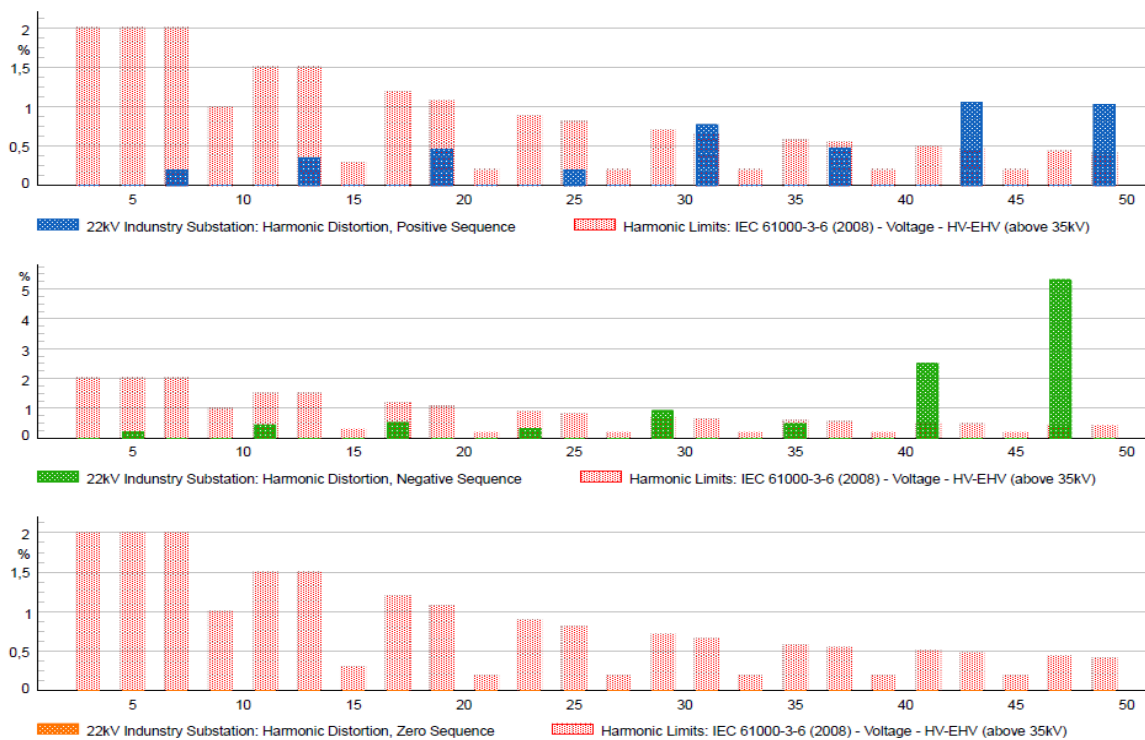
Διάγραμμα 1. Σύνθετη αντίσταση σε όλους τους ζυγούς (συζεύξεις χωρίς φίλτρο).



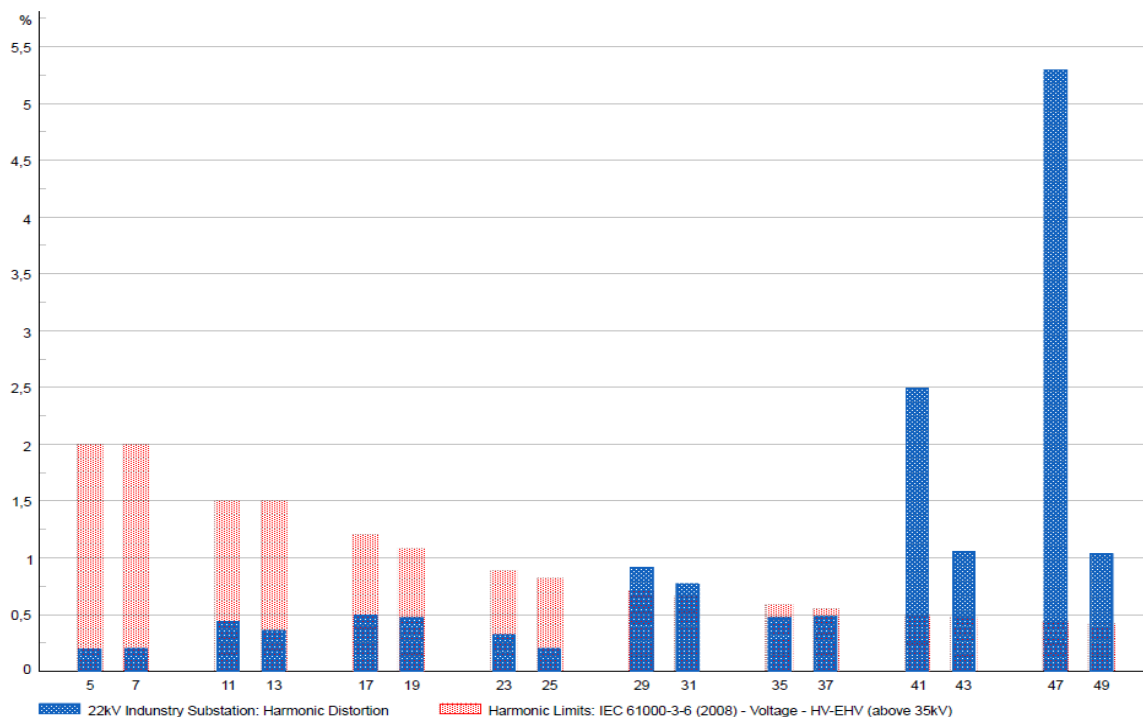
Διάγραμμα 2. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 3. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης χωρίς φίλτρο.



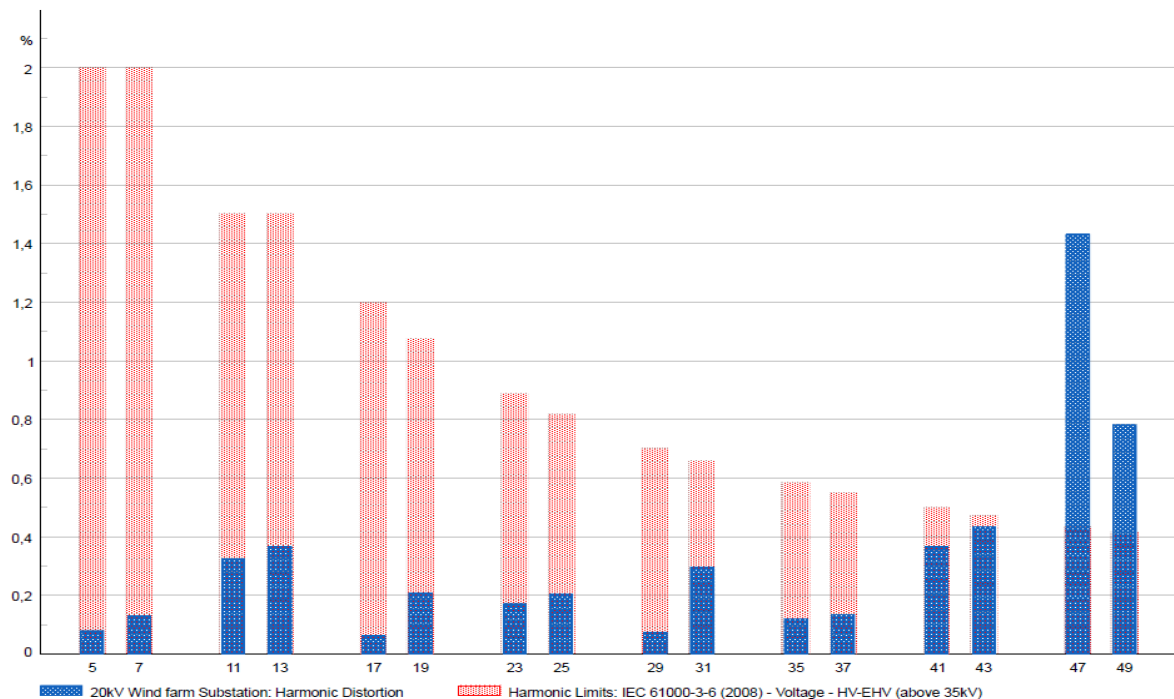
Διάγραμμα 4. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας χωρίς φίλτρο.



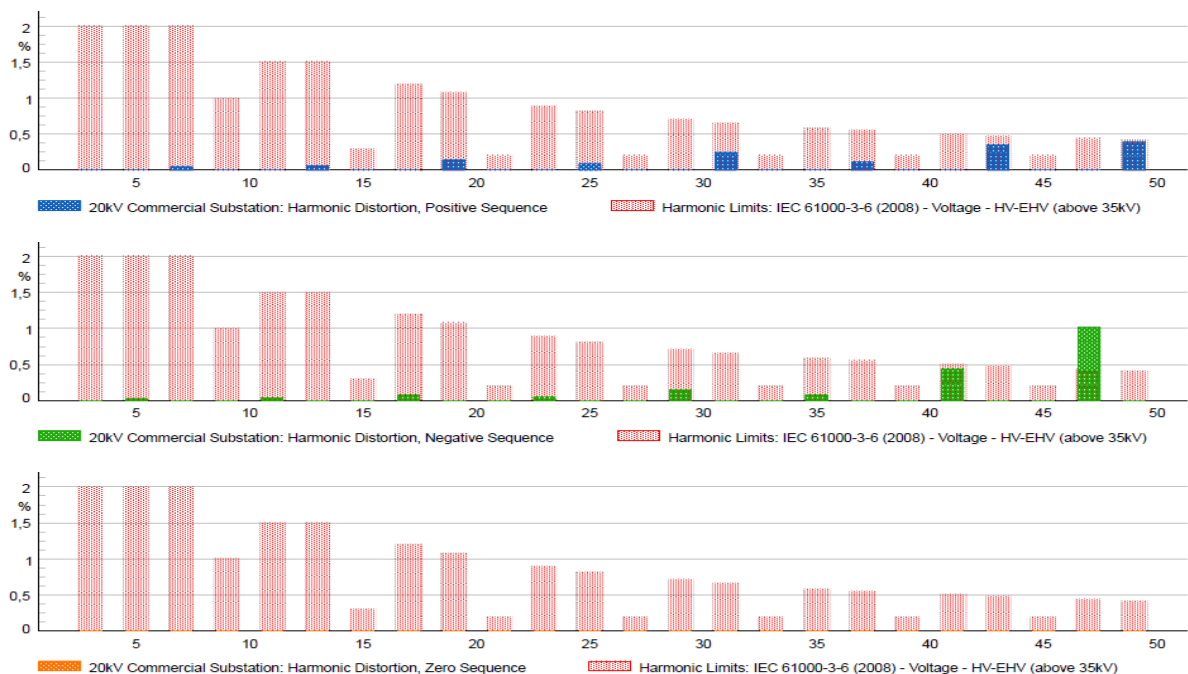
Διάγραμμα 5. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας χωρίς φίλτρο.



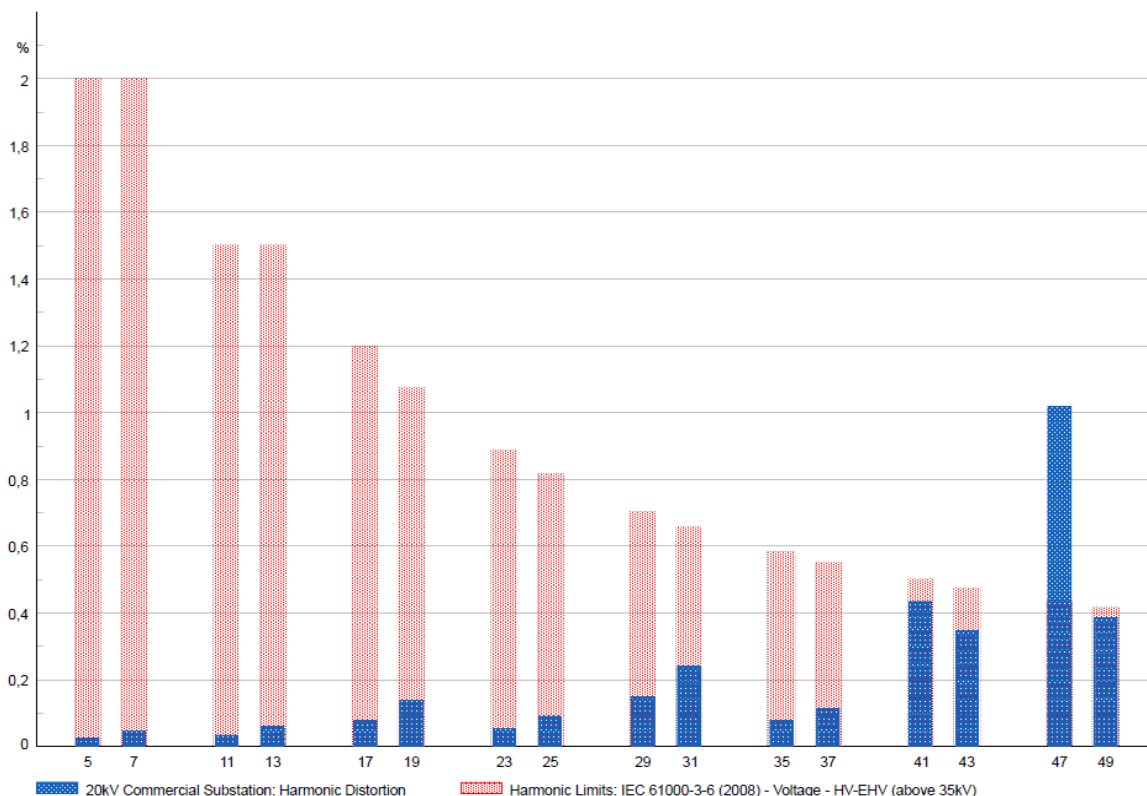
Διάγραμμα 6. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 7. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου χωρίς φίλτρο.



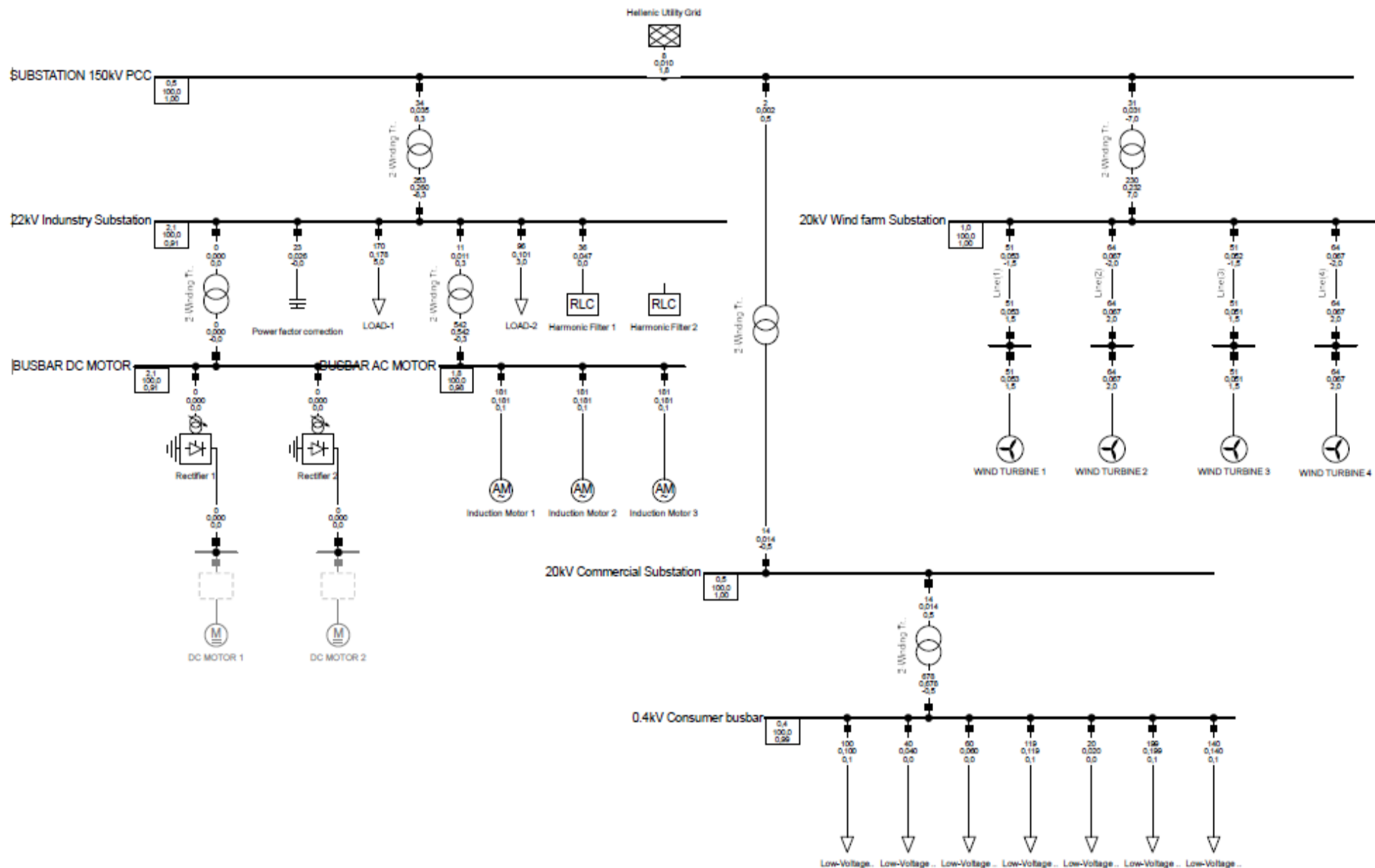
Διάγραμμα 8. Μη ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 9. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού χωρίς φίλτρο.

4.4 Ολική αρμονική παραμόρφωση με ένα παθητικό φίλτρο

Στη προσομοίωση με το ένα φίλτρο αρμονικών παρατηρείται η εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης σε όλους τους ζυγούς, όπως βλέπουμε στον Πίνακα 9. Επίσης, στους ζυγούς PCC, WIND PARK και COMMERCIAL ορισμένες αρμονικές μειώθηκαν κάτω από τα όρια. Σημειώνεται, επίσης, ότι στον ζυγό της βιομηχανίας οι αρμονικές 41^η 47^η όπου εγκαταστάθηκε το φίλτρο έχουν μειωθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, πολύ πιο κάτω από τα όρια των προτύπων IEC 61000-3-6. Επιπρόσθετα βλέπουμε και στην Εικόνα 32 το αντίστοιχο μονογραμμικό με ένα παθητικό φίλτρο.



Εικόνα 32. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με ένα παθητικό φίλτρο.

Πίνακας 9. Ολική αρμονική παραμόρφωση με ένα παθητικό φίλτρο.

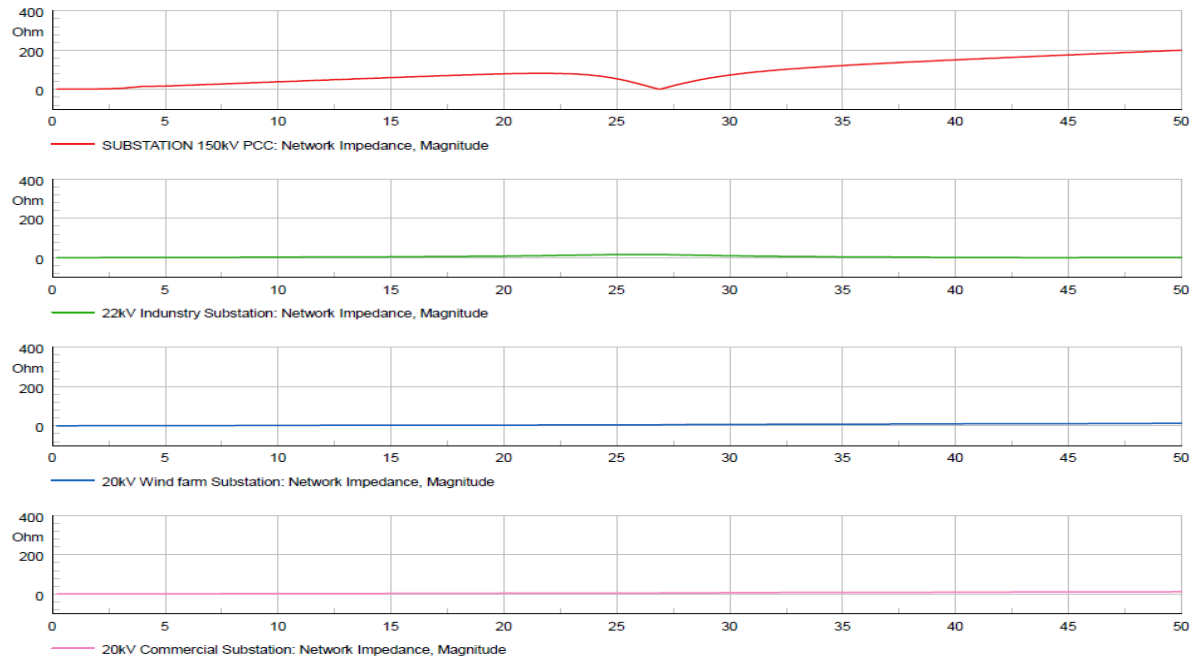
ONE PASSIVE FILTER - THD ON BUSBARS	
BUSBAR	Percentage (%)
PCC	0.5%
INDUSTRY	2.1%
DC MOTOR	2.1%
AC MOTOR	1.8%
WIND FARM	1.0%
COMMERCIAL	0.5%
CONSUMER	0.4%

Σε αυτήν την φάση η μελέτη των αρμονικών δεν είναι κάτι το δεδομένο, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η τυποποίηση της διαστασιολόγησης των φίλτρων. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι η κάθε περίπτωση θα πρέπει να μελετάτε και να εξετάζεται αυτόνομα, λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα και τα εκάστοτε όρια, προκειμένου να επιτυγχάνεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Στον Πίνακα 10 βλέπουμε τα χαρακτηριστικά του παθητικού φίλτρου για το συγκεκριμένο σύστημα.

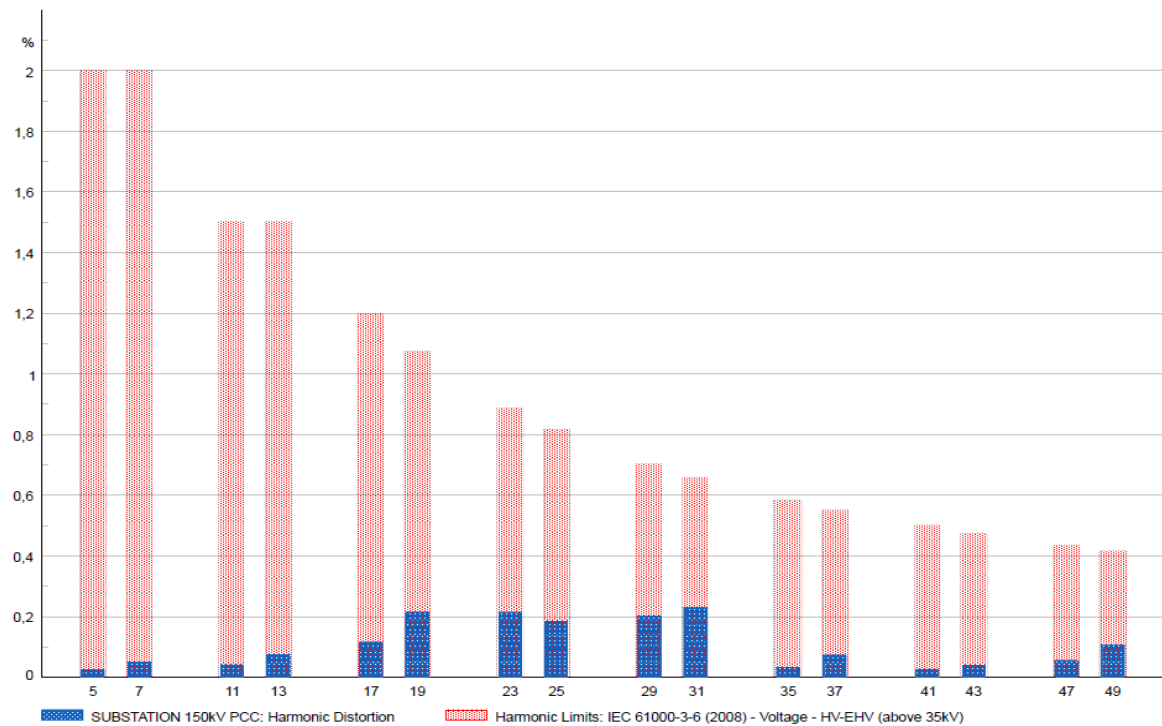
Πίνακας 10. Σχεδιασμός παθητικού φίλτρου.

DESING OF THE PASSIVE FILTER - VOLTAGE: 22KV	
FILTER TYPE	DOUBLE TUNED TYPE 1
RATED REACTIVE POWER	1.5 Mvar
RESONANT FREQUENCY 1	2050 HZ
RESONANT FREQUENCY 2	2350 HZ
CAPACITANCE C1	9.8 uF
CAPACITANCE C2	535,2 uF
INDUCTANCE L1	0.52 mH
INDUCTANCE L2	0.0099 mH
FILTER HARMONICS ORDER	41th,47th

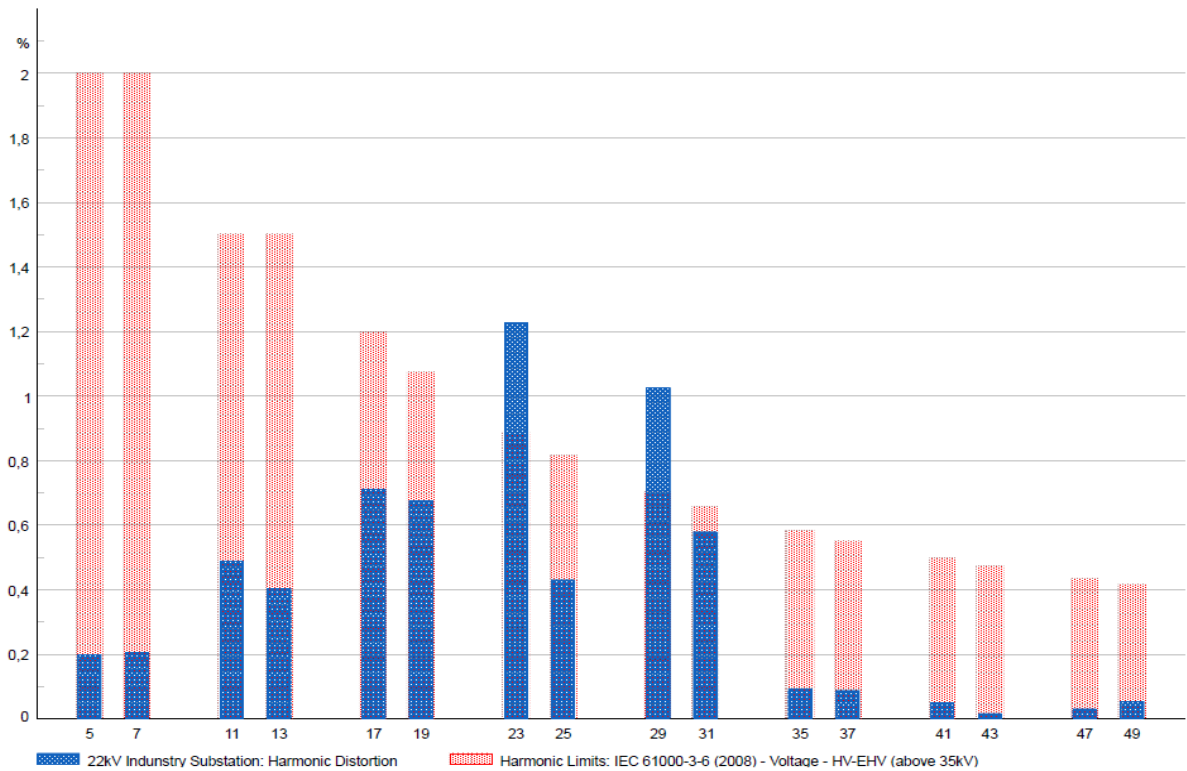
Παρατηρούμε ότι με τη χρήση ενός παθητικού φίλτρου οι αντιστάσεις σε όλους τους ζυγούς μηδενίζονται, ενώ και στο σημείο κοινής σύζευξης παρατηρείται, επίσης, σημαντική μείωση όπως βλέπουμε στα Διαγράμματα 10 έως 14.



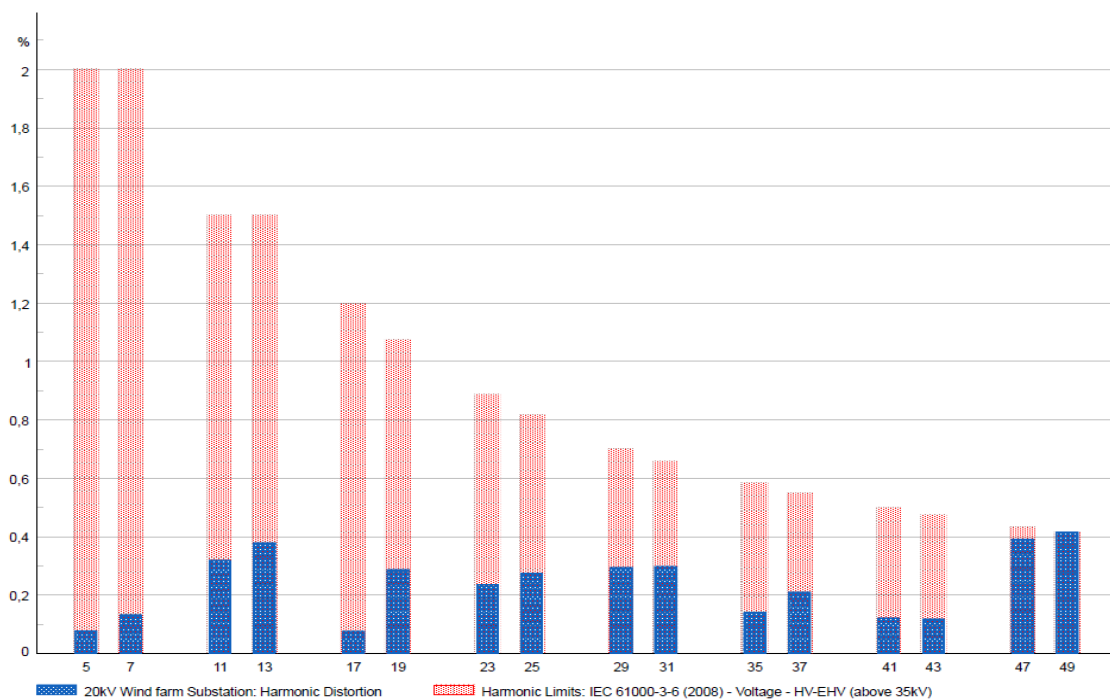
Διάγραμμα 10. Αντίσταση σε όλους τους ζυγούς συζεύξεις με ένα παθητικό φίλτρο.



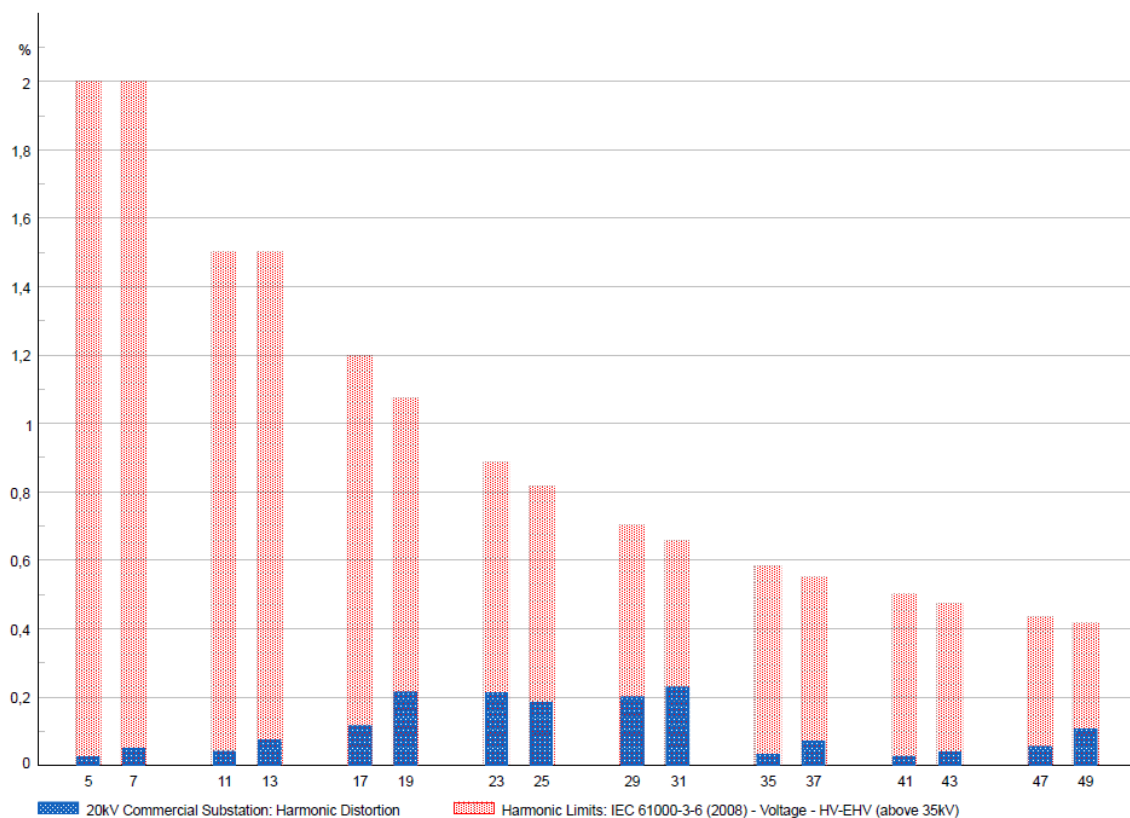
Διάγραμμα 11. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης με ένα παθητικό φίλτρο.



Διάγραμμα 12. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας με ένα παθητικό φίλτρο.



Διάγραμμα 13. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου με ένα παθητικό φίλτρο.



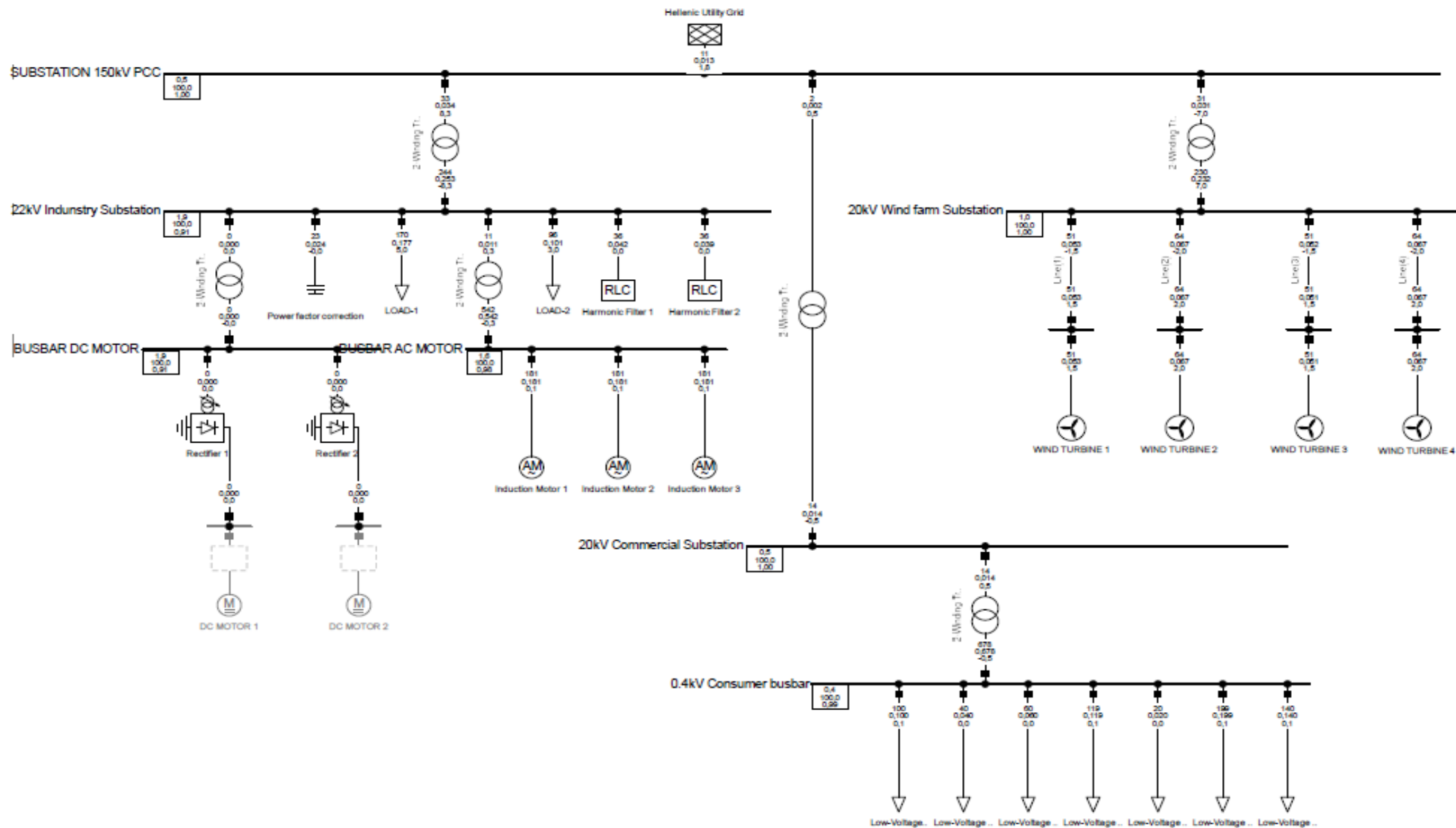
Διάγραμμα 14. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού με ένα παθητικό φίλτρο.

4.5 Ολική αρμονική παραμόρφωση με δύο παθητικά φίλτρα

Στην προσομοίωση με τα δύο φίλτρα αρμονικών καταγράφεται η εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης σε ένα μικρό ποσοστό του αντίστοιχου με το ένα φίλτρο, σε όλους τους ζυγούς. Επίσης, στους ζυγούς PCC, WIND PARK και COMMERCIAL παρατηρείται ότι οι αρμονικές μειώθηκαν πολύ πιο κάτω από τα όρια σε όλες τις αρμονικές τάξης. Επιπρόσθετα, στο ζυγό της βιομηχανίας όλες οι αρμονικές τάξης μειώθηκαν κάτω από τα επιτρεπτά όρια όπως παρατηρούμε στον Πίνακα 11. Αυτό καταγράφεται και στην ολική αρμονική παραμόρφωσης THD%. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι σε όλους τους ζυγούς, εκτός του PCC και COMMERCIAL, καταγράφεται πτώση στην συνολική αρμονική παραμόρφωση. Επιπρόσθετα βλέπουμε και στην Εικόνα 33 το αντίστοιχο μονογραμμικό με δύο παθητικά φίλτρα και στον Πίνακα 12 τον σχεδιασμό των φίλτρων, όπως επίσης και τα αντίστοιχα Διαγράμματα από 15 έως 19.

Πίνακας 11. Ολική αρμονική παραμόρφωση με δύο παθητικά φίλτρα.

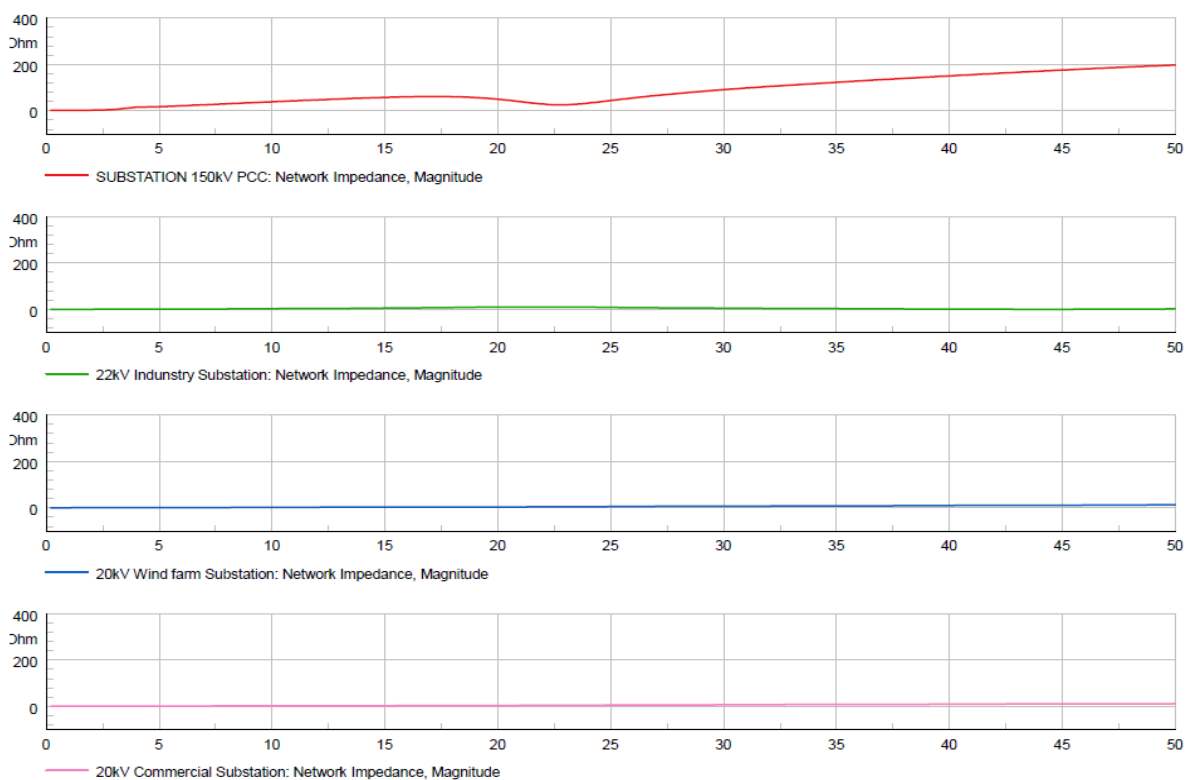
TWO PASSIVE FILTERS - THD ON BUSBARS	
BUSBAR	Percentage (%)
PCC	0.5%
INDUSTRY	1.9%
DC MOTOR	1.9%
AC MOTOR	1.6%
WIND FARM	1.0%
COMMERCIAL	0.5%
CONSUMER	0.4%



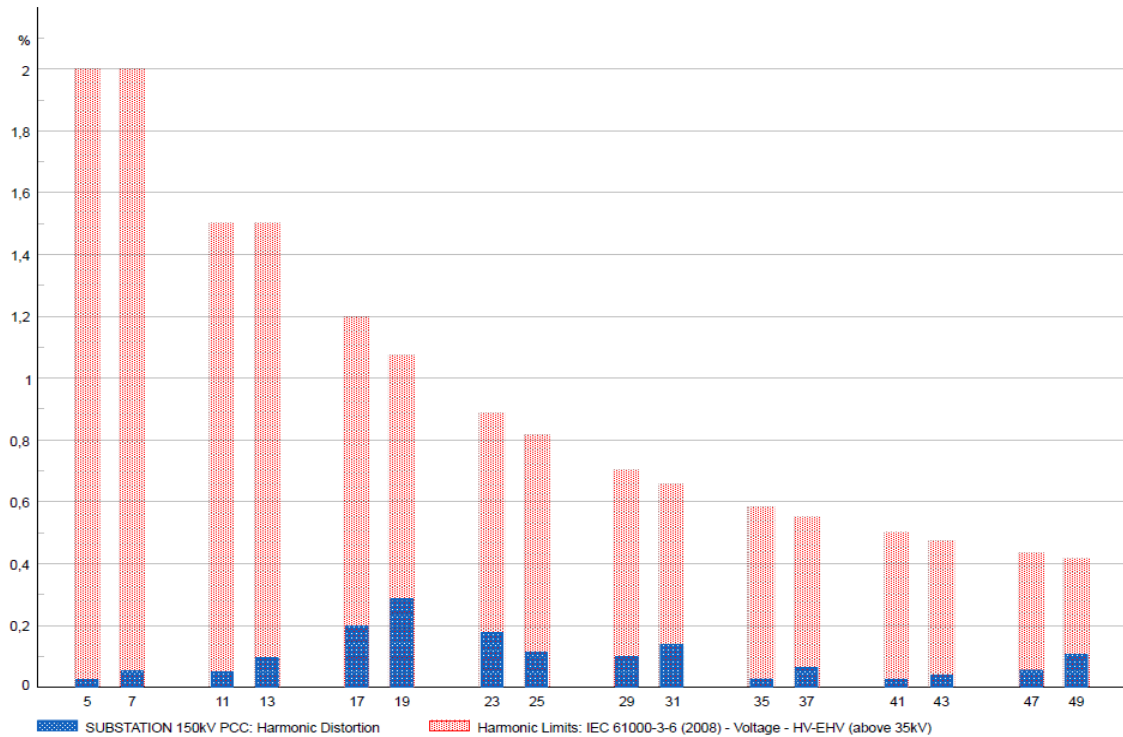
Εικόνα 33. Μονογραμμικό σχέδιο προσομοίωσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με δύο παθητικά φίλτρα.

Πίνακας 12. Σχεδιασμός του δεύτερου παθητικού φίλτρου.

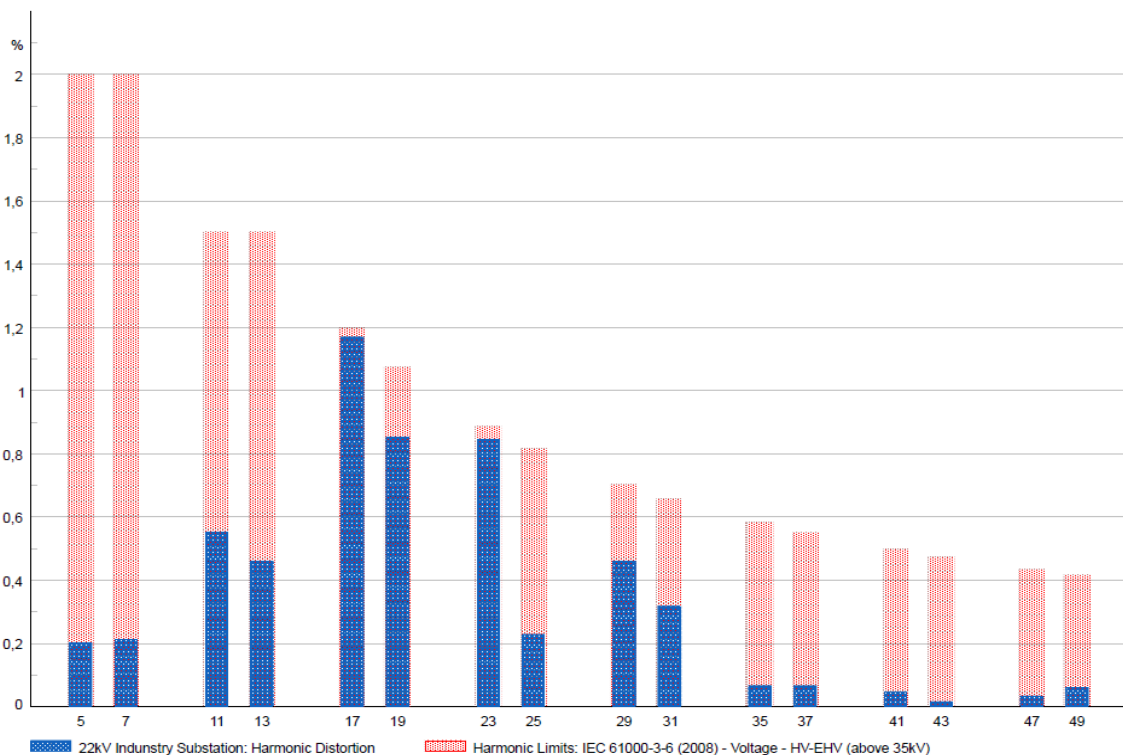
DESING OF THE PASSIVE FILTER - VOLTAGE: 22KV	
FILTER TYPE	DOUBLE TUNED TYPE 2
RATED REACTIVE POWER	1.5 Mvar
RESONANT FREQUENCY 1	1150 HZ
RESONANT FREQUENCY 2	1450 HZ
CAPACITANCE C1	9.8 μ F
CAPACITANCE C2	190 μ F
INDUCTANCE L1	1.5 mH
INDUCTANCE L2	0.08 mH
FILTER HARMONICS ORDER	23th,29th



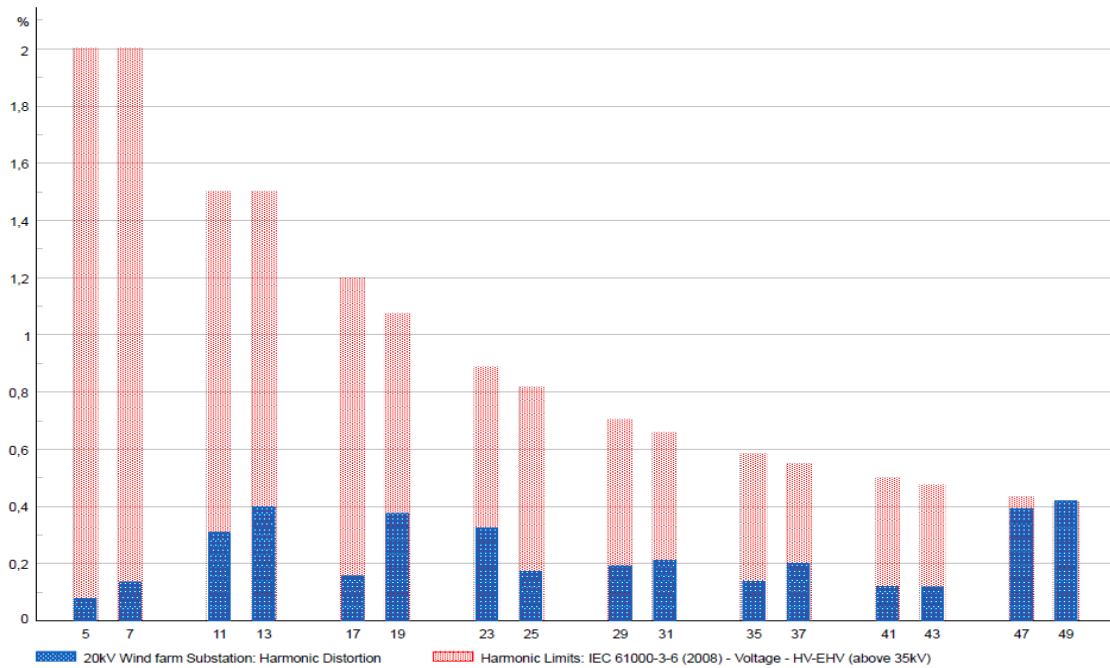
Διάγραμμα 15. Αντίσταση σε όλους τους ζυγούς συζεύξεις με δύο παθητικά φίλτρα.



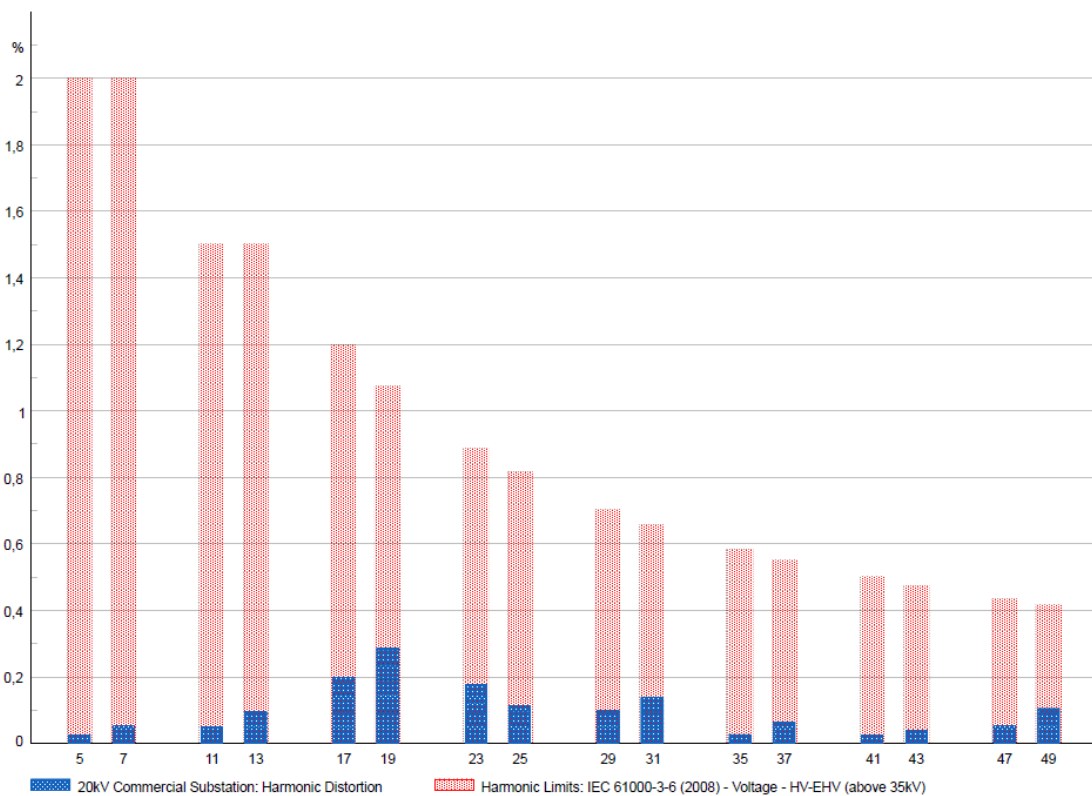
Διάγραμμα 16. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σημείο κοινής σύζευξης με δύο παθητικά φίλτρα.



Διάγραμμα 17. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού της βιομηχανίας με δύο παθητικά φίλτρα.



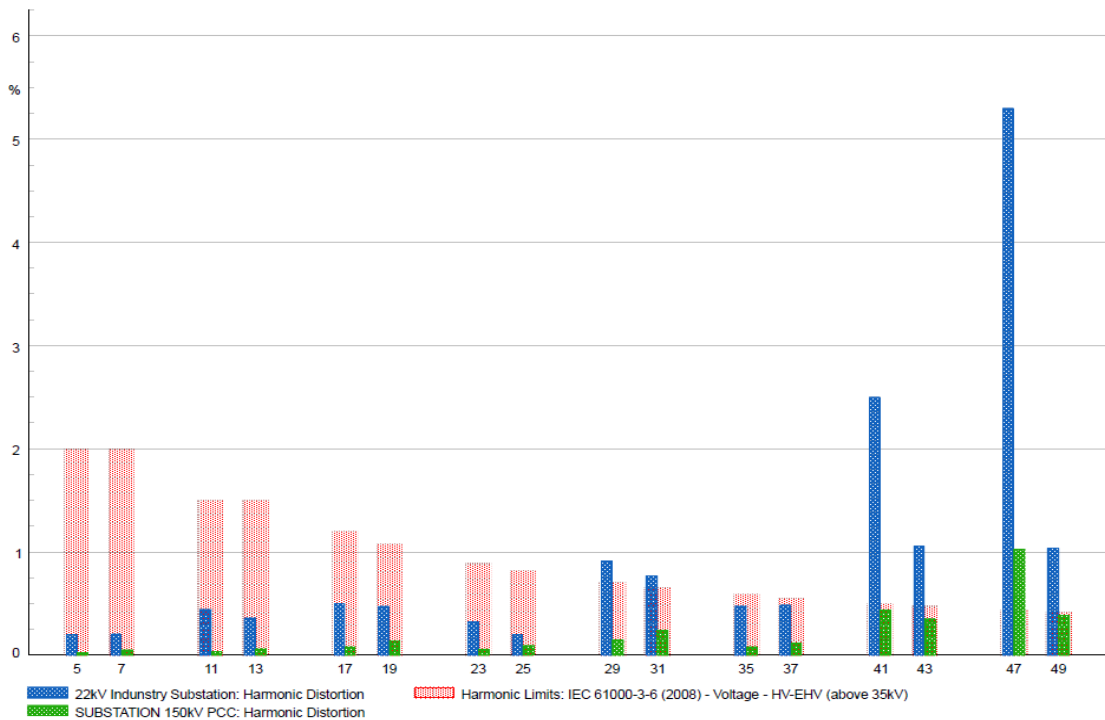
Διάγραμμα 18. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό υποσταθμού του αιολικού πάρκου με δύο παθητικά φίλτρα.



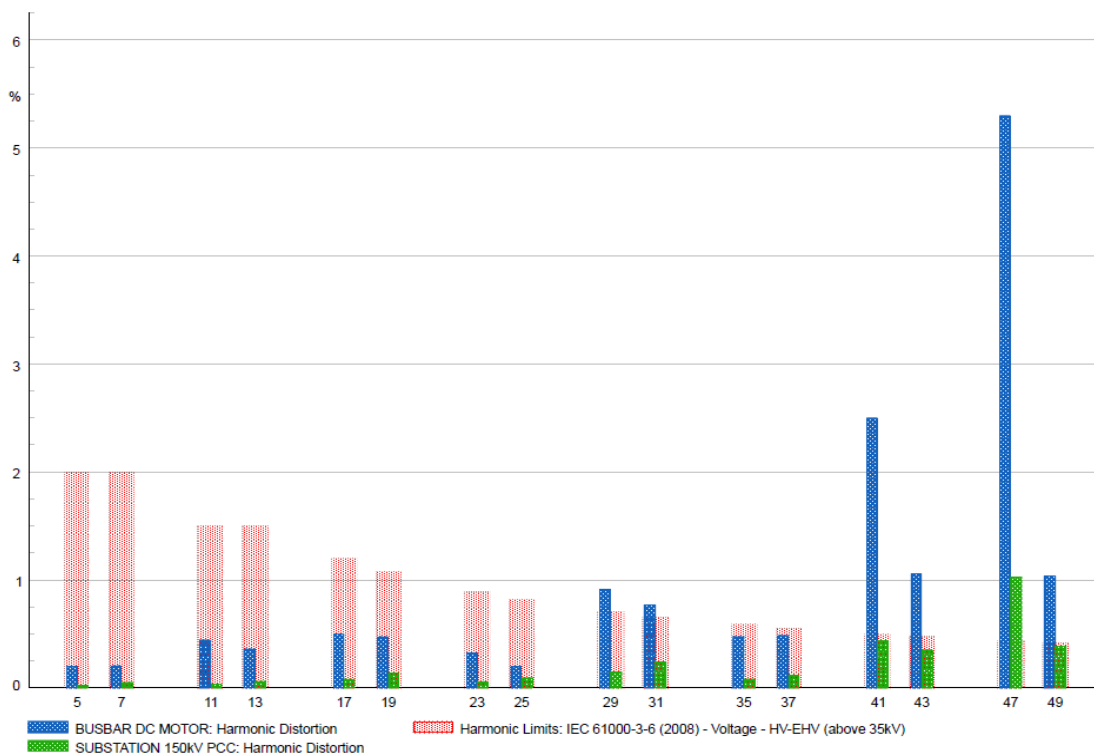
Διάγραμμα 19. Ισορροπημένη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό του εμπορικού υποσταθμού με δύο παθητικά φίλτρα.

4.6 Σύγκριση όλων των ζυγών με τον ζυγό PCC χωρίς χρήση φίλτρων

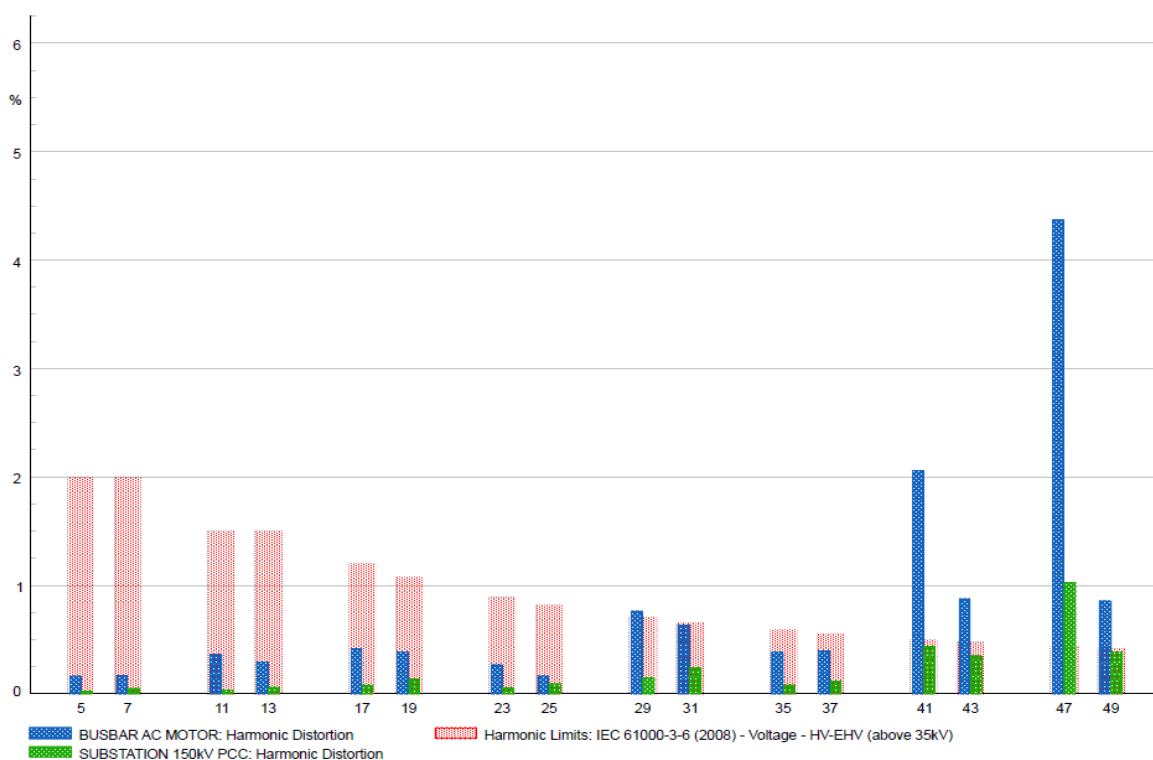
Στα Διαγράμματα 20 έως 24 απεικονίζεται η συμπεριφορά του δικτύου, καθώς και ο βαθμός επιρροής του από τους ζυγούς που παράγουν αρμονικές. Οι διαφορές μεταξύ των ζυγών είναι εμφανείς, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για το ποιοι ζυγοί «μολύνουν» περισσότερο το δίκτυο, δηλαδή τον ζυγό της βιομηχανίας, που είναι και ο ζυγός, ο οποίος έχει τους αντιστροφείς (inverters).



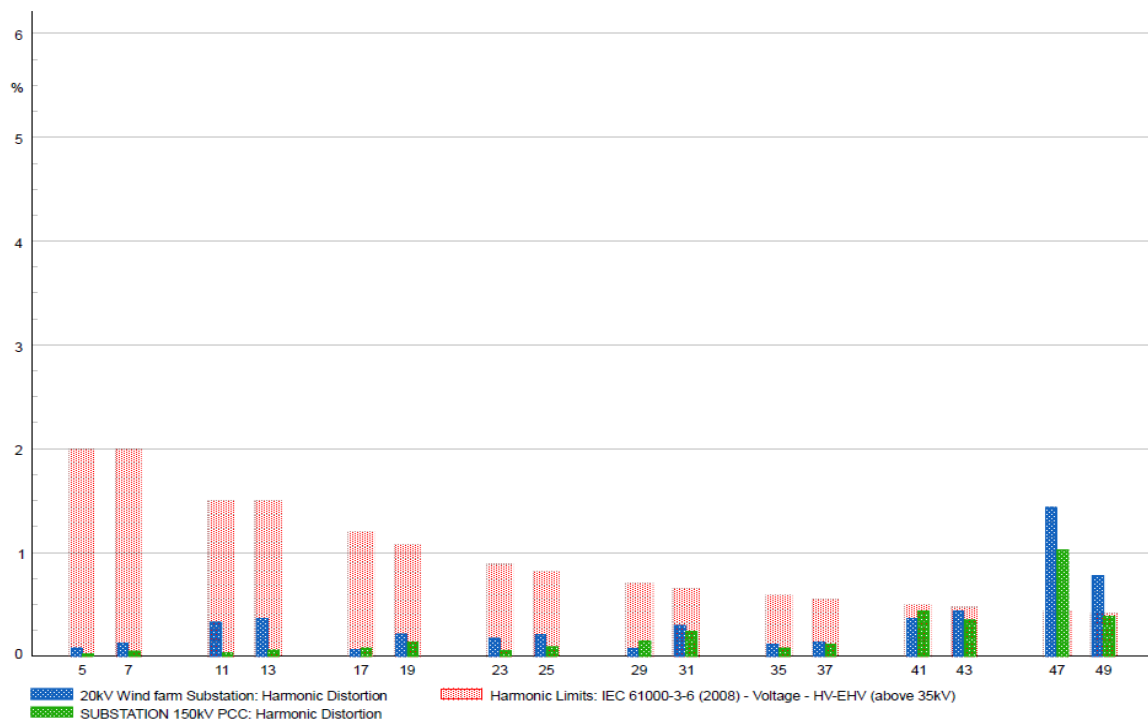
Διάγραμμα 20. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό υποσταθμού βιομηχανίας – Χωρίς φίλτρο.



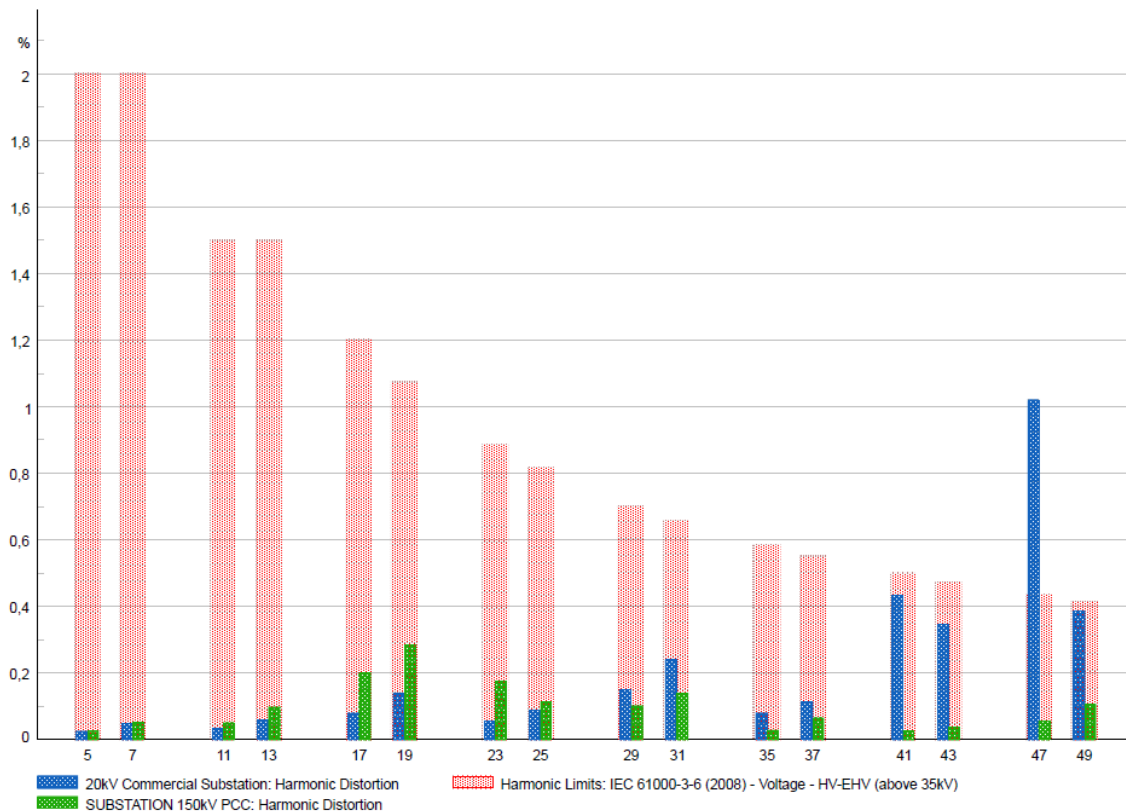
Διάγραμμα 21. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό κινητήρα συνεχούς ρεύματος – Χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 22. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος – Χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 23. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό υποσταθμού αιολικού πάρκου – Χωρίς φίλτρο.



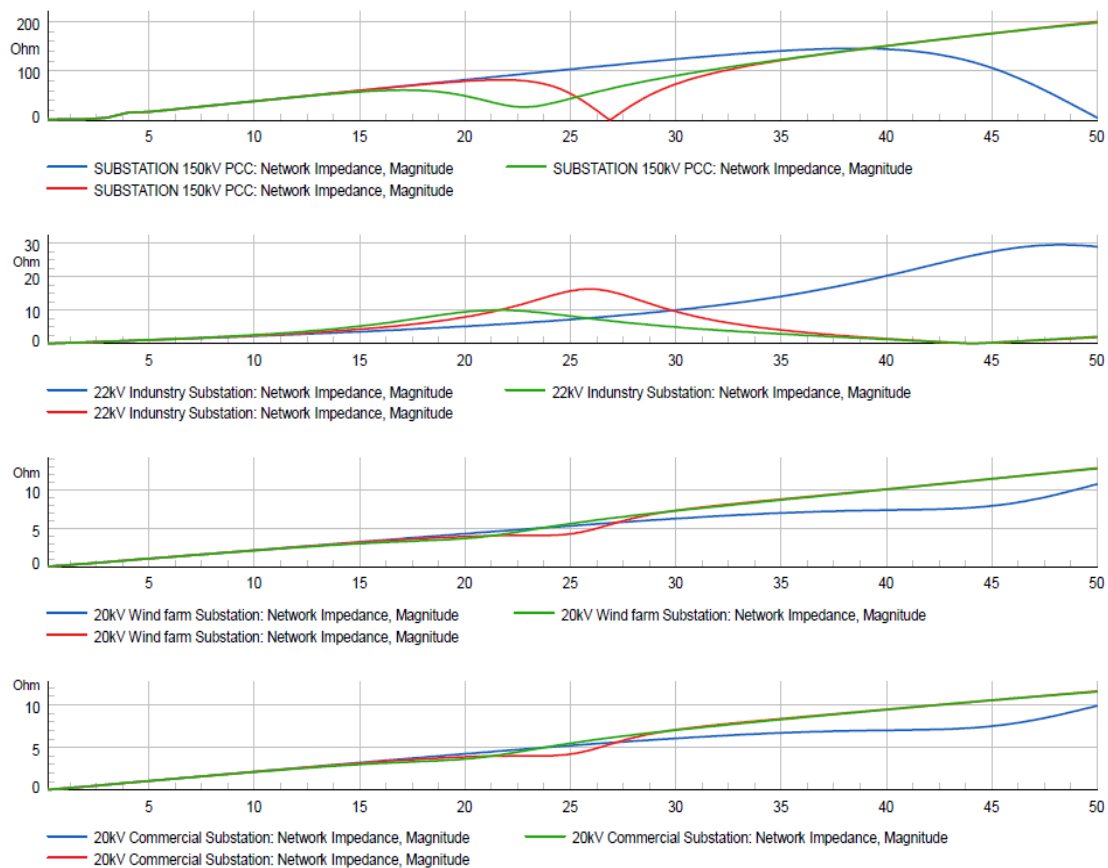
Διάγραμμα 24. Σύγκριση ζυγού PCC με τον ζυγό εμπορικού υποσταθμού – Χωρίς φίλτρο.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, παρατηρείται στον πρώτο ζυγό, δηλαδή στο PCC, μία ανάλογη αύξηση σύνθετης αντίστασης όσο μεγαλώνει η τάξη των αρμονικών. Επίσης, τόσο με το ένα φίλτρο όσο και με τα δύο φίλτρα μαζί, από την 20^η μέχρι την 30^η αρμονική καταγράφεται μια απότομη βύθιση της σύνθετης αντίστασης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται κατά την ενεργοποίηση των φίλτρων, σύμφωνα με το οποίο τα φίλτρα, για μια χρονική στιγμή, απορροφούν σύνθετη αντίσταση στον ζυγό PCC, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτώσης της σύνθετης αντίστασης.

Ακόμη, παρατηρείται ότι στον ζυγό που «μολύνει» πιο πολύ το δίκτυο, ο οποίος είναι αυτός της βιομηχανίας, για τις ίδιες αρμονικές τάξης, εμφανίζεται αύξηση και όχι βύθιση, όπως καταγράφηκε στον ζυγό PCC. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης, καθώς και στην μείωση του αρμονικού περιεχομένου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μια μορφής αντιστάθμισης. Με άλλα λόγια, στις ίδιες αρμονικές τάξης εισάγεται μια σύνθετη αντίσταση, προκειμένου να εξαλείψει τις αρμονικές. Παράλληλα, στους ζυγούς του WIND FARM και COMMERCIAL καταγράφονται μικρές μεταβολές, επειδή δεν υφίσταται σημαντικό πρόβλημα αρμονικού περιεχομένου.

4.7 Σύγκριση ζυγών με ένα και με δύο φίλτρα

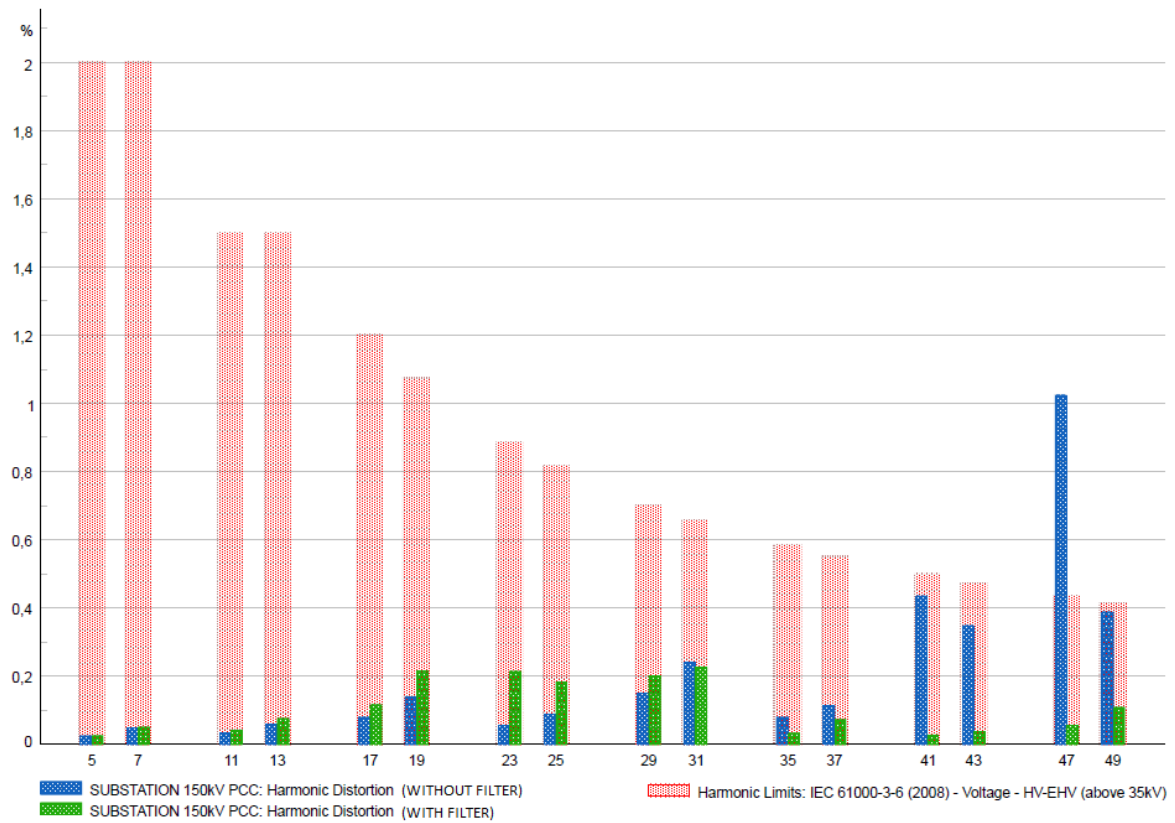
Το λογισμικό προσομοίωσης προσφέρει την δυνατότητα της σύγκρισης, σε ένα σχεδιάγραμμα ή ραβδόγραμμα, των αλλαγών που επιφέρει η χρήση ή όχι φίλτρων, προκειμένου να εξαχθούν άμεσα και περισσότερο ασφαλή συμπεράσματα και αποτελέσματα, όπως βλέπουμε και στο Διάγραμμα 25.



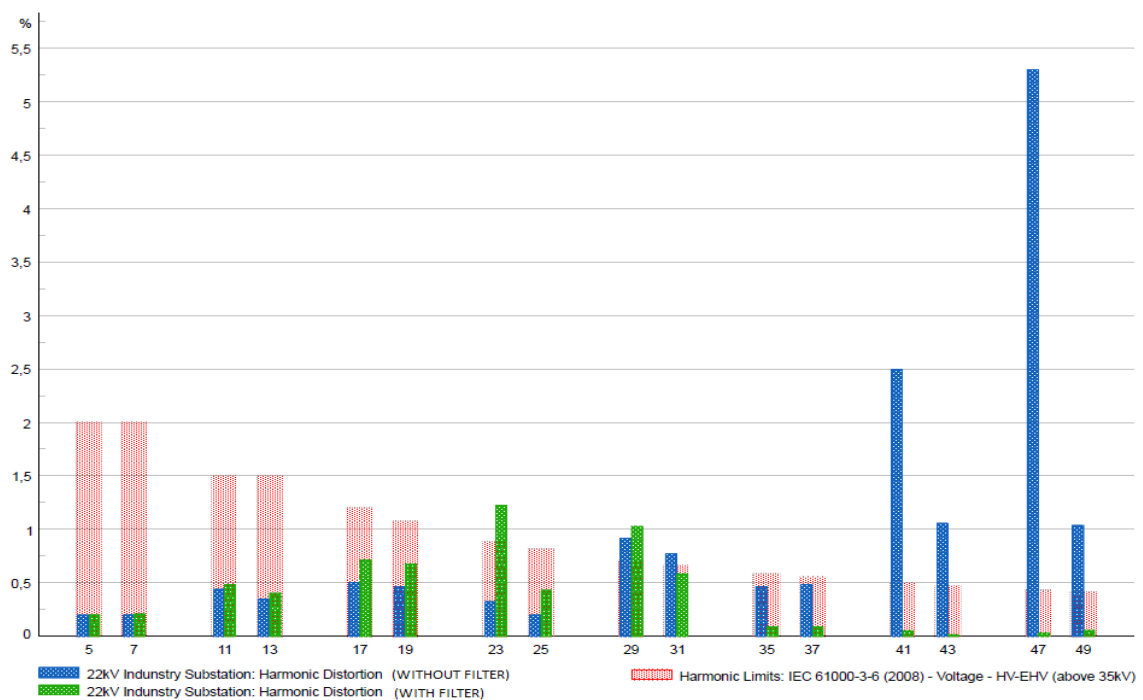
Διάγραμμα 25. Σύγκριση σύνθετων αντιστάσεων όλων των ζυγών με χωρίς, με ένα και με δύο παθητικά φίλτρα.

Τα Διαγράμματα 26 έως 31 απεικονίζουν την σημαντική θετική επίδραση της χρήσης του ενός παθητικού φίλτρου στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τόσο στο σημείο κοινής σύζευξης PCC όσο και σε κάθε ζυγό.

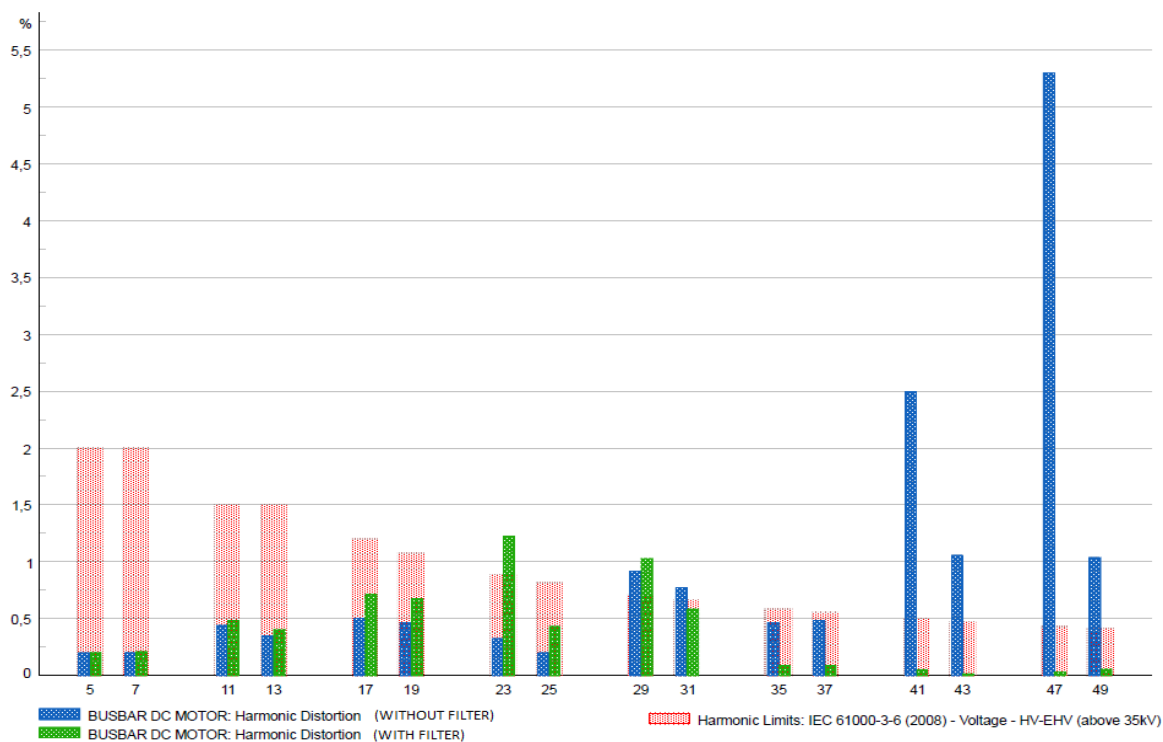
4.7.1 Σύγκριση μεταξύ ζυγών χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο



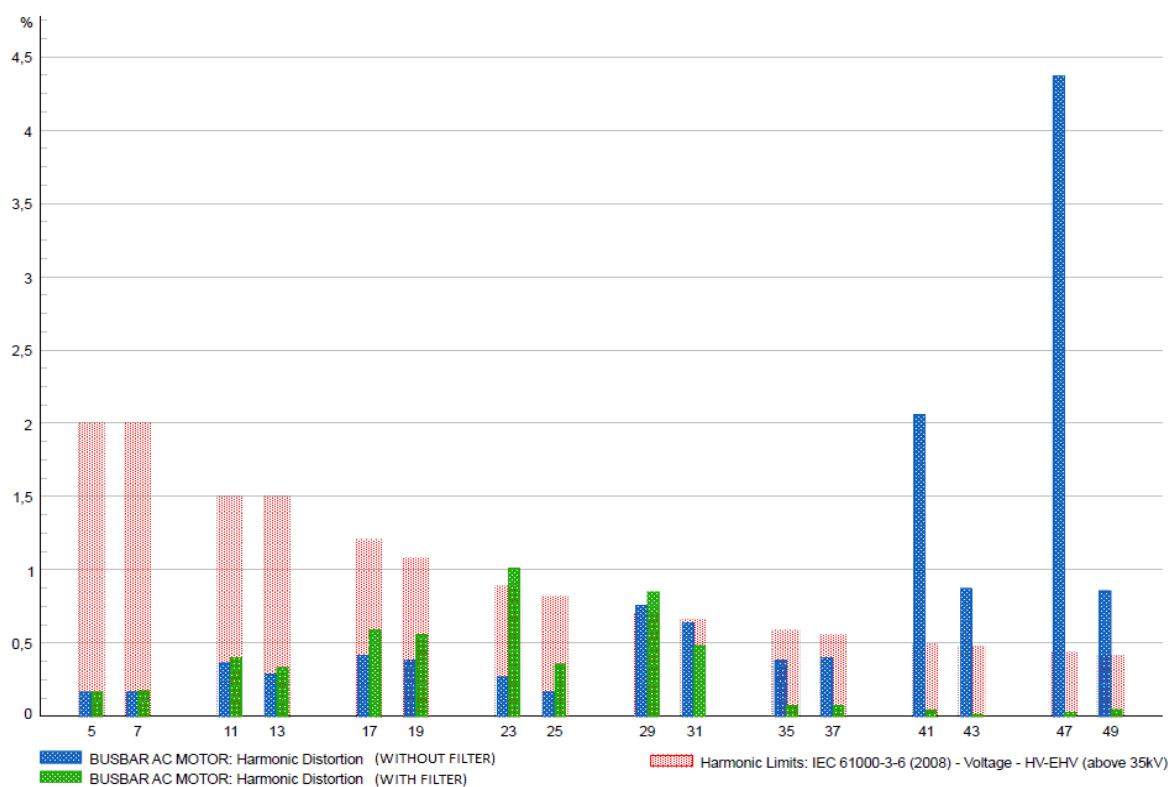
Διάγραμμα 26. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό PCC χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.



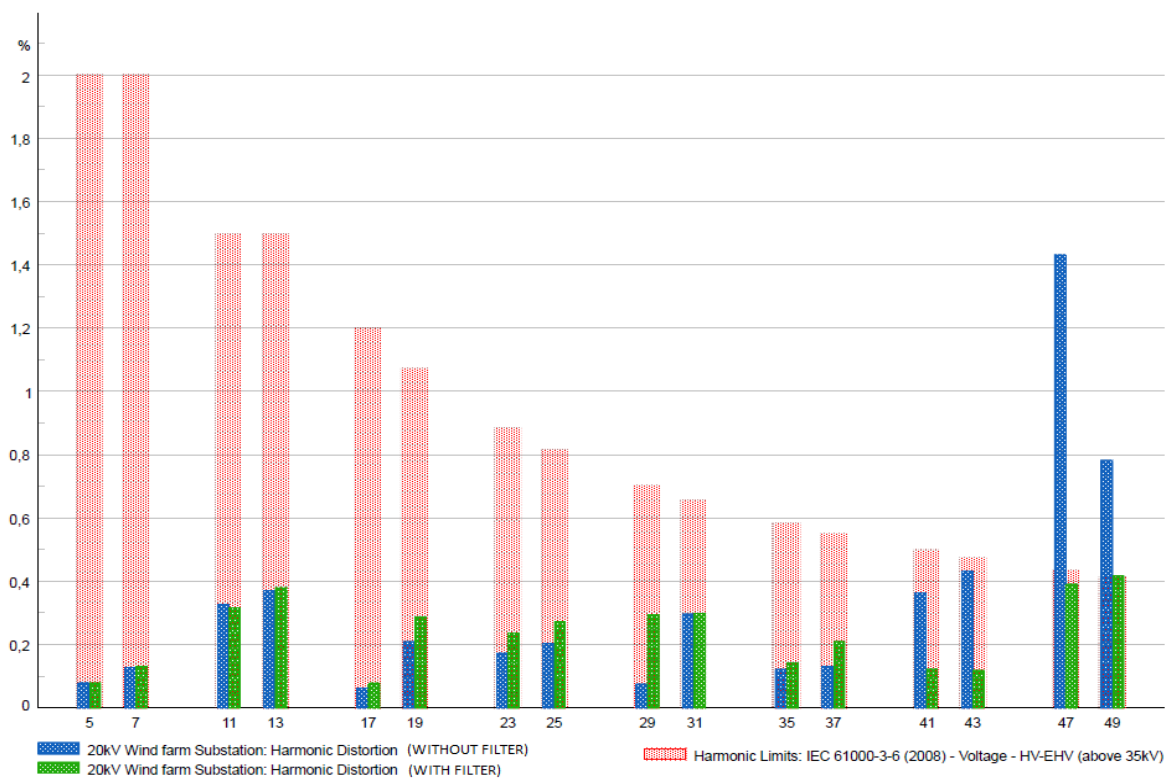
Διάγραμμα 27. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό βιομηχανίας χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.



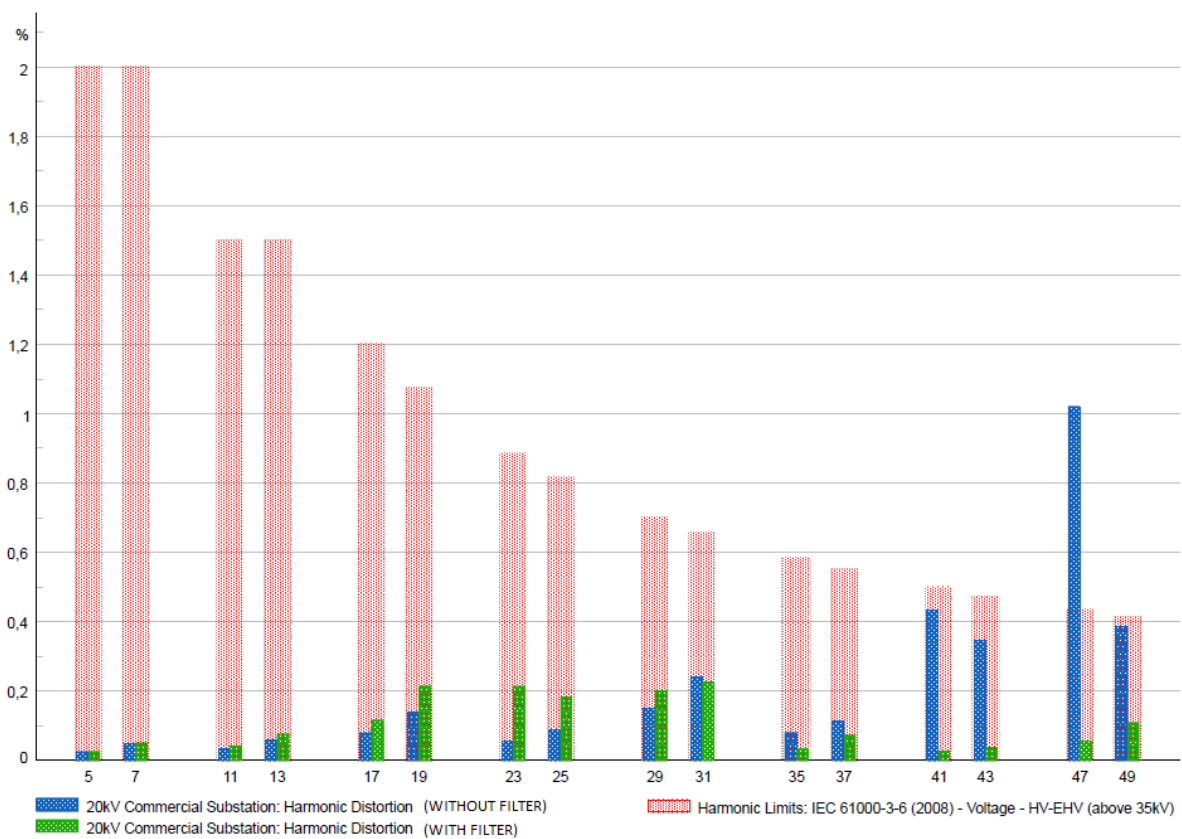
Διάγραμμα 28. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.



Διάγραμμα 29. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.



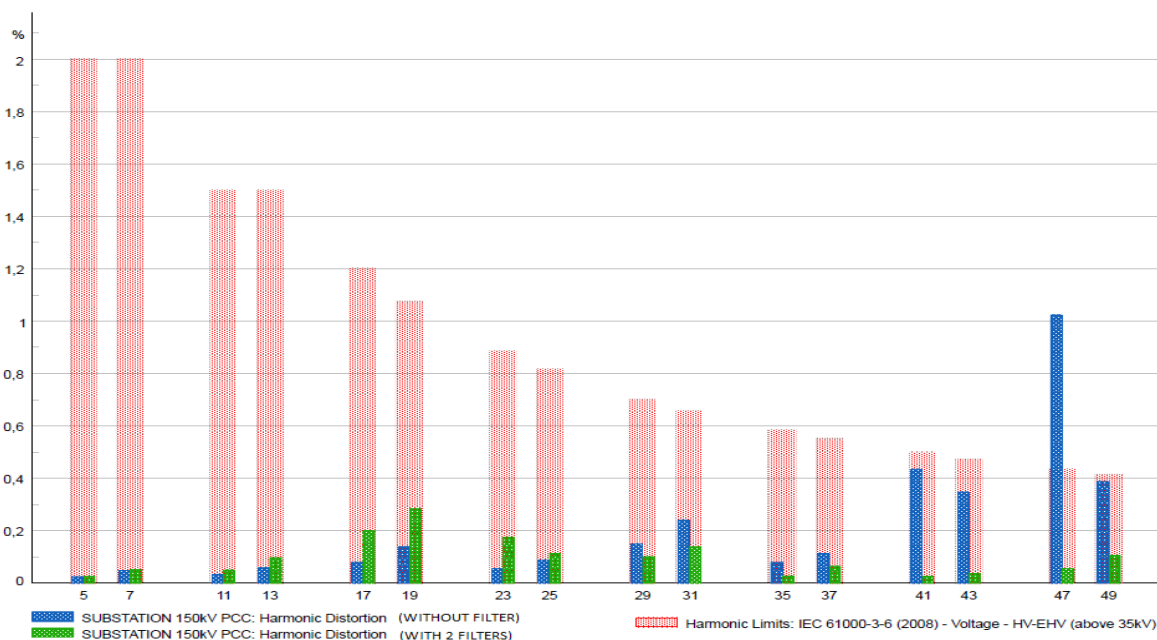
Διάγραμμα 30. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό αιολικού πάρκου χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.



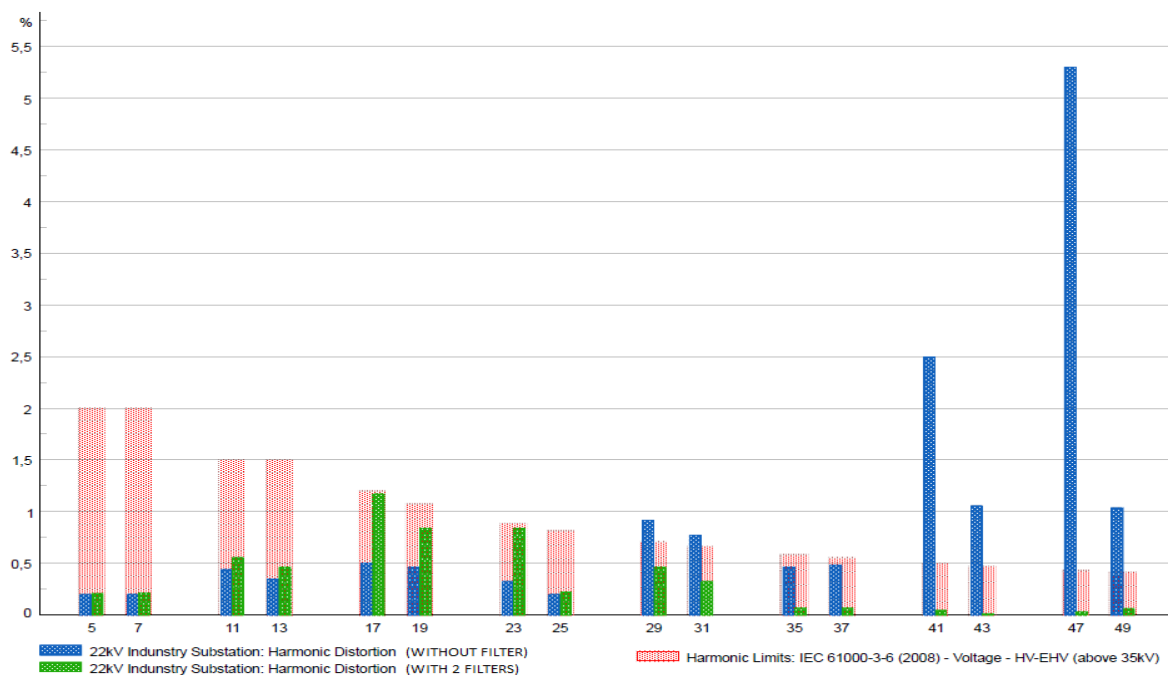
Διάγραμμα 31. Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση στον Εμπορικό ζυγό χωρίς και με ένα παθητικό φίλτρο.

4.7.2 Σύγκριση μεταξύ ζυγών χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα

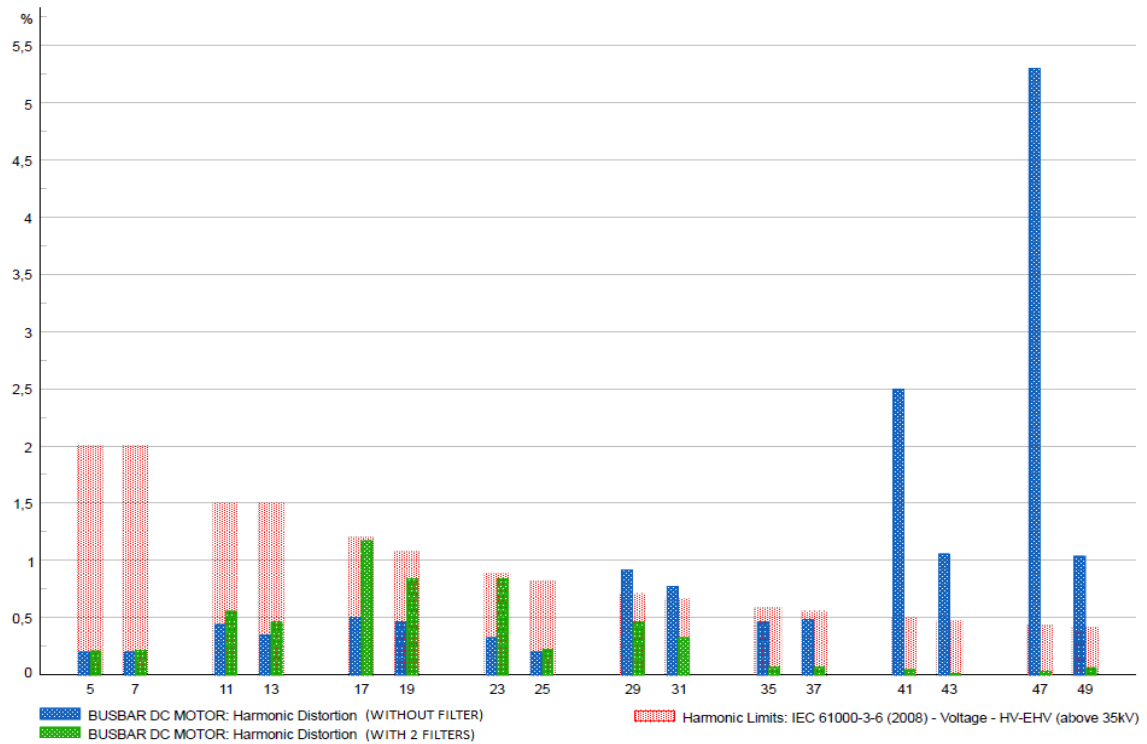
Τα Διαγράμματα 32 έως 37 αποδίδουν ξεκάθαρα την σημαντική θετική επίδραση της χρήσης δύο παθητικών φίλτρων στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τόσο στον ζυγό PCC όσο σε κάθε ζυγό.



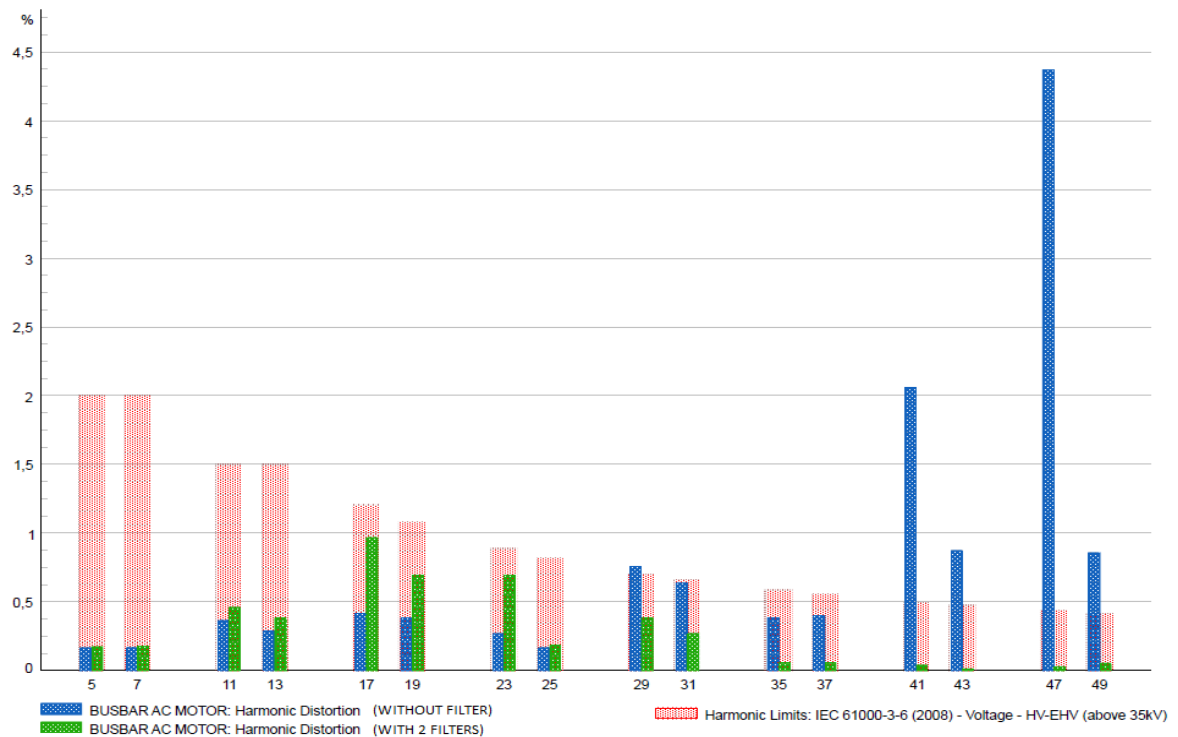
Διάγραμμα 32. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό PCC χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.



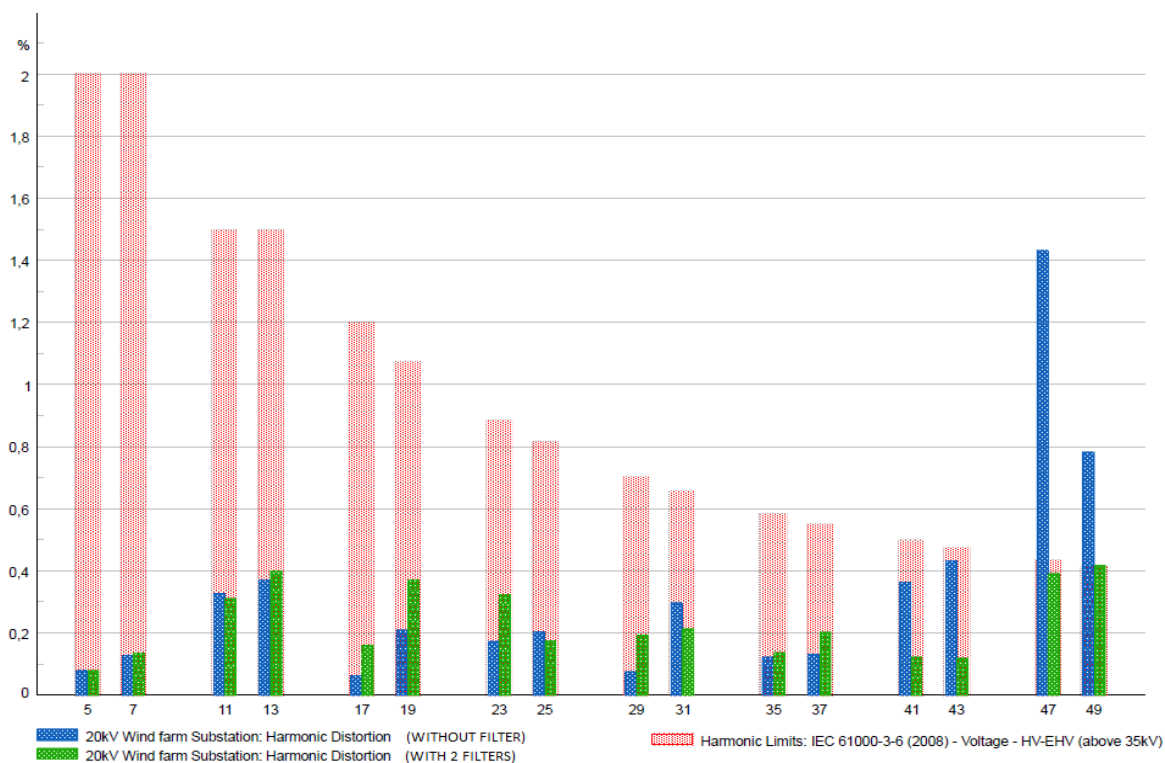
Διάγραμμα 33. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό βιομηχανίας χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.



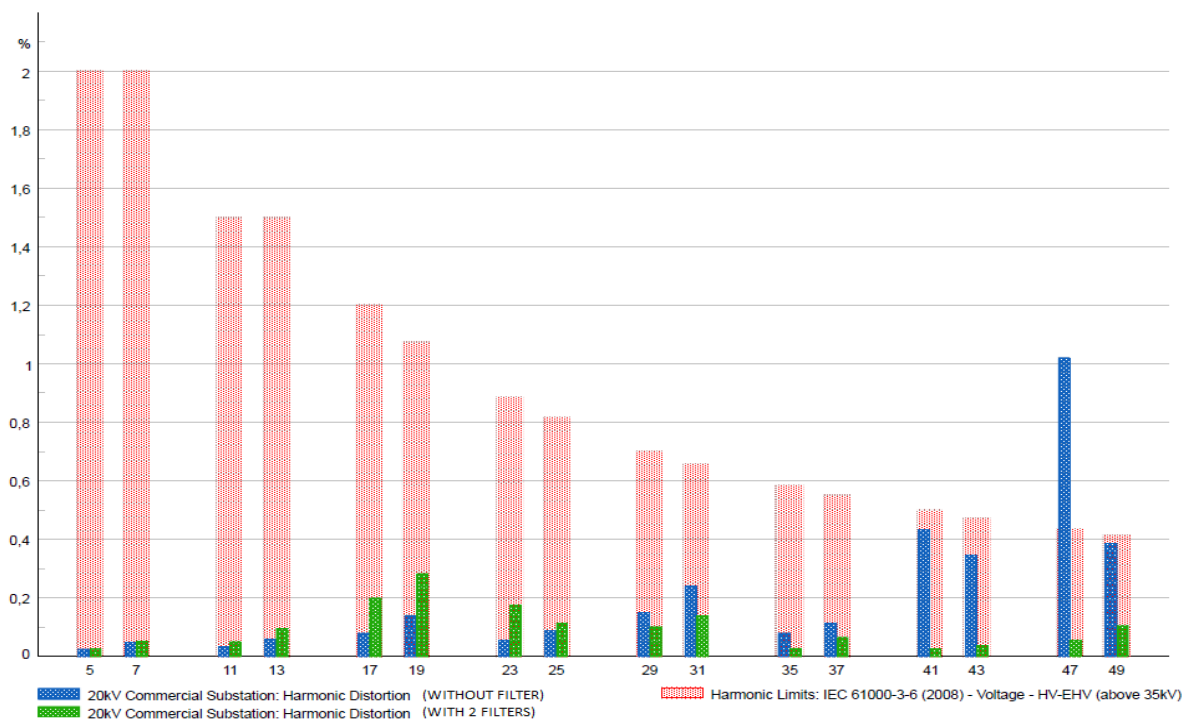
Διάγραμμα 34. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.



Διάγραμμα 35. Συνολική αρμονική παραμόρφωση σε κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.



Διάγραμμα 36. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στο ζυγό αιολικού πάρκου χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.



Διάγραμμα 37. Συνολική αρμονική παραμόρφωση στον εμπορικό ζυγό χωρίς και με δύο παθητικά φίλτρα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της χρήσης ενός ή δύο παθητικών φίλτρων, παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση στον ζυγό δεύτερου παθητικού φίλτρου επιφέρει σημαντική μείωση των αρμονικών από την 17^η μέχρι και την 31^η αρμονική, ενώ οι υπόλοιπες αρμονικές δεν φαίνεται να δέχονται κάποια διαφορετική μείωση με την τοποθέτηση και δεύτερου παθητικού φίλτρου έναντι αυτής με ένα παθητικό φίλτρο.

Κεφάλαιο 5^ο Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα

5.1 Γενικά

Ένα ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αντικείμενό του την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση, εξασφαλίζοντας σε χαμηλή τιμή την παρακολούθηση, την σταθερή τάση, την σταθερή συχνότητα, καθώς και την υψηλή αξιοπιστία τροφοδοσίας των καταναλωτών.

Στόχος του ευφυούς δικτύου είναι η ανάγκη αναμόρφωσης και εκσυγχρονισμού του υφιστάμενου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να καταστεί καλύτερη και βέλτιστη η αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων πόρων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η επιδίωξη, αξιοποιείται ο συνδυασμός της πληροφορικής, της τεχνολογίας των επικοινωνιών, των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και το ίδιο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Το φαινόμενο των αρμονικών ρεύματος και τάσης δημιουργείται λόγω της εκτεταμένης χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος και, γενικά, των ηλεκτρονικών, που όμως είναι απαραίτητα για τις παραπάνω λειτουργίες. Η αναγκαιότητα αυτή, δημιουργεί την εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων και δυσλειτουργιών, τόσο από την τοποθέτησή τους στον εξοπλισμό των ΣΗΕ και στον εξοπλισμό των συστημάτων παρακολούθησης στους έξυπνους μετρητές, όσο και στον εξοπλισμό των συσκευών αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Ενδεικτικά, μερικές δυσλειτουργίες και βλάβες που μπορούν να προκύψουν είναι οι λανθασμένες τιμές καταγραφής του συστήματος, περίπτωση που γίνεται να καταλήξει σε λάθος ή, ακόμη, και σε πρόωρή αλλαγή και επισκευή του εξοπλισμού, όπως και σε πιο γρήγορη φθορά τόσο του ηλεκτρονικού όσο και του λοιπού εξοπλισμού, γεγονός που, με τη σειρά του, είναι σε θέση να καταστήσει ακριβότερη τη λειτουργία του συστήματος. Είναι, επίσης, πιθανό, ακόμη και παθητικά συστήματα αντιστάθμισης άεργου ισχύος, τα οποία χρησιμοποιούν πυκνωτές, καθώς και ενεργά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να εμφανίσουν φθορές ή ακόμα και να καταστραφούν ολικά, πολύ πιο σύντομα από την ημερομηνία που προσδιορίζει ο κατασκευαστής τους.

Με βάση τα υπόλοιπα, γίνεται κατανοητό ότι η αναγκαιότητα της χρησιμοποίησης ενός ευφυούς δικτύου δεν εξαντλείται στον εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων, αλλά, κυρίως, επιδιώκει την σημαντική μείωση στο κόστος λειτουργίας τους. Η μείωση του κόστους λειτουργίας μιας εγκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συνόλου του ευφυούς δικτύου διαχείρισης της ηλεκτρικής

ενέργειας επιβάλλει την θέσπιση σχετικής νομοθεσίας για υποχρεωτική μελέτη των αρμονικών και, γενικότερα, του συνόλου που αναφέρεται στην ποιότητα ισχύος.

5.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα της προσομοίωσης

Στην παρούσα εργασία, επιδιώχθηκε η αξιολόγηση της επίδρασης των παθητικών φίλτρων στη μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης σε δίκτυο με κινητήρα συνεχούς ρεύματος, εναλλασσόμενου ρεύματος, σε ζυγό Αιολικού Πάρκου, σε εμπορικό ζυγό, καθώς και σε ζυγό βιομηχανίας, τόσο στο σημείο σύζευξής τους, όσο και σε κάθε ζυγό, με την αξιοποίηση κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης.

Οι σχετικές μετρήσεις οδήγησαν στα παρακάτω αποτελέσματα:

- Όταν δεν χρησιμοποιείται παθητικό φίλτρο, η μεγαλύτερη αρμονική παραμόρφωση εντοπίζεται στους ζυγούς της βιομηχανίας, του κινητήρα συνεχούς, καθώς και του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος λόγω τροφοδοσίας από κοινό ζυγό.
- Στη προσομοίωση με το ένα φίλτρο αρμονικών παρατηρήθηκε εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης σε όλους τους ζυγούς, με ορισμένες αρμονικές να μειώνονται κάτω από τα όρια στους ζυγούς PCC, WIND FARM και COMMERCIAL.
- Με τη χρήση ενός παθητικού φίλτρου οι σύνθετες αντιστάσεις σε όλους τους ζυγούς μηδενίζονται, ενώ και στο σημείο κοινής σύζευξης παρατηρείται, επίσης, σημαντική μείωση.
- Στην προσομοίωση με τα δύο φίλτρα αρμονικών καταγράφηκε εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης σε ένα μικρό ποσοστό του αντίστοιχου με το ένα φίλτρο, σε όλους τους ζυγούς.
- Στους ζυγούς PCC, WIND PARK και COMMERCIAL παρατηρήθηκε ότι οι αρμονικές μειώθηκαν πολύ πιο κάτω από τα όρια σε όλες τις αρμονικές τάξης, με το σύνολο των αρμονικών στο ζυγό της βιομηχανίας να μειώνονται κάτω από τα επιτρεπτά όρια.
- Σε όλους τους ζυγούς, εκτός του PCC και COMMERCIAL, καταγράφεται πτώση στην συνολική αρμονική παραμόρφωση.
- Χωρίς τη χρήση φίλτρου παρατηρήθηκε στον κεντρικό ζυγό, δηλαδή στο PCC, μία ανάλογη αύξηση σύνθετης αντίστασης όσο μεγαλώνει η τάξη των αρμονικών.

- Τόσο με το ένα φίλτρο όσο και με τα δύο φίλτρα μαζί, από την 20^η μέχρι την 30^η αρμονική καταγράφηκε απότομη βύθιση της σύνθετης αντίστασης, γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο που εμφανίζεται κατά την ενεργοποίηση των φίλτρων, σύμφωνα με το οποίο τα φίλτρα, για μια χρονική στιγμή, απορροφούν σύνθετη αντίσταση στον ζυγό PCC, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτώσης της σύνθετης αντίστασης.
- Παρατηρήθηκε ότι στον ζυγό που «μολύνει» πιο πολύ το δίκτυο, δηλαδή σε αυτόν της βιομηχανίας, για τις ίδιες αρμονικές τάξης, εμφανίζεται αύξηση και όχι βύθιση, όπως καταγράφηκε στον ζυγό PCC, φαινόμενο, το οποίο οφείλεται στην εξομάλυνση της σύνθετης αντίστασης, καθώς και στην μείωση του αρμονικού περιεχομένου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μια μορφής αντιστάθμισης. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ως έκβαση ότι θα πρέπει στις ίδιες αρμονικές τάξης να εισάγεται μια σύνθετη αντίσταση, προκειμένου να εξαλείψει τις αρμονικές.
- Στους ζυγούς του WIND PARK και του COMMERCIAL καταγράφονται μικρές μεταβολές, επειδή δεν υφίσταται σημαντικό πρόβλημα αρμονικού περιεχομένου.
- Διαπιστώθηκε ότι υφίσταται σημαντική θετική επίδραση της χρήσης του ενός παθητικού φίλτρου στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τόσο στο σημείο κοινής σύζευξης PCC όσο και σε κάθε ζυγό.
- Καταγράφηκε η σημαντικότητα της θετικής επίδρασης της χρήσης δύο παθητικών φίλτρων στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τόσο στο σημείο κοινής σύζευξης PCC όσο σε κάθε ζυγό.
- Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της χρήσης ενός ή δύο παθητικών φίλτρων, διαπιστώθηκε ότι η τοποθέτηση στον ζυγό δεύτερου παθητικού φίλτρου επιφέρει σημαντική μείωση των αρμονικών από την 17^η μέχρι και την 31^η αρμονική, ενώ οι υπόλοιπες αρμονικές δεν φαίνεται να δέχονται κάποια διαφορετική μείωση με την τοποθέτηση και δεύτερου παθητικού φίλτρου έναντι αυτής με ένα παθητικό φίλτρο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης που υλοποιήθηκε, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η χρήση δύο παθητικών φίλτρων διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης, τόσο στο σημείο του κεντρικού ζυγού PCC, όσο και σε κάθε ζυγό. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας

δημιουργεί την αναγκαιότητα της ενσωμάτωσης της στην ηλεκτρική ενέργεια σε όλα τα στάδιά της: στην παραγωγή, στην διανομή και στην κατανάλωση. Στο πλαίσιο αυτό, η διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας θα αντιμετωπιστεί με σκοπό η λειτουργία όλων των εμπλεκόμενων συστημάτων να καταστεί αρμονική, οικονομική, αποδοτική, ασφαλής και ποιοτική. Η διασφάλιση αυτής της λειτουργίας απαιτεί μεθοδική μελέτη και συνεπή παρακολούθηση της παραγόμενης ποιότητας ισχύος.

Τα ευφυή δίκτυα αποτελούν την απάντηση της σύγχρονης τεχνολογίας στην αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και όχι μόνο, διασφαλίζοντας την μέγιστη εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ισχύος, με την αποτελεσματική μείωση των αρμονικών. Επιπρόσθετα, η γενικότερη αξιοποίησή τους στην ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων επιφέρει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ομαλή, ποιοτική και οικονομική τους λειτουργία. Η συνεπής και μεθοδική παρακολούθηση της λειτουργίας τους μέσω της αποδιδόμενης ποσότητας ισχύος θα μεγιστοποιήσει τα προσδοκώμενα θετικά αποτελέσματα προς όφελος όλων.

5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ενδιαφέρον θα είχε η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της αξιοποίησης περισσότερων παθητικών φίλτρων στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Στην κατεύθυνση αυτή, και εφόσον διαπιστωθεί ότι η αύξηση του αριθμού των παθητικών φίλτρων λειτουργεί αποτελεσματικά στην μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης, είναι σημαντικό να διαπιστωθεί αν υφίσταται, και σε πιο βαθμό, αναλογική σχέση μεταξύ του αριθμού των χρησιμοποιούμενων παθητικών φίλτρων και του βαθμού μείωσης της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Στο πλαίσιο αυτό, εφόσον η διερεύνηση αυτή οδηγήσει σε θετικά συμπεράσματα, θα πρέπει να διερευνηθεί επίσης η, τυχόν, επιβάρυνση που επιφέρει η αύξηση των παθητικών φίλτρων στη γενικότερη λειτουργία του δικτύου, καθώς και στην ποιότητα της ανταπόκρισής του στη ζήτηση ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] M. B. M. E. G. S. A. & K. M. Madrigal, «Twin peaks: Surmounting the global challenges of energy for all and greener, more efficient electricity services,» IEEE Power Energy Magazine, τόμ. 10, αρ. 3, pp. 20-29, 2012.
- [2] R. A. S. R. D. R. C. B. J. & K. L. A. Walling, «Summary of distributed resources impact on power delivery systems,» IEEE Transactions on Power Delivery, τόμ. 23, αρ. 3, pp. 1636-1644, 2008.
- [3] S. N. C. P. & C. O. Salih, «The effect of wind power integration on the frequency of tap changes of a substation transformer,» IEEE Trans. Power Syst., τόμ. 28, αρ. 4, pp. 4320 - 4327, 2013.
- [4] G. T. Heydt, «The next generation of power distribution systems,» IEEE, Trans. Smart Grid, τόμ. 1, αρ. 13, pp. 225 - 235 , 2010.
- [5] S. A. G. A. M. N. & R. S. Conti, «Local voltage regulation in LV distribution networks with PV distributed generation,» Int. Symp. on Power Electron., Elect. Drives, Autom. and Motion, p. 519524, 2006.
- [6] P. M. S. C. P. F. & F. L. A. F. M. Carvalho, «Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks,» IEEE Trans. Power Syst., τόμ. 23, αρ. 2, pp. 766 - 772, 2008.
- [7] T. F. M. F. & B. M. Stetz, «Improved low voltage grid - integration of photovoltaic systems in Germany,» IEEE Trans. Sustain. Energy, τόμ. 4, αρ. 2, pp. 534 - 542, 2013.
- [8] Ι. Κιοσκερίδης, Ηλεκτρονικά ισχύος, 2η έκδοση επιμ., Τζιόλα, 2019.
- [9] Μ. R. Spiegel, Ανάλυση Fourier, ΕΣΠΙ Εκδοτική, 1978.
- [10] C. —. Ι. C. X. —. q. & Q. H. Hao, «Delta – Polygon Autotransformer Based 24-Pulse Rectifier for Switching Mode Power Supply,» TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), τόμ. 14, pp. 431-439.
- [11] Γ. Β. Γκαρούτσος, Ανάλυση Fourier. Σειρές Fourier - Μετασχηματισμοί Fourier, SPIN, 2008.
- [12] J. F. James, A Student's Guide to Fourier Transforms, Cambridge University Press, 2017.
- [13] F. C. De La Rosa, Harmonics and Power Systems, CRC Press, 2006.
- [14] Δ. Ν. Π. & Π. Γ. Λαμπρίδης, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ζήτη, 2006.
- [15] IEEE, «IEEE.org,» ANSI/IEEE, τόμ. 519, pp. 1 - 54, 1981.
- [16] M. A. S. M. P. & D. S. Masoum, «Load management in smart grids considering harmonic distortion and transformer derating,» Innovative Smart Grid Technologies, pp. 1-7, 2010.
- [17] T. K. D. M. D. B. M. M. Z. Z. T. M. & A. S. A. Sato, Smart Grid Standards. Specifications, Requirements and Technologies, Wiley, 2015.
- [18] J. Das, «Power System Harmonics, Power System Harmonics and Passive Filter Designs,» pp. 1-29, 2015.
- [19] Β. & Μ. Δ. Μπιτζιώνης, Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας, Τζιόλα, 2011.
- [20] S. S. C. N. J. B. H. & S. P. Padmanaban, Power Quality in Modern Power Systems, Elsevier Science Publishing Co Inc, 2020.

- [21] E. Hub, « <https://engineershub.co.in/what-is-voltage-unbalance/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [22] E. Hub, «<https://engineershub.co.in/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [23] K. V. K. S. G. —. S. J. S. —. J. L. & S. —. J. L. Chan — Ki, HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems, Wiley - IEEE Press, 2009.
- [24] S. A. A. & I. S. Mekhamer, «Technical Comparison of Harmonic Mitigation Techniques for Industrial Electrical Power Systems,» σε Fifteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'2012), Alexandria - Egypt, 2012.
- [25] A. N. Γ. Β. Γ. & Μ. —. Α. Ι. Βοβός, Ανάλυση Κυκλωμάτων Ισχύος, 2η Έκδοση επιμ., Ζήτη, 2020.
- [26] H. Akagi, «Active Harmonic Filters,» Proceedings of the IEEE, τόμ. 93, αρ. 12, pp. 2128-2141, 2005.
- [27] K. Aseem, Introduction to Power Quality and Active Power Filters: with MATLAB based simulation studies, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.