



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΓΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ

ΥΠΟ
ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων
για την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΓΩΝ
ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ**

ΥΠΟ
ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022

© 2022 Γρηγορόπουλος Γεώργιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής:

(Επιβλέπων)

Δρ. Αναστάσιος Σταματέλος,

Καθηγητής, τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής:

Δρ. Γεώργιος Στρατάκης

Διδάσκων ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Γεώργιος Χαραλάμπους

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας για την απόκτηση του διπλώματος του μηχανολόγου μηχανικού, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στους ανθρώπους που αποτέλεσαν τους κυριότερους παράγοντες τόσο στην ανάθεση όσο και στην καθοδήγηση της εν λόγω εργασίας.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Κωνσταντίνο Σάτσιο, πρόεδρο και διευθύνων σύμβουλο της Scientific Energy Management (S.E.MAN.) Α.Ε. , στην οποία εκπλήρωσα την πρακτική μου άσκηση, για την επιθυμία του να προχωρήσουμε την συνεργασία μας στην εκπόνηση της διπλωματικής μου θέσης πάνω σε μελέτη έργου του ομίλου που σχετίζεται με την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε βιομηχανική μονάδα.

Επιπλέον, είμαι ευγνώμων στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Αναστάσιο Σταματέλο, ο οποίος όχι μόνο δέχτηκε αλλά και καλωσόρισε ένθερμα αυτή την συνεργασία εμπλουτίζοντας την με ιδέες και προτάσεις.

Η ευκαιρία που μου δόθηκε ήταν πολύτιμη διότι διεύρυνα και εμβάθυνα τις γνώσεις μου πάνω στην ενέργεια, μελετώντας την μέσα από μια διαφορετική σκοπιά, αυτή της ηλεκτροτεχνίας, η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την μηχανολογία καθώς συνυπάρχουν πάντα σε κάθε εφαρμογή. Επιπροσθέτως, μου δόθηκε η δυνατότητα να επισκεφτώ μια πραγματικά μεγάλη και σημαντική βιομηχανία της Ελλάδας στον τομέα της κεραμοποιίας (όπου εκπονήθηκε το έργο, το όνομα της οποίας δεν αναφέρεται για λόγους απορρήτου), καταφέροντας να έρθω σε επαφή για πρώτη φορά με βιομηχανικό εξοπλισμό, να τον μελετήσω αλλά και να αντλήσω πληροφορίες για τη διαδικασία και γραμμή παραγωγής των κεραμικών προϊόντων.

Οφείλω τις ευχαριστίες μου και στον κ. Καλόθετο Χαράλαμπο, τεχνικό διευθυντή του ομίλου SEMAN, υπό την καθοδήγηση του οποίου πραγματοποίησα τις μετρήσεις στο εργοστάσιο ενώ η συνεισφορά του πάνω σε τεχνικά ζητήματα ήταν καθοριστική.

Ευχαριστώ για την τιμή να αποτελούν τα υπόλοιπα μέλη τις τριμελούς επιτροπής τους καθηγητές Δρ. Στρατάκη Γεώργιο και Δρ. Χαραλάμπους Γεώργιο καθώς και για τις χρήσιμες υποδείξεις, προτάσεις και συμβουλές στους.

Τέλος, ευχαριστώ βαθύτατα τους γονείς μου για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εν λόγω εργασίας.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΓΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ

ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αναστάσιος Σταματέλος

Καθηγητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Περίληψη

Τα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος υποφέρουν από την ύπαρξη άεργων και αρμονικών ρευμάτων. Τα συγκεκριμένα ρεύματα, επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις μεταξύ των οποίων είναι η αύξηση της κατανάλωσης, επιβαρύνσεις στα τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας και βλάβες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που συνεπάγονται αυξημένα κόστη λειτουργίας. Αυτό αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των βιομηχανικών μονάδων, το οποίο επιλύεται με τη χρήση ειδικών φίλτρων απόσβεσης. Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και τον σχεδιασμό των αναγκαίων φίλτρων αυτού του τύπου σε εργοστάσιο παραγωγής κεραμικών.

Αρχικά, γίνονται μετρήσεις-καταγραφές των αρμονικών ρευμάτων-τάσεων και των άεργων ρευμάτων στους ηλεκτρικούς πίνακες φορτίων της μονάδας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων-καταγραφών.

Έπειτα, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών και ο σχεδιασμός του απαιτούμενου φίλτρου απόσβεσης καθώς και εκτίμηση της απόδοσης.

Τέλος, εγκαθίσταται το φίλτρο και παίρνονται μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τα αρχικά ενώ συζητώνται τα επιτυγχανόμενα οφέλη για το εργοστάσιο.

Λέξεις-κλειδιά: Εναλλασσόμενο ρεύμα, άεργη ισχύς, φίλτρο απόσβεσης, αρμονικές, συντελεστής ισχύος

FILTER DESIGN FOR HARMONICS AND REACTIVE CURRENT MITIGATION FOR POWER FACTOR CORRECTION IN INDUSTRIAL FACILITY

GRIGOROPOULOS GEORGIOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2022

Supervisor: Dr. Anastasios Stamatelos,
Professor, department of Mechanical Engineering

Abstract

Harmonics and reactive currents are significant issues observed in industrial AC electrical installations. They are responsible for numerous problems and defects, which include the rise of power consumption, associated financial penalties by the electricity provider and damage to the electrical equipment, which translates to further economic losses. Thus, harmonics and reactive currents affect economically any AC user, especially the industrial facilities. This problem is addressed by the design and installation of specialized filters which utilize various compensation techniques to increase efficiency and, as a result, reduce the above-mentioned costs and penalties. This study deals with the investigation of this type of problems and the associated design of the necessary filters for a ceramics factory.

First, electric circuit measurements are conducted in site, to calculate harmonics and reactive currents for the loads of interest.

Next stage is the analysis and processing of measurements.

Then, the necessary filter parameters and characteristics are calculated in order to support filter design.

Finally, the filters are installed, and new measurements are taken to compare with the initial operation without the filter. Improvements are assessed and further discussed.

Key words: Alternate current, reactive power, power factor, compensation filter, harmonic currents

ΠΕΡΙΟΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΟΕΧΟΜΕΝΑ	VIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Περί εναλλασσόμενου ρεύματος.....	1
1.2 Συντελεστής ισχύος και εξοικονόμηση ενέργειας.	5
1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ	8
2.1 Εμπέδηση	8
2.1.1 Χωρητική αντίδραση	8
2.1.2 Επαγωγική αντίδραση	9
2.1.3 Πραγματική αντίσταση.....	11
2.1.4 Σύνθετη Αντίσταση	12
2.1.5 Συντονισμός	13
2.1.5.1 Συντονισμός σε σειρά.....	13
2.1.5.2 Παράλληλος Συντονισμός	17
2.2 Συντελεστής ισχύος θεμελιώδους	21
2.2.1 Ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα.....	21
2.2.2 Ισχύς σε αντιστάτη.....	22
2.2.3 Ισχύς σε ιδανικά επαγωγικά και χωρητικά φορτία.....	23
2.2.4 Φαινόμενη ισχύς και συντελεστής ισχύος.....	25
2.3 Απόσβεση άεργων ρευμάτων.....	27
2.3.1 Διόρθωση συντελεστή ισχύος	27
2.3.2 Φίλτρα Πυκνωτών.....	28
Υλικά κατασκευής.....	28
Τύποι Σύνδεσης.....	28
Διαστασιολόγηση πυκνωτή	30
Τριφασικές μονάδες πυκνωτών	31
Βαθμίδες	32
Αρμονικές.....	32
Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης πυκνωτών για διόρθωση συντελεστή ισχύος	33
Προστασία IP	33
Εξαερισμός.....	34
2.3.3 Σύγχρονοι συμπυκνωτές	36
2.4 Αρμονικές	39
2.4.1 Θεώρημα Fourier	39
2.4.2 Κατηγορίες αρμονικών.....	43
2.4.3 Συντελεστής παραμόρφωσης.....	45
2.5 Μη γραμμικά φορτία.....	47
2.5.1 Ανορθωτής	48
2.5.2 Φούρνος Τόξου	52
2.5.3 Στατικός Αντισταθμιστής Άεργης Ισχύος	53

2.5.4 Ηλεκτρονικός έλεγχος	54
2.5.5 Κυκλομετατροπέας.....	55
2.5.6 Τροφοδοτικά Switch Mode.....	55
2.5.7 Ρυθμιστής Στροφών Μεταβλητού Πλάτους Παλμών	57
2.5.8 Λαμπες φθορίου	58
2.6 Απόσβεση Αρμονικών.....	58
2.6.1 Παθητικά φίλτρα.....	59
2.6.2 Ενεργά φίλτρα.....	67
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΕΡΑΜΟΠΟΙΙΑ.....	 72
3.1 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ.....	72
3.1.1 Φούρνος.....	73
3.1.2 Ηλεκτροκινητήρας πρέσας.....	80
3.2 ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ	87
3.2.1 Φίλτρο Φούρνο.....	88
3.2.1.1 Πηνία στραγγαλισμού	88
3.2.1.2 Πυκνωτές.....	88
3.2.1.3 Συντονισμός φίλτρου.....	91
3.2.1.3 Επιτρεπτά όρια.....	91
3.2.1.4 Ρύθμιση Θερμικής & Μαγνητικής προστασίας αυτόματου διακόπτη	92
3.2.2 Φίλτρο Ηλεκτροκινητήρα Πρέσας	92
3.3 Προσομοίωση παθητικού φίλτρου.....	94
3.4 Αποτελέσματα ενεργού φίλτρου	99
3.5 Οικονομική βελτιστοποίηση	100
Πριν την παρέμβαση	100
Μετά την παρέμβαση	100
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	 101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	104
Α)Υπολογισμοί LTSPICE.	104
Β) Στοιχεία παθητικού φίλτρου	107
Πυκνωτές	110
Στραγγαλιστικά πηνία.....	111
Γ)Στοιχεία ενεργού φίλτρου	116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Γραφική απεικόνιση τάσης-έντασης γραμμικών φορτίων με διαφορετική εμπέδηση. (ΠΗΓΗ: www.electrical4u.net)	1
Εικόνα 2: Γραφικές απεικόνιση τάσης-έντασης (α) γραμμικού και (β) μη γραμμικού φορτίου.....	1
Εικόνα 3: Ηλεκτρική αντίσταση σε αγωγό. Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού. (ΠΗΓΗ: denkwerkstatt-physik.de).....	2
Εικόνα 4: Γραφική απεικόνιση επιδερμικού φαινομένου με αύξηση της συχνότητας. (ΠΗΓΗ: www.allaboutcircuits.com).....	2
Εικόνα 5: Απεικόνιση μείωσης δινορευμάτων με χρήση ελασμάτων. (ΠΗΓΗ: pediaa.com)	3
Εικόνα 6: Μαγνητική υστέρηση. (ΠΗΓΗ: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu).....	3
Εικόνα 7: Οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες σε βιομηχανία. Το πιο συνηθισμένο είδος εξοπλισμού. (ΠΗΓΗ: EcoAmbassadorAcademy).....	4
Εικόνα 8: Γραφική παράσταση συσχέτισης χωρητικής αντίδρασης και έντασης για πυκνωτή. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	9
Εικόνα 9: Διανύσματα έντασης και τάσης στο πεδίο της συχνότητας για πυκνωτή. Το ρεύμα προπορεύεται κατά 90 μοίρες. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	9
Εικόνα 10: Κυματομορφές τάσης-έντασης στο πεδίο του χρόνου σε πυκνωτή. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	9
Εικόνα 11: Γραφική συσχέτιση επαγωγικής αντίδρασης-έντασης για πηνίο. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	10
Εικόνα 12: Διανύσματα τάσης-έντασης στο πεδίο της συχνότητας για πηνίο. Η τάση προπορεύεται της έντασης κατά 90 μοίρες. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	10
Εικόνα 13: Κυματομορφές τάσης-έντασης σε πηνίο στο πεδίο του χρόνου. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	11
Εικόνα 14: Διανύσματα τάσης-έντασης για αντιστάτη στο πεδίο της συχνότητας. Μηδενική διαφορά φάσης, πλήρης ταύτιση.....	11
Εικόνα 15: Κυματομορφές τάσης-έντασης στο πεδίο του χρόνου για αντιστάτη. Τα μεγέθη μεγιστοποιούνται και ελαχιστοποιούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	11
Εικόνα 16: Αναπαράστασή σχέσης συχνότητας με αντιδράσεις και αντίσταση για τυχαία μεγέθη. (ΠΗΓΗ: <i>AC Electrical Circuit Analysis, A Practical Approach</i>).....	12
Εικόνα 17: Μιγαδική γραφική απεικόνιση εμπέδησης και συνητωσών αντιδράσεων και πραγματικής αντίστασης. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws).....	13
Εικόνα 18: Κύκλωμα RLC σε σειρά.	13
Εικόνα 19: Διάγραμμα συντονισμού στο πεδίο της συχνότητας.	14
Εικόνα 20: Απότομη και ομαλή απόκριση συχνότητας του πλάτους της έντασης.	15
Εικόνα 21: Μεταβολή φάσης(μπλε) και μέτρου εμπέδησης (κόκκινο) με συναρτήσε Q . (ΠΗΓΗ: <i>AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach</i>).....	15
Εικόνα 22: Bandwidth απόκρισης συχνότητας RLC σε σειρά. (ΠΗΓΗ: https://www.electronics-tutorials.ws).....	16
Εικόνα 23: Πραγματικό κύκλωμα RLC σε παράλληλη σύνδεση. (ΠΗΓΗ: <i>AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach</i>).....	17
Εικόνα 24: Μετατροπή σύνθετης αντίστασης απο σειρά σε παράλληλη.	17
Εικόνα 25: Ιδανικό tank circuit.....	19
Εικόνα 26: Απόκριση συχνότητας πλάτους έντασης σε παράλληλο κύκλωμα RLC. Η ένταση ελαχιστοποιείται στον συντονισμό. (ΠΗΓΗ: https://www.electronics-tutorials.ws).....	19
Εικόνα 27: Απόκριση συχνότητας φάσης και εμπέδησης σε παράλληλο RLC. . (ΠΗΓΗ: <i>AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach</i>).....	20
Εικόνα 28: Ισχύς, Τάση και Ένταση σε αντιστάτη. Η ισχύς είναι πάντα θετική και ενέργεια χάνεται από το σύστημα με τη μορφή θερμότητας.	23
Εικόνα 29: Ισχύς, Τάση και Ένταση σε Πηνίο. Ισχύς χάνεται και προσδίδεται στο σύστημα περιοδικά.....	24
Εικόνα 30 Ισχύς, Τάση και Ένταση σε σύνθετη αντίσταση με $\varphi = -45^\circ$	25
Εικόνα 31: Τρίγωνο ισχύος άεργων ρευμάτων. Διακρίνεται η διαφορά φάσης φ . (ΠΗΓΗ: https://www.electronics-tutorials).....	26
Εικόνα 32: Διανυσματική αναπαράσταση διόρθωσης συντελεστή σε επαγωγικό φορτίο.	27
Εικόνα 33: Ομαδοποιημένη σύνδεση δύο και παραπάνω φορτίων παρόμοιων χαρακτηριστικών λειτουργίας σε μια κοινή τράπεζα πυκνωτών για τοπική διόρθωση του συντελεστή ισχύος. . (ΠΗΓΗ: https://electrical-engineering-portal.com).....	28

Εικόνα 34: Κεντρική σύνδεση του δικτύου σε ενιαίο φίλτρο. Αποτελεί τη πιο βολική λύση. Ιδανική για πολλά φορτία με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας. (ΠΗΓΗ: https://electrical-engineering-portal.com).....	29
Εικόνα 35: Σύνδεση πυκνωτών σε επαγωγικό κινητήρα. Στο πρώτο και το δεύτερο σχήμα το φίλτρο συνδέεται μετά τον εκκινητήρα. Στο τρίτο σχήμα γίνεται σύνδεση ανάντη με διακόπτες. (ΠΗΓΗ: https://electrical-engineering-portal.com).....	29
Εικόνα 36: Μέτρηση πραγματικής και φαινόμενης ισχύος φορτίου για υπολογισμό συντελεστή ισχύος.	30
Εικόνα 37: Παράλληλη σύνδεση πυκνωτή σε επαγωγικό φορτίο για βελτίωση συντελεστή.....	31
Εικόνα 38: Παράλληλη σύνδεση φίλτρου πυκνωτών τριγώνου(i) και αστέρα (ii) σε τριφασικό επαγωγικό φορτίο. (ΠΗΓΗ: www.mepits.com).....	32
Εικόνα 39: Τριφασικό φίλτρο πυκνωτών VAR με πηνία στραγγαλισμού.....	33
Εικόνα 40: Τοποθέτηση και εξαερισμός στραγγαλιστικών πηνίων.	34
Εικόνα 41: Ιδανική ροή εξαερισμού πίνακα αντιστάθμισης. (ΠΗΓΗ: Schneider electric).....	35
Εικόνα 42: Ισοδύναμο κύκλωμα φάσης σύγχρονου κινητήρα. Το αριστερό κομμάτι αντιστοιχεί στον ρότορα και το δεξί στον σπλισμό της φάσης.[https://www.tutorialspoint.com/equivalent-circuit-of-a-synchronous-motor]	36
Εικόνα 43: Υποδιέγερση. Το ρεύμα ακολουθεί την τάση εισόδου η οποία είναι μεγαλύτερη της επαγόμενης. Ο κινητήρας απορροφά VAR ισχύος από το δίκτυο. (ΠΗΓΗ: http://www.ee.hacettepe.edu.tr/~usezen/eem473/synchronous_machines-1p.pdf).....	37
Εικόνα 44: Υπερδιέγερση. Το ρεύμα προπορεύεται της τάσης εισόδου η οποία είναι μικρότερη της επαγόμενης. Ο κινητήρας προσφέρει VAR ισχύος στο δίκτυο.....	37
Εικόνα 45: Μεταβολή έντασης και φάσης ρεύματος σπλισμού από υποδιέγερση σε υπερδιέγερση κατά την αύξηση της επαγόμενης τάσης για σταθερό φορτίο. (ΠΗΓΗ: https://ijsea.com/archive/volume3/issue3/IJSEA03031002.pdf).....	38
Εικόνα 46: Γραφική συνάρτηση ρεύματος σπλισμού και συντελεστή ισχύος για διάφορα φορτία ως προς το ρεύμα διέγερσης. Για μηδενικό φορτίο παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές στις εντάσεις και το ολικό ελάχιστο για συντελεστή ίσο με τη μονάδα. (ΠΗΓΗ: https://www.electricaldeck.com)	38
Εικόνα 47: Σύγχρονος συμπακνωτής σαν φίλτρο απόσβεσης άεργων ρευμάτων. (ΠΗΓΗ: https://www.electrical4u.com).....	38
Εικόνα 48:Σύγχρονος συμπακνωτής σε βιομηχανική εγκατάσταση. (ΠΗΓΗ: www.mepits.com)	39
Εικόνα 49: Ανάλυση κύματος με τον μετασχηματισμό Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας.(ΠΗΓΗ: Wikipedia).....	40
Εικόνα 50: Διακριτή φασματική ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας. «Αποσύνθεση» παραμορφωμένου κύματος σε επιμέρους αρμονικές: 10Hz με $A_1=1$, 20Hz με $A_2=2$, 30Hz με $A_3=3$, 40Hz με $A_4=4$ και 50Hz με $A_5=5$. (ΠΗΓΗ: wikipedia.com).....	42
Εικόνα 51: Υπέρθεση των 5 αρμονικών στο πεδίο του χρόνου της εικ.39. $f(t) = \cos\omega t + 2\cos 2\omega t + 3\cos 3\omega t + 4\cos 4\omega t + 5\cos 5\omega t$	42
Εικόνα 52: Συμμετρικά κύματα από επαλληλία περιττών συχνοτήτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το θεμελιώδες κύμα 1 ^{ης} αρμονικής. (πρώτο από δεξιά) (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC).....	43
Εικόνα 53: Μη συμμετρικά κύματα υποδηλώνουν ύπαρξη άρτιων αρμονικών. (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC).....	43
Εικόνα 54: Φάσεις θεμελιώδους και μία φάση τρίτης αρμονικής. Οι υπόλοιπες δύο φάσεις της 3 ^{ης} συμπίπτουν ακριβώς πάνω στην πρώτη.....	44
Εικόνα 55: Τριφασική πηγή και φορτίο σε σύνδεση αστέρα. Τα ρεύματα των τριπλών αρμονικών κάθε φάσης προστίθενται στον ουδέτερο. (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC.....	45
Εικόνα 56: Διάνυσμα φαινόμενης ισχύος με την επιρροή τόσο της διαφοράς φάσης όσο και των αρμονικών. Η άεργη ισχύς έχει δύο συνιστώσες, Q και H. (ΠΗΓΗ: Mirus international Inc.).....	46
Εικόνα 57: Κυματομορφές τάσης και έντασης σε γραμμικό (αριστερά) και μη γραμμικό φορτίο (δεξιά). (ΠΗΓΗ: Eaton.com)	47
Εικόνα 58: Κύκλωμα τριφασικού ανορθωτή γέφυρας μισού κύματος.(ΠΗΓΗ: electronics-tutorials.com)	48
Εικόνα 59: Τάση εξόδου τριφασικού ανορθωτή γέφυρας.(ΠΗΓΗ: electronics-tutorials.com)	48
Εικόνα 60: Ιδανική κυματομορφή E.P. ρεύματος του ανορθωτή τετραγωνικού κύματος.(ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control).....	49
Εικόνα 61: Τάση γραμμής-ουδέτερου λόγω δυσλειτουργίας των ημιαγωγών. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control).....	50
Εικόνα 62: Τάση γραμμής-ουδέτερου για μεγαλύτερη αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των φάσεων. Παρατηρούνται εντονότερες εγκοπές. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control)	50

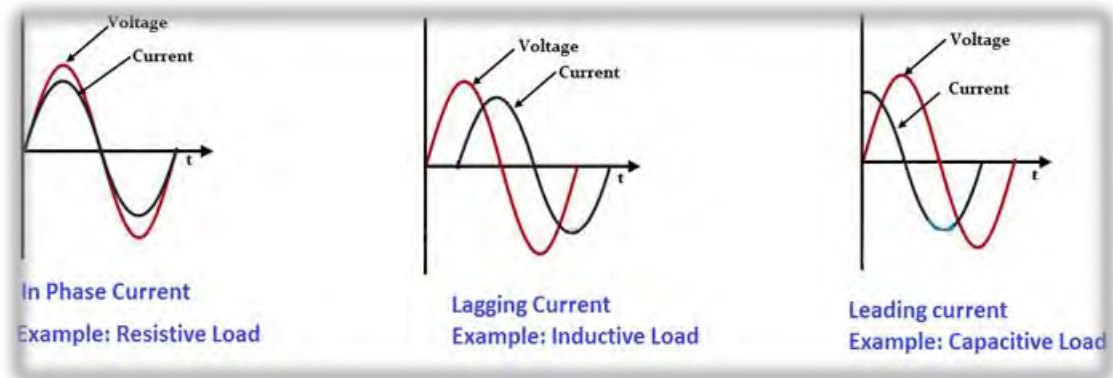
Εικόνα 63: Τυπικός στατικός αντισταθμιστής άεργης ισχύος. Δεύτερος από τα αριστερά στη διακλάδωση είναι ο ελεγχόμενος με θυρίστορ αντιδραστήρας (TCR).	54
Εικόνα 64: Κύκλωμα τριφασικού κυκλομετατροπέα. (ΠΗΓΗ: Lao, Keng Weng & Nguyen, Quan & Santoso, Surya. (2018). Power Electronic Converters for Low-Frequency HVAc Transmission: Functions and Challenges. 10.1109/PESGM.2018.8586199.).....	55
Εικόνα 65: Τυπική κυματομορφή ρεύματος SMPS.....	56
Εικόνα 66: Κύκλωμα SMPS E.P σε Σ.Ρ. Παρουσιάζονται τα 5 βασικά μέρη και η μεταβολή της κυματομορφής σε κάθε στάδιο. Στο τελικό διακρίνεται ο πυκνωτής τροφοδοσίας του φορτίου. (ΠΗΓΗ: http://electronicsbeliever.com).....	56
Εικόνα 67: Τυπικό κύκλωμα οδηγού ηλεκτροκινητήρα 6 παλμών. (ΠΗΓΗ: www.nidec.com).....	57
Εικόνα 68: Επιπέδωση κορυφής της τάσης από οδηγούς ηλεκτροκινητήρων. Η περιοχή με πράσινη διαγράμμιση αποτελεί τη παραμόρφωση.(ΠΗΓΗ: www.nidec.com).....	57
Εικόνα 69: Κυματομορφή ρεύματος PWM 6 παλμών σε μικρό φορτίο.	58
Εικόνα 70: Τυπική κυματομορφή και φασματική ανάλυση ρεύματος λάμπας φθορίου.	58
Εικόνα 71: Μοντελοποίηση μη γραμμικών φορτίων ως πηγές ρευμάτων. (ΠΗΓΗ: IEEE 519-1992)	59
Εικόνα 72: Παθητικό φίλτρων αρμονικών σειράς.....	59
Εικόνα 73: Τυπική διάταξη παράλληλου παθητικού φίλτρου αρμονικών. Το φίλτρο απορροφά το αρμονικό ρεύμα εμποδίζοντας το να φτάσει στον υπόλοιπο εξοπλισμό.	60
Εικόνα 74: Ιδανική απόκριση συχνότητας.	60
Εικόνα 75: Διαγράμματα Bode φίλτρου high-pass.(ΠΗΓΗ: https://www.electronics-tutorials.ws).....	61
Εικόνα 76: Τυπική απόκριση συχνότητας εμπίεσης σε φίλτρο 2 ^{ης} τάξης high pass 11 ^{ης} . αρμονικής (ΠΗΓΗ: https://www.pscad.com).....	61
Εικόνα 77: Διαγράμματα Bode φίλτρο low-pass. (ΠΗΓΗ: File:Butterworth Filter Orders.svg - https://en.wikipedia.org).....	62
Εικόνα 78: Διαγράμματα Bode φίλτρου band pass. (ΠΗΓΗ: https://www.electronics-tutorials.ws).....	62
Εικόνα 79: Φίλτρο διπλού συντονισμού και απόκριση συχνότητας εμπίεσης.(ΠΗΓΗ: https://www.pscad.com).....	63
Εικόνα 80: Διάγραμμα Bode φίλτρου Band Stop.	63
Εικόνα 81:α)Μονού συντονισμού β) Διπλού συντονισμού	64
Εικόνα 82: Διατάξεις παθητικών φίλτρων απόσβεσης(damped filters). α)1ης τάξης, b)2ης τάξης, c)3ης τάξης, d) C-type (Πηγή harmonic filters power quality power electronics Halpin, S. Mark).....	64
Εικόνα 83: Εμπεδήσεις διαφορετικών τύπων συναρτήσει της συχνότητας. α)Συνδιασμός δύο φίλτρων μονού συντονισμού, b)C-type, c)2ης τάξης. (ΠΗΓΗ: Power Quality – Harmonics in Power Systems HARDY B.).....	64
Εικόνα 84: Διάγραμμα bode φίλτρου 5 ^{ης} ,7 ^{ης} και συνδυασμό των δύο για διάφορα τιμές του συντελεστή ποιότητας. (ΠΗΓΗ: Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor).....	67
Εικόνα 85: Σχεδιάγραμμα συστήματος ενεργού φίλτρου σειράς-φορτίου-πηγής.....	68
Εικόνα 86: Διάγραμμα συστήματος ενεργού παράλληλου φίλτρου- φορτίου- πηγής. (ΠΗΓΗ: DESIGN PARAMETERS OF SHUNT ACTIVE FILTER FOR HARMONICS CURRENT MITIGATION.....	68
Εικόνα 87: Υπέρθεση ρευμάτων πηγής και φίλτρου. Το ρεύμα που φτάνει στο δίκτυο είναι διορθωμένο.....	68
Εικόνα 88: Διάγραμμα διαδικασίας παραγωγής πλίνθων.	72
Εικόνα 89: Πρέσα πλίνθων σε γραμμή παραγωγής. (ΠΗΓΗ: https://aimixconcreteblockmachine.com/press-brick-machine/).....	72
Εικόνα 90: Φούρνος τύπου τούνελ. (ΠΗΓΗ: https://www.ngk-insulators.com/en/product/hd-tunnel-kiln.html).....	73
Εικόνα 91: Σύνδεση μετρητικού οργάνου στον πίνακα φούρνου τούβλου.....	74
Εικόνα 92: Γενική εικόνα αρμονικών και συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης στον φούρνο τούβλου.....	74
Εικόνα 93: Φάσμα αρμονικών τάσης κάθε φάσης.....	75
Εικόνα 94: Κυματομορφές τάσεων φάσεων σε τυχαία χρονική στιγμή.....	76
Εικόνα 95: Fast Fourier Transform τάσεων της στιγμιαίας κυματομορφής.....	77
Εικόνα 96: Ανάλυση Fourier αρμονικών ρευμάτων σε κάθε φάση και στον ουδέτερο.....	78
Εικόνα 97: Κυματομορφές ρευμάτων φάσεων και ουδετέρου (πορτοκαλί) σε τυχαία χρονική στιγμή.....	78
Εικόνα 98: Fast Fourier Transform εντάσεων τυχαίας χρονικής στιγμής.....	79
Εικόνα 99: Συνδεσμολογία μετρητικού οργάνου στις 3 φάσεις του drive.....	81
Εικόνα 100: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων κινητήρα πρέσας.....	81
Εικόνα 101: Εύρος και ένταση αρμονικών τάσης σε ποσοστό της θεμελιώδους για κάθε φάση.....	82
Εικόνα 102: Κυματομορφή τάσεων φάσεων drive κινητήρα σε τυχαία χρονική στιγμή.....	83
Εικόνα 103: Στιγμιαία φασματική ανάλυση FFT τάσεων.....	84

Εικόνα 104: Φάσμα αρμονικών ρεύματος των τριών φάσεων και ουδετέρου.	85
Εικόνα 105: Στιγμαία κυματομορφή ρευμάτων φάσεων και ουδετέρου.	86
Εικόνα 106: Στιγμαία φασματική ανάλυση FFT ρευμάτων.	86
Εικόνα 107: Κατανάλωση άεργης ισχύος φορτίου φούρνου.	88
Εικόνα 108: Τιμές συνημίτονου θεμελιώδους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.	94
Εικόνα 109: Τριφασική πηγή θεμελιώδους ρεύματος και φορτίο σε σύνδεση δέλτα.	96
Εικόνα 110: Εισαγωγική αρμονικών ρευμάτων παράλληλα στα θεμελιώδη.	96
Εικόνα 111: Παραμορφωμένες κυματομορφές τάσης και έντασης μιας φάσης χωρίς φίλτρο.....	97
Εικόνα 112: Κύκλωμα φορτίου-πηγής-φίλτρου.	98
Εικόνα 113: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης φάσης με την εισαγωγή του φίλτρου.....	98

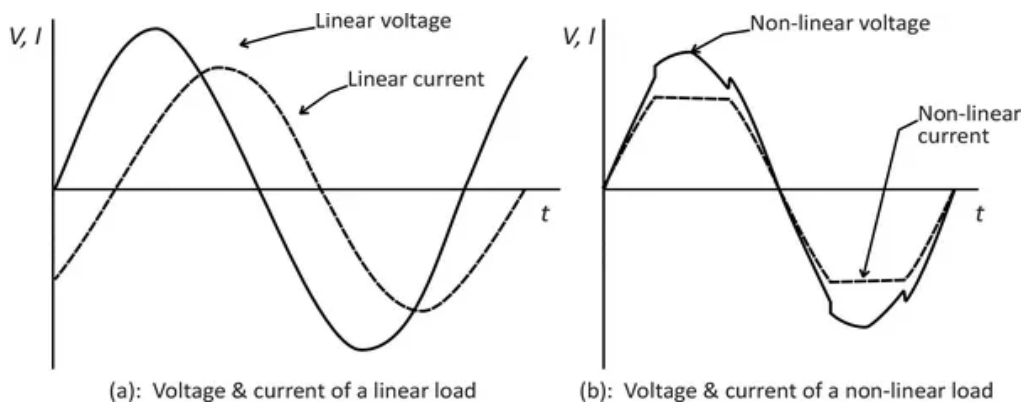
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περί εναλλασσόμενου ρεύματος

Τα συστήματα Ε.Ρ. πάσχουν από προβλήματα ποιότητας ισχύος. Τα αίτια αποτελούν οι αντιδράσεις των γραμμικών φορτίων και τα μη γραμμικά φορτία. Συγκεκριμένα, εκτός από την πραγματική (ωμική) αντίσταση, ορισμένα φορτία παρουσιάζουν χωρητική ή επαγωγική συμπεριφορά η οποία αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα απόκρισης το ρεύμα του φορτίου είναι μη συμφασικό με την ημιτονοειδή τάση εισόδου και οδηγεί στην ύπαρξη άεργων ρευμάτων. Αν το φορτίο είναι μη γραμμικό, το κύκλωμα μολύνεται με αρμονικές συχνότητες ρευμάτων που παραμορφώνουν την ημιτονοειδή κυματομορφή του ρεύματος και κατ' επέκταση και της τάσης. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω φορτίων, δυσχεραίνουν το δίκτυο καταναλώνοντας άεργο ισχύ και προκαλώντας βλάβες.



Εικόνα 1: Γραφική απεικόνιση τάσης-έντασης γραμμικών φορτίων με διαφορετική εμπέδηση. (ΠΗΓΗ: www.electrical4u.net)

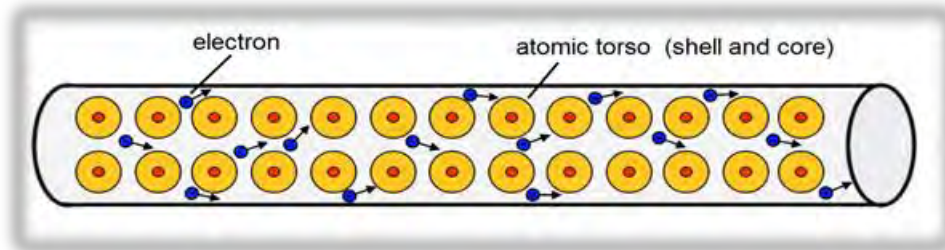


Εικόνα 2: Γραφικές απεικόνιση τάσης-έντασης (α) γραμμικού και (β) μη γραμμικού φορτίου

Η πρώτη επίπτωση είναι αύξηση των θερμικών απωλειών. Τα άεργα ρεύματα «μολύνουν» το κύκλωμα αυξάνοντας την ενεργό τιμή της έντασης. Η ύπαρξη υψηλών αρμονικών εντείνει τις απώλειες επαγωγής και αυτεπαγωγής όπως το επιδερμικό φαινόμενο, τα φαινόμενα γειτνίασης αγωγών και την απώλεια σιδήρου σε μετασχηματιστές και επαγωγικούς κινητήρες (μαγνητική υστέρηση, δινορεύματα). Ως αποτέλεσμα, ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί κάτω από υψηλότερες θερμοκρασίες που θα μείωναν το προσδόκιμο ζωής και αφετέρου η κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο είναι μεγαλύτερη. Αυτό οδηγεί σε αυξημένα κόστη

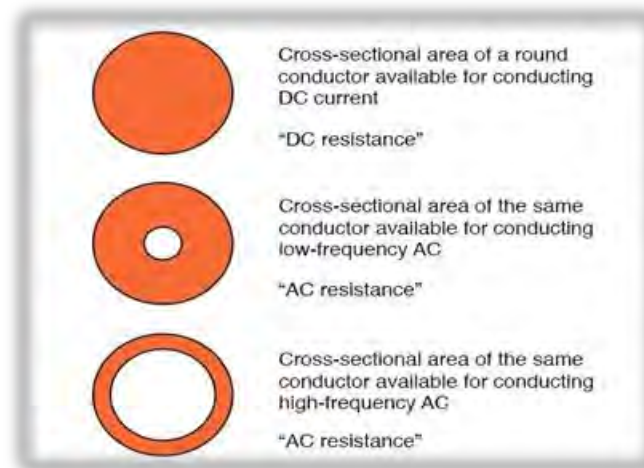
τόσο για το σχεδιασμό και τη συντήρηση όσο και για την κατανάλωση. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα προαναφερθέντα φαινόμενα:

- **Ωμική αντίσταση:** Είναι αντίσταση που προβάλλεται στο ηλεκτρικό φορτίο να κινηθεί μέσω του αγωγού. Η θερμότητα παράγεται σε μικροσκοπική κλίμακα από τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του υλικού του αγωγίσιμου μέσου. Οι ωμικές αντιστάσεις ευθύνονται κατά μέσο όρο για το 2% των συνολικών απωλειών της απαιτούμενης ισχύος.



Εικόνα 3: Ηλεκτρική αντίσταση σε αγωγό. Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού. (ΠΗΓΗ: denkwerkstatt-physik.de)

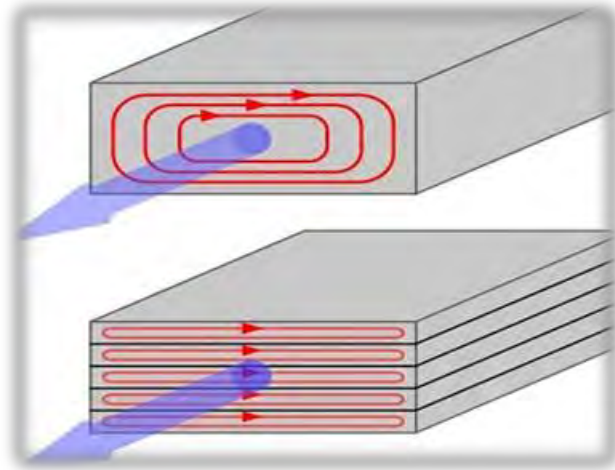
- **Επιδερμικό φαινόμενο:** Η αντίσταση του ΕΡ μέσω ενός αγωγού αυξάνεται με την αύξηση συχνότητας. Ο λόγος είναι η δημιουργία αντι-ΗΕΔ, μέσω αυτεπαγωγής που παράγεται κατά την εναλλαγή του μαγνητικού πεδίου και είναι ισχυρότερη στο κέντρο της διατομής. Ως αποτέλεσμα, το φορτίο του ρεύματος τείνει να συγκεντρώνεται κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή, είναι αυξημένη στην επιφάνεια και μειώνεται εκθετικά προς το κέντρο. Έτσι το ρεύμα «ρέει» κοντά στην επιφάνεια σε ένα μικρό ποσοστό της συνολικής διατομής. Το αποτέλεσμα είναι αυξημένη αντίσταση, μεγαλύτερη από αυτήν που θα υπήρχε εάν το ρεύμα ήταν συνεχόμενο. Οι απώλειες αποτελούν περίπου το 2% με 8% της απαιτούμενης ισχύος.



Εικόνα 4: Γραφική απεικόνιση επιδερμικού φαινομένου με αύξηση της συχνότητας. (ΠΗΓΗ: www.allaboutcircuits.com)

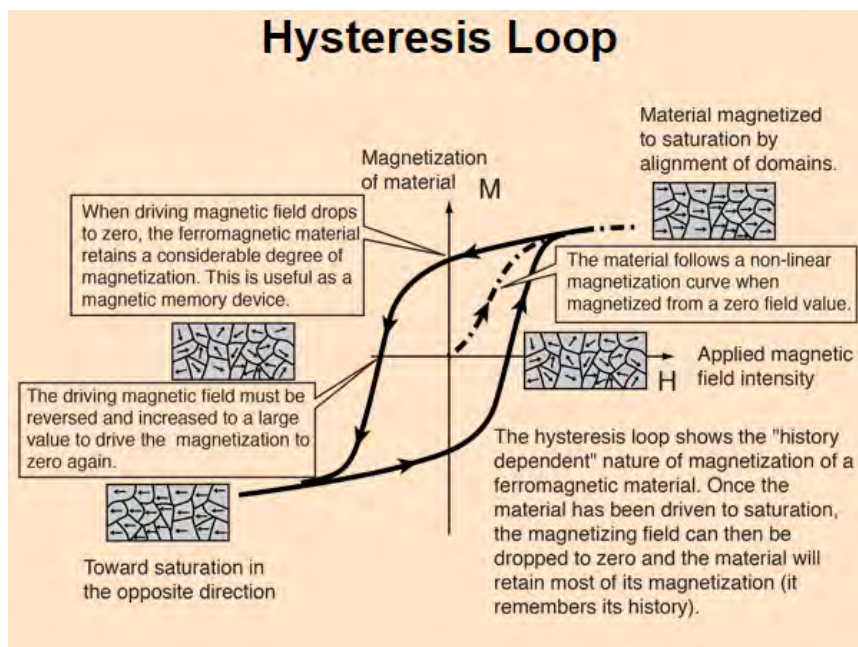
- **Φαινόμενο γειννίασης:** Πρόκειται για την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων αγωγών που είναι τοποθετημένοι κοντά μεταξύ τους. Εντείνουν το επιδερμικό φαινόμενο. Οι απώλειες μπορούν να φτάσουν έως και 10% της ισχύος.
- **Δινορεύματα:** Πρόκειται για βρόγχους ηλεκτρικού ρεύματος που επάγονται μέσα σε αγωγούς από τα μαγνητικά πεδία και συναντώνται σε συσκευές όπως οι μετασχηματιστές

(απώλειες σιδήρου) ή ακόμα και καλώδια τροφοδοσίας τοποθετημένα επάνω σε μεταλλικές επιφάνειες. Ποσοστό απωλειών: 1,5% με 4%



Εικόνα 5: Απεικόνιση μείωσης δινορευμάτων με χρήση ελασμάτων. (ΠΗΓΗ: pediaa.com)

- **Μαγνητική υστέρηση:** Πρόκειται για την υστέρηση της μαγνήτισης του υλικού σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά δίπολα του μαγνητικού υλικού προσπαθώντας να ακολουθήσουν το μαγνητικό πεδίο δημιουργούν τριβές που παράγουν θερμότητα. Εμφανίζονται σε μετασχηματιστές, κινητήρες Ε.Ρ. κ.α. Αποτελούν περίπου το 1%-2% των απωλειών.



Εικόνα 6: Μαγνητική υστέρηση. (ΠΗΓΗ: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Η άεργη ισχύς αποτελεί και παράγοντα που επηρεάζει την τάση. Όσο η συνολική ένταση του ρεύματος αυξάνεται λόγω των άεργων ρευμάτων, τόσο η τάση θα μειώνεται για την ίδια παροχή ισχύος. Αν το ρεύμα αυξηθεί πάνω από ένα όριο τότε το δίκτυο οδηγείται σε ολική διακοπή τροφοδοσίας (blackout). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι διακοπές ρεύματος στις 14 Ιουλίου του 2003 στις βορειοανατολικές Η.Π.Α. και στις 2 Ιουλίου και 10 Αυγούστου του 1996 στις δυτικές Η.Π.Α που επηρέασαν εκατομμύρια πολίτες. Ανάμεσα στα αίτια, ήταν η ανεπάρκεια της τροφοδότησης της απαιτούμενης άεργης ισχύος

που ήταν αυξημένη λόγω του καλοκαιριού, από την εκτεταμένη χρήση κλιματιστικών μονάδων (χρήση ηλεκτροκινητήρων)[13]. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι το 43% με 46% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται σε συστήματα ηλεκτροκινητήρων που ανέρχεται σε 7100 TW τον χρόνο.[13] Συνεπώς, η συνολική άεργη ισχύς όλων των καταναλωτών είναι σημαντική και επιβαρύνει εκτός από τους καταναλωτές και τον ίδιο πάροχο, ο οποίος καλείται να τη παράγει και να την μεταφέρει πράγμα το οποίο συνεπάγεται αυξημένο κόστος για το δίκτυο διανομής λόγω απώλειών (σιδήρου και χαλκού), μείωση της πραγματικής ισχύς που θα μπορούσαν να παρέχουν οι γεννήτριες στους υπόλοιπους καταναλωτές, και επιπλέον, αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η μόλυνση του περιβάλλοντος (π.χ. καύση λιγνίτη ή πετρελαίου).

Τα αρμονικά ρεύματα προκαλούν αρμονικές τάσεις. Η παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κυματομορφής ελλοχεύει σοβαρούς κινδύνους για τον εξοπλισμό που είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με ημιτονοειδή τάση εισόδου ειδικά όταν είναι ευαίσθητος σε μεταβολές και ανθρώπινες ζωές εξαρτώνται από τη προβλεπόμενη λειτουργία του (ιατρικά εργαλεία, τηλεπικοινωνίες αεροδρομίων κτλ.) Όσο περισσότερα μη-γραμμικά φορτία είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επίδραση των αρμονικών. Χαρακτηριστικές επιπτώσεις είναι:

- Υπερθέρμανση, μειωμένη ροπή εξόδου και δονήσεις σε ηλεκτροκινητήρες.
- Υπερφόρτωση ουδετέρου
- Βλάβες σε κυκλώματα υπολογιστών
- Δυσλειτουργία συστημάτων ελέγχου
- Πτώση ή και έκρηξη ασφαλειών

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα φορτίων:

➤ **Χωρητικά φορτία:** πυκνωτές, υπόγεια καλώδια, τρανζίστορ MOSFET, ραδιοφωνικά κυκλώματα

➤ **Επαγωγικά φορτία:** πηνία, ηλεκτρομαγνήτες, επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες, μετασχηματιστές τάσης, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες

➤ **Μη γραμμικά φορτία:** ανορθωτές ρεύματος, αντιστροφείς ρεύματος, λάμπες φθορίου, υπολογιστές, εκτυπωτές, συστήματα ελέγχου στροφών ηλεκτροκινητήρων (VFD), συστήματα ομαλής εκκίνησης ηλεκτροκινητήρων (MSS), συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας ισχύος (UPS), προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC), εργαλεία ηλεκτροσυγκολλήσεων τόξου, φούρνοι ηλεκτρικού τόξου, επαγωγικοί φούρνοι.



Εικόνα 7: Οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες σε βιομηχανία. Το πιο συνηθισμένο είδος εξοπλισμού. (ΠΗΓΗ: EcoAmbassador Academy)

1.2 Συντελεστής ισχύος και εξοικονόμηση ενέργειας.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την ανθρωπότητα, τόσο από οικονομικής όσο και από περιβαλλοντικής σκοπιάς. Μεταξύ άλλων, η ηλεκτρική ενέργεια είναι από τις πιο διαδεδομένες μορφές ενέργειας. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, η μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές είναι ραγδαία καθώς η βλάβη που έχει υποστεί ο πλανήτης μας είναι μεγάλη. Επιπλέον τα ορυκτά καύσιμα έχουν πεπερασμένο απόθεμα. Οι οικονομικές επιπτώσεις αφορούν όλους άμεσα και εξαρτώνται από την κατανάλωση και από τον τρόπο παραγωγής (καύσιμο, ανανεώσιμη πηγή κ.τ.λ.). Έτσι, οι καταναλωτές καλούνται να την εξοικονομούν όχι μόνο για την ελάφρυνση των λογαριασμών τους αλλά και για την συνολική προστασία του οικοσυστήματος.

Η απόδοση ενός συστήματος υπολογίζεται από τον πραγματικό συντελεστή ισχύος (True Power Factor-TPF). Πρόκειται για αδιάστατο αριθμό με εύρος τιμών {0,1} και υποδεικνύει την ποιότητα της ισχύος που καταναλώνεται. Για τις ακραίες περιπτώσεις, όλη η ισχύς είναι πραγματική και αποδίδει έργο ή όλη η ισχύς είναι άεργη και δεν παράγεται πραγματικό έργο. Συνεπώς, όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τόσο μεγαλύτερη θα είναι η σπατάλη ενέργειας. Ο TPF είναι συνάρτηση δύο συντελεστών αντίστοιχα:

- 1) **Συντελεστής ισχύος θεμελιώδους (Displacement Power Factor, PF_D)**: αφορά την *θεμελιώδη συχνότητα* και εξαρτάται από την διαφορά φάσης τάσης-έντασης. Υποδεικνύει την ύπαρξη άεργων ρευμάτων και αποτελεί το κριτήριο ενδεχόμενων προστίμων για τους παρόχους.
- 2) **Συντελεστής ισχύος παραμόρφωσης (Distortion Power Factor, PF_H)**: Είναι ένδειξη επιρροής των αρμονικών και εξαρτάται από την συνολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD). Εκφράζει την ύπαρξη υψηλότερων συχνοτήτων πέραν της θεμελιώδους (αρμονικές).

Οι εργοστασιακές μονάδες είναι οι καταναλωτές με το μεγαλύτερο πρόβλημα ποιότητας ισχύος. Οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες είναι το κυριότερο μέρος του εξοπλισμού και η χρήση τους στις βιομηχανίες γενικότερα αποτελεί το 64% όλων των εφαρμογών τους παγκοσμίως. [1.3]. Προσδίδουν ισχύ σε διάφορα εξαρτήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες, πρέσες, κοπτικά εργαλεία, ιμάντες μεταφοράς κ.α. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας γίνεται εκτεταμένη χρήση υπολογιστών και συστημάτων ελέγχου και συνεπώς μπορούμε εύκολα να συνειδητοποιήσουμε πως τα εργοστάσια «πάσχουν» από χαμηλό συντελεστή. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνήθεις συντελεστές ισχύος των βιομηχανιών

Βιομηχανία	Συντελεστής ισχύος
Κλωστοϋφαντουργία	0.65-0.75
Χημικών	0.65-0.75
Εργαλεία CNC	0.4-0.65
Συγκολλήσεις τόξου	0.35-0.6
Φούρνοι τόξου	0.7-0.9
Επαγωγικοί φούρνοι	0.15-0.4
Τσιμεντοποιία	0.78-0.8
Ζυθοποιία	0.75-0.8
Χυτήριο	0.5-0.8
Λατομείο	0.5-0.7

Πίνακας 1: Συνήθεις συντελεστές ισχύος στη βιομηχανία [ΠΗΓΗ: Electrotek Concepts, Inc, Industrial Power Factor Analysis Guidebook]]

Οι βιομηχανίες είναι καταναλωτές μέσης τάσης και μεγάλης ισχύος (τριφασική παροχή) και πραγματοποιείται μέτρηση τόσο της πραγματικής ισχύος (kWh) όσο και της άεργης (kVAh). Προβλέπονται, από ορισμένους παρόχους, πρόστιμα για χαμηλές τιμές του συντελεστή θεμελιώδους (PF_D) λόγω επιβάρυνσης τους. Συνήθως, απαιτείται να είναι πάνω από κάποιο κατώτατο όριο όπως 0.9 ενώ ορισμένοι πάροχοι απαιτούν 0.95.

Το μακροχρόνιο κέρδος από την αύξηση της απόδοσης είναι σημαντικό. Η εξάλειψη των αρμονικών και άεργων ρευμάτων βελτιώνει το προσδόκιμο ζωής του εξοπλισμού, μειώνει τα κόστη συντήρησης αλλά και τα κόστη κατανάλωσης και πιθανών προστίμων. Στους πίνακες 2 έως 4, παρουσιάζονται αποτελέσματα εξοικονόμησης σε βιομηχανίες έπειτα από αποτελεσματική παρέμβαση:

ΕΛ.ΠΕ Θεσσαλονίκης	
Συνολική Ισχύς Μονάδας [MW]	32,6
Συχνότητα τροφοδοσίας [Hz]	50
Αρχικό ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [€]	8.572.000
Εκτιμώμενη εξοικονόμηση	-6,8%
Τελική εξοικονόμηση	-9,8%
Εκτιμώμενη απόσβεση χρημάτων [έτη]	2
Πραγματική απόσβεση χρημάτων [έτη]	1,39
Ετήσια εξοικονόμηση [€]	840.061,39
Τελικό ετήσιο κόστος [€]	7.731.939

Πίνακας 2: Αποτελέσματα εξοικονόμησης στα Ελληνικά Πετρέλαια της βιομηχανικής μονάδας Θεσσαλονίκης. (ΠΗΓΗ: <https://www.seman.gr>.)

Καπνοβιομηχανία Παπαστράτος	
Συνολική Ισχύς Μονάδας [MW]	6
Συχνότητα τροφοδοσίας [Hz]	50
Αρχικό ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [€]	1.855.000
Εκτιμώμενη εξοικονόμηση	-5,86%
Τελική εξοικονόμηση	-10,34
Εκτιμώμενη απόσβεση χρημάτων [έτη]	2
Πραγματική απόσβεση χρημάτων [έτη]	1,32
Ετήσια εξοικονόμηση [€]	191.718,10
Τελικό ετήσιο κόστος [€]	1.663.281,9

Πίνακας 3: Αποτελέσματα εξοικονόμησης στη καπνοβιομηχανία Παπαστράτος στην Αττική. (ΠΗΓΗ: <https://www.seman.gr>.)

Τσιμενοποιία TITAN-ADOCIM	
Συνολική Ισχύς Μονάδας [MW]	30
Συχνότητα τροφοδοσίας [Hz]	50
Αρχικό ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [€]	10.282.172
Εκτιμώμενη εξοικονόμηση	-5,8%
Τελική εξοικονόμηση	-6,1%
Εκτιμώμενη απόσβεση χρημάτων [έτη]	1,22
Πραγματική απόσβεση χρημάτων [έτη]	1,14
Ετήσια εξοικονόμηση [€]	627.212,5
Τελικό ετήσιο κόστος [€]	9.654.959,5

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εξοικονόμησης στην τσιμενοποιία TITAN-ADOCIM στην Τοκάτη. (ΠΗΓΗ: <https://www.seman.gr>.)

Συμπερασματικά, μπορεί τα τελικά ποσοστά εξοικονόμησης να μοιάζουν φαινομενικά μικρά, όμως ισοδυναμούν με χιλιάδες ευρώ, έως εκατομμύρια. Ακόμα και μια μικρή βελτιστοποίηση έχει μεγάλο αντίκτυπο. Είναι, λοιπόν, φανερό πόση επιρροή έχει η άεργη ισχύς στα κόστη. Ως εκ τούτου η βελτιστοποίηση του συντελεστή είναι κρίσιμη για κάθε εργοστασιακή μονάδα.

1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας.

Το υπόλοιπο αυτής της εργασίας χωρίζεται σε 3 ενότητες από το κεφάλαιο 2 έως το 4.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική παρουσίαση με βιβλιογραφική ανασκόπηση των άεργων και αρμονικών ρευμάτων, οι πηγές που τα προκαλούν και διαδικασίες και τεχνικές που ακολουθούνται για απόσβεση αυτών.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις και μελέτη σε βιομηχανία κεραμοποιίας πάνω σε δύο σημαντικά ηλεκτρικά φορτία του εργοστασίου: τον φούρνο τούβλων και οδηγό ηλεκτροκινητήρα πρέσας. Η ανάλυση ξεκινάει με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των άεργων και αρμονικών ρευμάτων και στη συνέχεια ακολουθεί επιλογή των φίλτρων και των παραμέτρων τους καθώς και τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά.

Τέλος, στο κεφάλαιο 4 διατυπώνονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 Εμπέδηση

Εμπέδηση ονομάζεται η σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει ένα γραμμικό ηλεκτρικό φορτίο στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Ένα γραμμικό φορτίο μπορεί να αποτελείται τόσο από αντιστάτες όσο και από πηνία και πυκνωτές. Σε αντίθεση με έναν αντιστάτη, σε έναν ιδανικό πυκνωτή και ένα ιδανικό πηνίο η ημιτονοειδής ένταση του ρεύματος δεν ταυτίζεται χρονικά με την ημιτονοειδή τάση και η μέγιστη τιμή της επηρεάζεται από τη συχνότητα. Συγκεκριμένα στον πυκνωτή το ρεύμα προηγείται της τάσης (leading) και στο πηνίο ακολουθεί (lagging). Η σύνθετη αντίσταση αποτελείται από δύο συνιστώσες: την πραγματική και τη φανταστική (αντίδραση).

Για τον πυκνωτή και το πηνίο ισχύουν αντίστοιχα :

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.1)$$

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Αν και ο ιδανικός πυκνωτής και το ιδανικό πηνίο δεν έχουν πραγματική ωμική αντίσταση, η ένταση του ρεύματος επηρεάζεται όπως σε έναν αντιστάτη. Αυτό ονομάζεται αντίδραση (reactance) και αποτελεί τη φανταστική συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης:

$$X = \frac{v}{i} \quad (2.3)$$

Η αντίδραση είναι ανάλογη της αντίστασης του νόμου του Ohm, και έχει ως μονάδα μέτρησης, επίσης, τα Ohm. [1][2]

Ξεκινάμε την ανάλυση στον πυκνωτή, πηνίο και αντιστάτη εφαρμόζοντας εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση:

$$v(t) = \sin(2\pi ft) \quad (2.4)$$

2.1.1 Χωρητική αντίδραση

Αναλύοντας αρχικά τον πυκνωτή αντικαθιστώντας την εξίσωση (4) στην εξίσωση (1):

$$i = 2\pi f C \cos(2\pi ft) \quad (2.5)$$

Έχοντας βρει την ένταση αντικαθιστούμε την εξίσωση (5) στην (3) και παίρνουμε την αντίδραση στο πεδίο του χρόνου:

$$X_c = \frac{\sin(2\pi ft)}{2\pi f C \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (2.6)$$

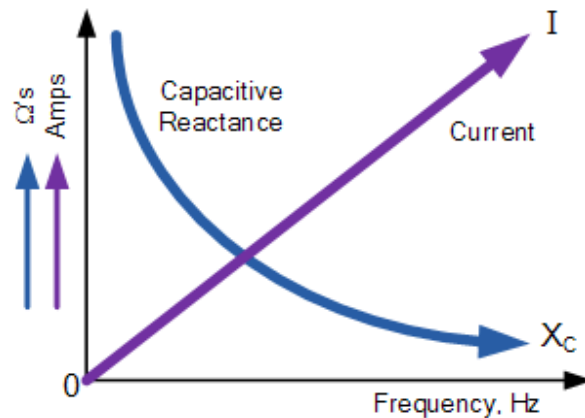
Μετατρέποντας στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Laplace:

$$X_c = -j \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.7)$$

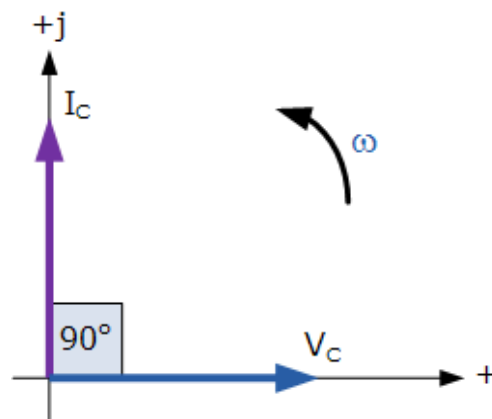
Σε πολική μορφή:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \angle -90^\circ \quad (2.8)$$

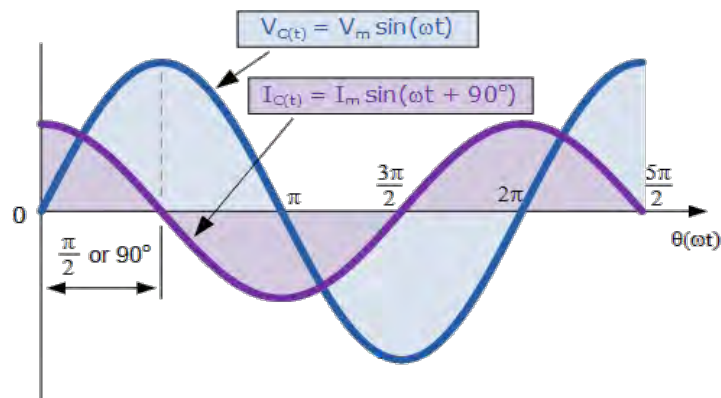
Η αντίδραση του πυκνωτή, όπως φαίνεται από το αποτέλεσμα, αυξάνεται με την μείωση της συχνότητας και τη μείωση της χωρητικότητας. Για μηδενισμό της συχνότητας (συνεχές ρεύμα) ο πυκνωτής δρα ως ανοιχτό κύκλωμα ενώ για απειρισμό της συχνότητας ή χωρητικότητας ο πυκνωτής λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα (μηδενική αντίδραση). Τέλος, στον πυκνωτή το ρεύμα προπορεύεται της τάσης κατά 90 μοίρες όπως φαίνεται και από την εξίσωση (5). [1][2]



Εικόνα 8: Γραφική παράσταση συσχέτισης χωρητικής αντίδρασης και έντασης για πυκνωτή. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)



Εικόνα 9: Διανύσματα έντασης και τάσης στο πεδίο της συχνότητας για πυκνωτή. Το ρεύμα προπορεύεται κατά 90 μοίρες. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)



Εικόνα 10: Κυματομορφές τάσης-έντασης στο πεδίο του χρόνου σε πυκνωτή. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)

2.1.2 Επαγωγική αντίδραση

Για το πηνίο, ξεκινώντας με την αντικατάσταση της εξίσωσης (4) στην εξίσωση (2):

$$\sin 2\pi ft = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (8) υπολογίζουμε την ένταση:

$$\frac{\cos(2\pi ft)}{-2f\pi} = Li(t) \Rightarrow$$

$$i(t) = \frac{\sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right)}{2\pi fL} \quad (2.10)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (9) στην εξίσωση (3) υπολογίζουμε την αντίδραση στο πεδίο του χρόνου:

$$X_L = 2\pi fL \frac{\sin(2\pi ft)}{\sin(2\pi f t - \frac{\pi}{2})} \quad (2.11)$$

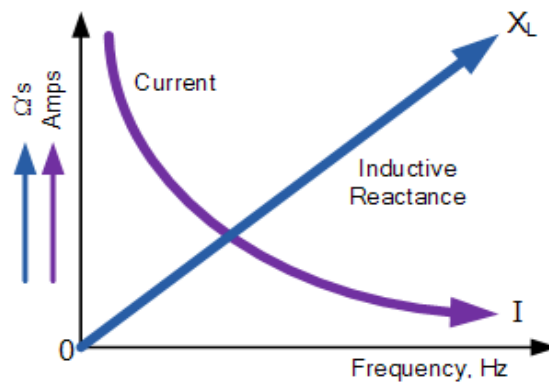
Μετατρέποντας στο πεδίο της συχνότητας, προκύπτει:

$$X_L = j2\pi fL \quad (2.12)$$

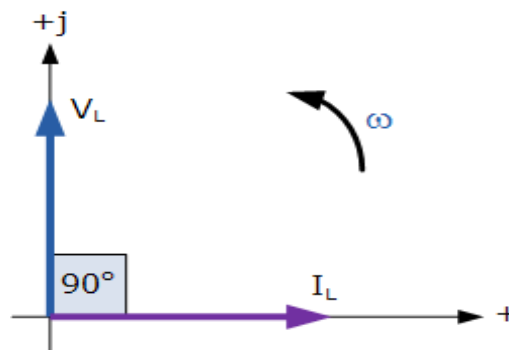
σε πολική μορφή:

$$X_L = 2\pi fL \angle +90^\circ \quad (2.13)$$

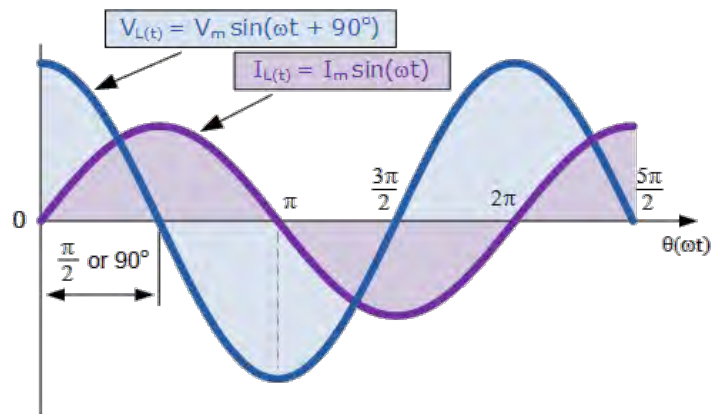
Η αντίδραση του πηνίου αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και του συντελεστή αυτεπαγωγής του. Για πάρα πολύ μεγάλες συχνότητες ή αυτεπαγωγή, το πηνίο δρα ως ανοικτό κύκλωμα ενώ για μικρές συχνότητες, με ακραία περίπτωση το συνεχές ρεύμα, η αντίδραση τείνει στο μηδέν. [1][2]



Εικόνα 11: Γραφική συσχέτιση επαγωγικής αντίδρασης-έντασης για πηνίο. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)



Εικόνα 12: Διανύσματα τάσης-έντασης στο πεδίο της συχνότητας για πηνίο. Η τάση προπορεύεται της έντασης κατά 90 μοίρες. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)



Εικόνα 13: Κυματομορφές τάσης-έντασης σε πηνίο στο πεδίο του χρόνου. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)

2.1.3 Πραγματική αντίσταση

Σε έναν αντιστάτη με αντίσταση R , ισχύει:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.14)$$

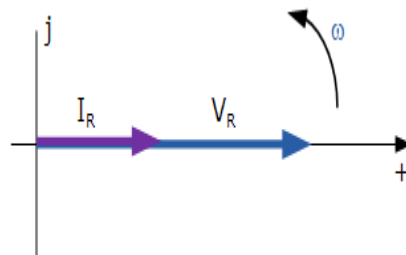
Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.4 στην εξίσωση 2.13:

$$i(t) = \frac{V_{peak}}{R} \sin \omega t \quad (2.15)$$

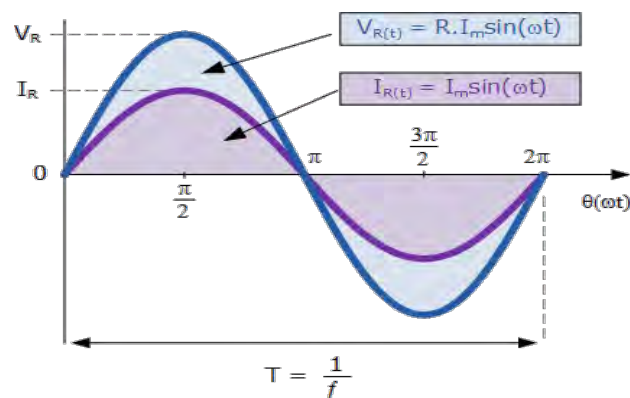
Σε πολική μορφή:

$$R = \frac{V}{I} \angle 0 \quad (2.16)$$

Σε ένα στοιχείο μόνο με πραγματική αντίσταση, το ρεύμα και η τάση είναι συμφασικά, η ένταση αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης και υπάρχουν ωμικές απώλειες.



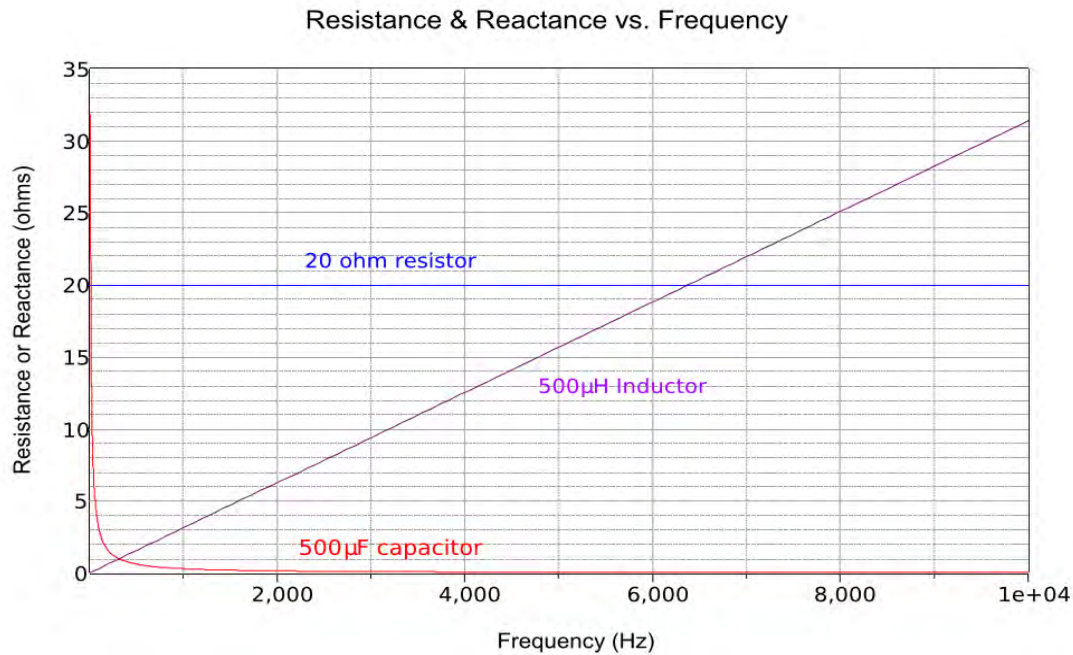
Εικόνα 14: Διανύσματα τάσης-έντασης για αντιστάτη στο πεδίο της συχνότητας. Μηδενική διαφορά φάσης, πλήρης ταύτιση.



Εικόνα 15: Κυματομορφές τάσης-έντασης στο πεδίο του χρόνου για αντιστάτη. Τα μεγέθη μεγιστοποιούνται και ελαχιστοποιούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)

2.1.4 Σύνθετη Αντίσταση

Στο Ε.Ρ., η ωμική αντίσταση μένει σταθερή ανεξαρτήτως συχνότητας, η επαγωγική αντίδραση είναι ανάλογη της συχνότητας και η χωρητική αντιστρόφως ανάλογη. Στην εικ.16 παρουσιάζονται για τυχαίες τιμές οι μεταβολές των αντιστάσεων και αντιδράσεων συναρτήσει της συχνότητας.



Εικόνα 16: Αναπαράστασή σχέσης συχνότητας με αντιδράσεις και αντίσταση για τυχαία μεγέθη. (ΠΗΓΗ: AC Electrical Circuit Analysis, A Practical Approach)

Η εμπέδηση είναι:

$$Z = R + jX \quad (2.17)$$

όπου

$$X = X_L - X_C$$

Όπως αναφέρθηκε, το φανταστικό μέρος αποτελεί τις αντιδράσεις και το πραγματικό τις ωμικές αντιστάσεις. Το μέτρο είναι:

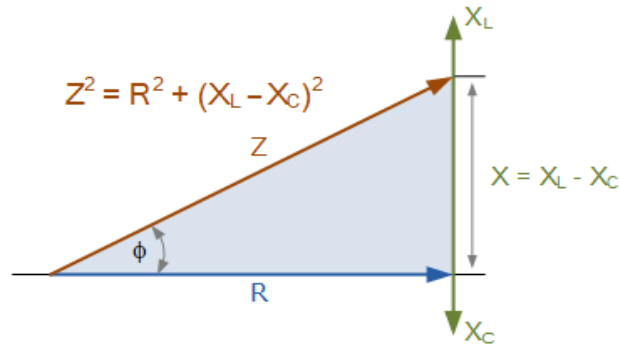
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.18)$$

Αν το κύκλωμα έχει μόνο επαγωγικά και χωρητικά φορτία τότε:

$$Z = j(X_L - X_C) \quad (2.19)$$

Ενώ αν έχει μόνο αντιστάτες τότε:

$$Z = R \quad (2.20)$$



Εικόνα 17: Μιγαδική γραφική απεικόνιση εμπέδησης και συνιστωσών αντιδράσεων και πραγματικής αντίστασης. (ΠΗΓΗ: www.electronics-tutorials.ws)

Για σύνδεση σε **σειρά** ισχύει [1][2]:

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots Z_n \quad (2.21)$$

Για **παράλληλη** σύνδεση [1][2]:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots \frac{1}{Z_n}} \quad (2.22)$$

Με μέτρο:

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_1^2} + \frac{1}{Z_2^2} + \frac{1}{Z_3^2} + \dots \frac{1}{Z_n^2}}} \quad (2.23)$$

Για την ειδική περίπτωση δύο στοιχείων είναι:

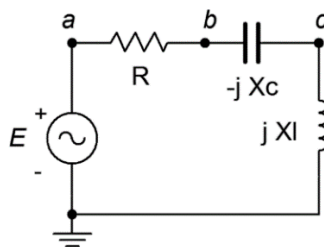
$$Z = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.24)$$

2.1.5 Συντονισμός

Συντονισμός είναι η κατάσταση όπου για συγκεκριμένη βέλτιστη συχνότητα το σύστημα RLC λειτουργεί με ελάχιστο ή μέγιστο περιορισμό αναλόγως τη συνδεσμολογία. Οι δυο μορφές είναι ο συντονισμός σε σειρά και σε παράλληλη σύνδεση. Στον συντονισμό σειράς, η εμπέδηση ελαχιστοποιείται στην συχνότητα συντονισμού, άρα μεγιστοποιείται η ένταση. Στον παράλληλο συντονισμό η εμπέδηση μεγιστοποιείται με αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση της τάσης. [1][2]

2.1.5.1 Συντονισμός σε σειρά

Έστω κύκλωμα RLC συνδεδεμένο σε σειρά:



Εικόνα 18: Κύκλωμα RLC σε σειρά.

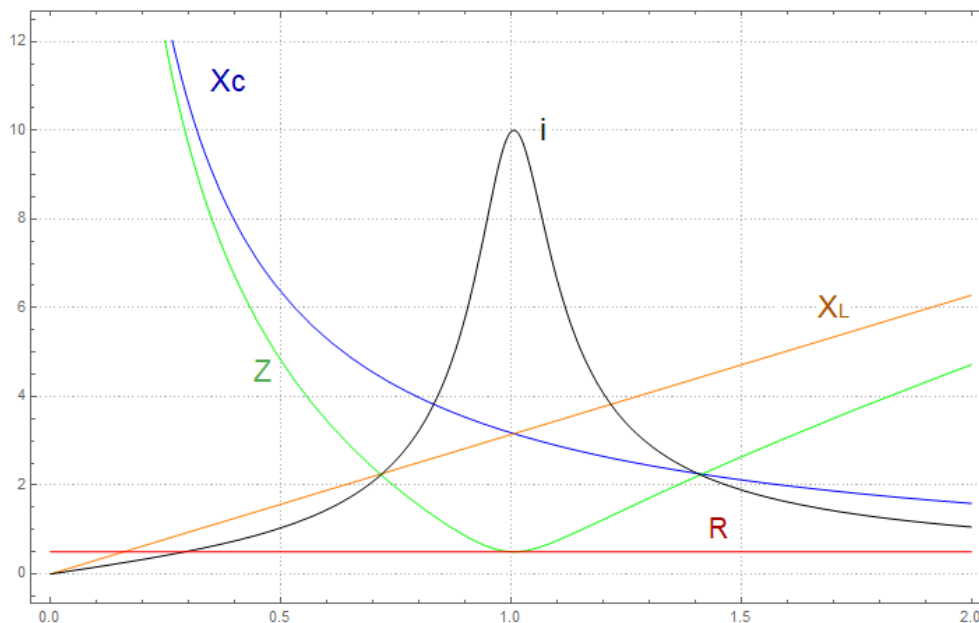
Η συνολική εμπέδηση υπολογίζεται από την εξίσωση (21) και είναι:

$Z = R + jX_L - jX_C \Rightarrow$	(2.25)
$Z = R + j 2\pi fL - j \frac{1}{2\pi fC}$	(2.26)

Όπως αναλύθηκε, συναρτήσει της συχνότητας, η ωμική αντίσταση είναι ανεξάρτητη, η επαγωγική αντίδραση αυξάνεται και η χωρητική μειώνεται. Έτσι, σε χαμηλές συχνότητες «κυριαρχεί» η χωρητική συμπεριφορά ενώ σε υψηλές η επαγωγική. Υπάρχει μια συγκεκριμένη συχνότητα στην οποία οι αντιδράσεις είναι ίσες και αλληλοαναιρούνται όπου εμπέδηση έχει ολικό ελάχιστο. Το πλάτος της έντασής του ρεύματος θα είναι:

$$i_{peak} = \left| \frac{V_{peak}}{Z} \right|$$

όπου το μέτρο της εμπέδησης δίνεται από την εξίσωση (18). Στην εικ.19 παρουσιάζονται τα γραφήματα του πλάτους της έντασης, του μέτρου της εμπέδησης και των συνιστωσών της στο πεδίο της συχνότητας για τυχαίες τιμές.[1][2]



Εικόνα 19: Διάγραμμα συντονισμού στο πεδίο της συχνότητας.

Αναλύοντας την εικ.19 βλέπουμε πως το σύστημα βρίσκεται σε συντονισμό για συχνότητα στη τιμή 1. Στο συγκεκριμένο σημείο, η εμπέδηση ελαχιστοποιείται και γίνεται ίση με την ωμική αντίσταση ενώ το πλάτος της έντασης μεγιστοποιείται. Εάν δεν υπήρχε αντιστάτης, θεωρητικά η ένταση θα έφτανε στο άπειρο, ωστόσο στη πραγματικότητα θα έφτανε ως μία πολύ μεγάλη πεπερασμένη τιμή λόγω ωμικών αντιστάσεων στους αγωγούς. [1][2]

Η συχνότητα συντονισμού υπολογίζεται εξισώνοντας της αντιδράσεις και λύνοντας ως προς αυτήν.

$$X_C = X_L \Rightarrow$$

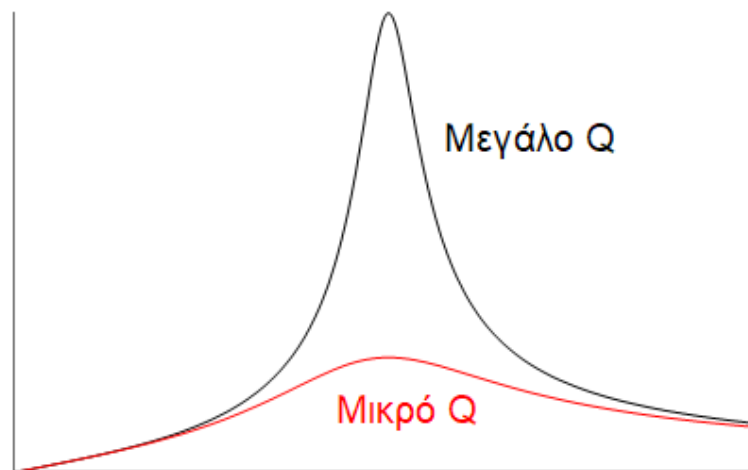
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow$$

$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	(2.27)
---------------------------------	--------

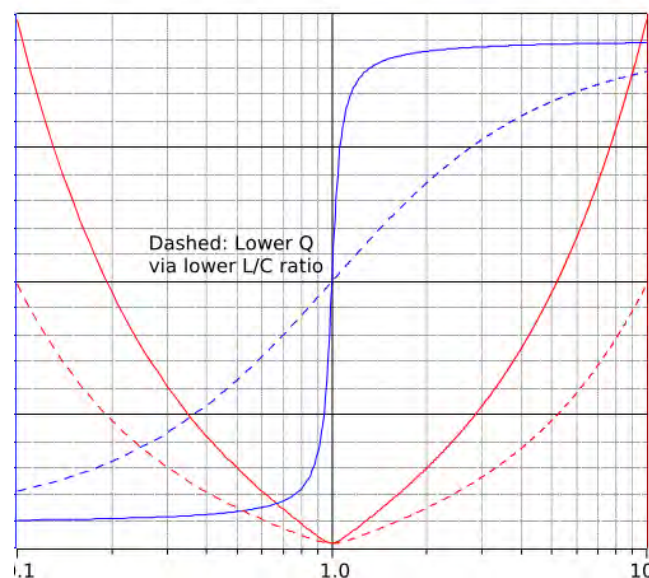
Αναλόγως με την αντίσταση (απόσβεση) της ταλάντωσης αλλάζει η απόκριση συχνότητας. Η αντίσταση καθορίζει τον παράγοντα ποιότητας. Ορίζουμε ως την συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται προς την ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο. Πιο πρακτικά είναι η συνολική αντίδραση προς την πραγματική αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.28)$$

Για μεγάλες τιμές του Q (μικρή απόσβεση) η απόκριση είναι «κοφτή» έχοντας απότομη αύξηση, ενώ για μικρό Q (μεγάλη απόσβεση) η καμπύλη έχει πιο ομαλή μετάβαση. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 20 του γραφήματος της έντασης και στην εικόνα 21 για την απόκριση φάσης και εμπέδησης.[2]



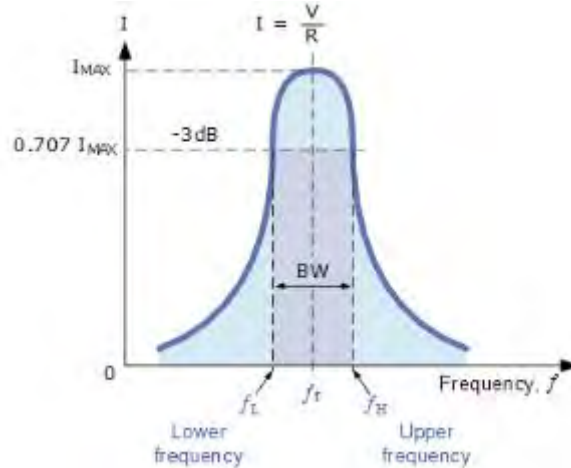
Εικόνα 20: Απότομη και ομαλή απόκριση συχνότητας του πλάτους της έντασης.



Εικόνα 21: Μεταβολή φάσης(μπλε) και μέτρου εμπέδησης (κόκκινο) με συναρτήσεϊ Q. (ΠΗΓΗ: AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach)

Ορίζεται ως bandwidth η διαφορά των δύο συχνοτήτων για τις οποίες η ενέργεια που χάνεται στον αντιστάτη είναι η μισή αυτής στο συντονισμό η οποία είναι -3dB παίρνοντας ως 0dB σαν αναφορά στον συντονισμό. Σε αυτές τις συχνότητες το ρεύμα είναι ίσο με το 70.7% του συντονισμού. [1][2]

$$Bandwidth(BW) = f_H - f_L$$



Εικόνα 22: Bandwidth απόκρισης συχνότητας RLC σε σειρά. (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials.ws>)

Στη γενική περίπτωση η συχνότητα συντονισμού δεν είναι ακριβώς ανάμεσα στις δύο. [2]
Συγκεκριμένα

$f_0 = \sqrt{f_L f_H}$	(2.29)
------------------------	--------

Επίσης

$Q = \frac{f_0}{BW}$	(2.30)
----------------------	--------

Και

$f_L = \frac{f_0}{k_0}$	(2.31)
-------------------------	--------

$f_H = f_0 k_0$	(2.32)
-----------------	--------

Όπου

$k_0 = \frac{1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1}$	(2.33)
--	--------

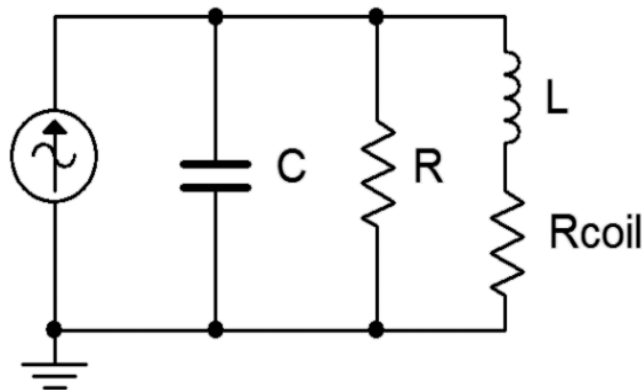
Όταν το Q είναι αρκούντως μεγάλο ($Q > 10$), τότε προσεγγίζεται η συμμετρία συνεπώς:

$f_L \approx f_0 - \frac{BW}{2}$	(2.34)
$f_H \approx f_0 + \frac{BW}{2}$	(2.35)

Ο παράγοντας ισχύος επηρεάζει σημαντικά τις τάσεις στα στοιχεία. Στη συχνότητα συντονισμού το ρεύμα είναι ίσο με την τάση προς την αντίσταση αφού οι αντιδράσεις ακυρώνονται. Ωστόσο στον συντονισμό, οι αντιδράσεις είναι Q φορές μεγαλύτερες τις αντίστασης συνεπώς οι τάσεις του θα είναι και αυτές Q φορές μεγαλύτερες από την τάση εισόδου. Σε ακραίες περιπτώσεις, αυξάνοντας τον παράγοντα ποιότητας, η τάση μπορεί να φτάσει να γίνει έως και 100 φορές μεγαλύτερη. Σε συχνότητες μικρότερες του συντονισμού, ο πυκνωτής θα έχει τάση σχεδόν ίση με της εισόδου, με τον αντιστάτη και το πηνίο να έχουν πολύ μικρότερη. Σε συχνότητες μεγαλύτερη του συντονισμού, στο πηνίο εμφανίζεται η τάση εισόδου ενώ στον πυκνωτή και στον αντιστάτη πολύ μικρότερη. Όταν ο παράγοντας ισχύος μειώνεται, εκτός από την μείωση της τάσης στα στοιχεία, οι μέγιστες τιμές τους δεν βρίσκονται απαραίτητα στη συχνότητα συντονισμού. Συγκεκριμένα του πυκνωτή είναι κάτω από την f_0 ενώ του πηνίου πάνω. [2]

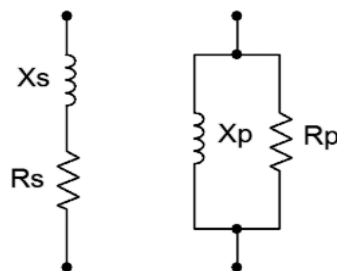
2.1.5.2 Παράλληλος Συντονισμός

Έστω πραγματικό κύκλωμα RLC συνδεδεμένο παράλληλα:



Εικόνα 23: Πραγματικό κύκλωμα RLC σε παράλληλη σύνδεση. (ΠΗΓΗ: AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach)

Στο πραγματικό παράλληλο RLC, συμπεριλαμβάνεται και η ωμική αντίσταση του πηνίου η οποία δεν μπορεί να παραλειφθεί. Στη συνέχεια μετατρέπουμε την αντίσταση αυτή σε παράλληλη σύνδεση εκτελώντας τους απαραίτητους μετασχηματισμούς. [1][2]



Εικόνα 24: Μετατροπή σύνθετης αντίστασης από σειρά σε παράλληλη.

Εξισώνοντας παράλληλη με σειρά:

$R_s + jX_s = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}}$	(2.36)
---	--------

Προκύπτει

$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$	(2.37)
-----------------------------------	--------

$jX_p = j \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$	(2.38)
--------------------------------------	--------

Για πηνία κοντά στην ιδανική συμπεριφορά ($Q_L \geq 10, X_s \gg R_s$) προσεγγίζεται ως:

$R_p \approx \frac{X_s^2}{R_s}$	(2.39)
---------------------------------	--------

$jX_p \approx j \frac{X_s^2}{X_s} = jX_s$	(2.40)
---	--------

Συνεπώς, για ιδανικά πηνία, η παράλληλη ισοδύναμη αντίδραση είναι ίδια με την σύνδεση σε σειρά και η παράλληλη ισοδύναμη ωμική αντίσταση είναι ίση με την ωμική αντίσταση σειράς πολλαπλασιασμένη με την παράμετρο ποιότητας Q_L .

$R_p = Q_L^2 R_s$	(2.41)
-------------------	--------

Η προηγούμενη εξίσωση δείχνει πως για μικρότερη αντίσταση σειράς η ισοδύναμη παράλληλη είναι μεγαλύτερη. Έτσι, για το ιδανικό πηνίο που δεν θα έχει ωμική αντίσταση η ισοδύναμη παράλληλη ωμική απειρίζεται. Ορίζεται ως:

$$Q_{parallel} = \frac{R_T}{X_L} = R_T \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.42)$$

Όπου

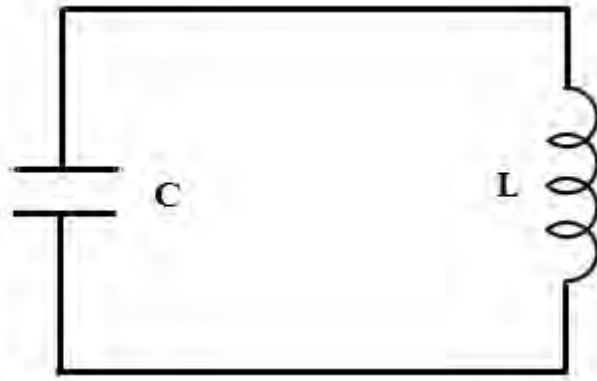
- $Q_{parallel}$ = το ολικό Q του παράλληλου κυκλώματος
- R_T = η συνολική παράλληλη ωμική αντίσταση
- X_L = η επαγωγική αντίδραση στην συχνότητα συντονισμού.

Για παράλληλο κύκλωμα κοντά στην ιδανική συμπεριφορά ($Q_{parallel} \geq 10$), η συχνότητα συντονισμού είναι

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

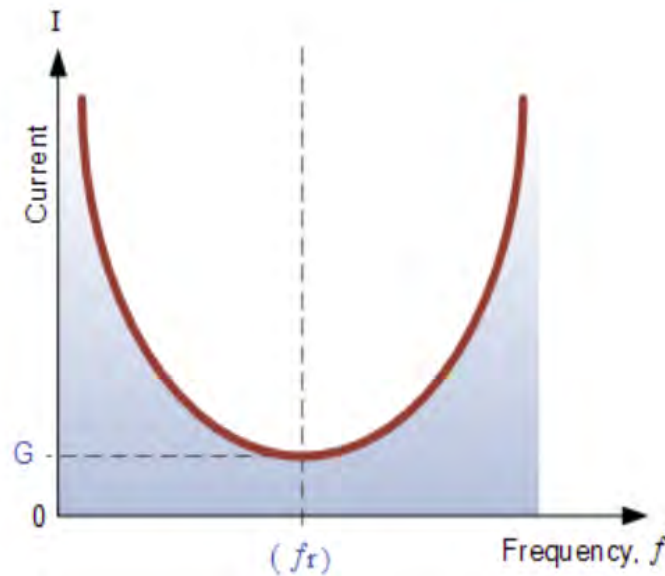
Για χαμηλότερο συντελεστή ποιότητας, η συχνότητα συντονισμού θα μειωθεί ελαφρά διότι η μετασχηματισμένη αντίσταση εξαρτάται από τη συχνότητα.

Το κύκλωμα σε παράλληλη σύνδεση ονομάζεται κύκλωμα «δεξαμενής» (*tank circuit*). Στην πιο απλή μορφή του είναι ένα ιδανικό κύκλωμα LC όπου «ταλαντώνεται» το ηλεκτρικό φορτίο.

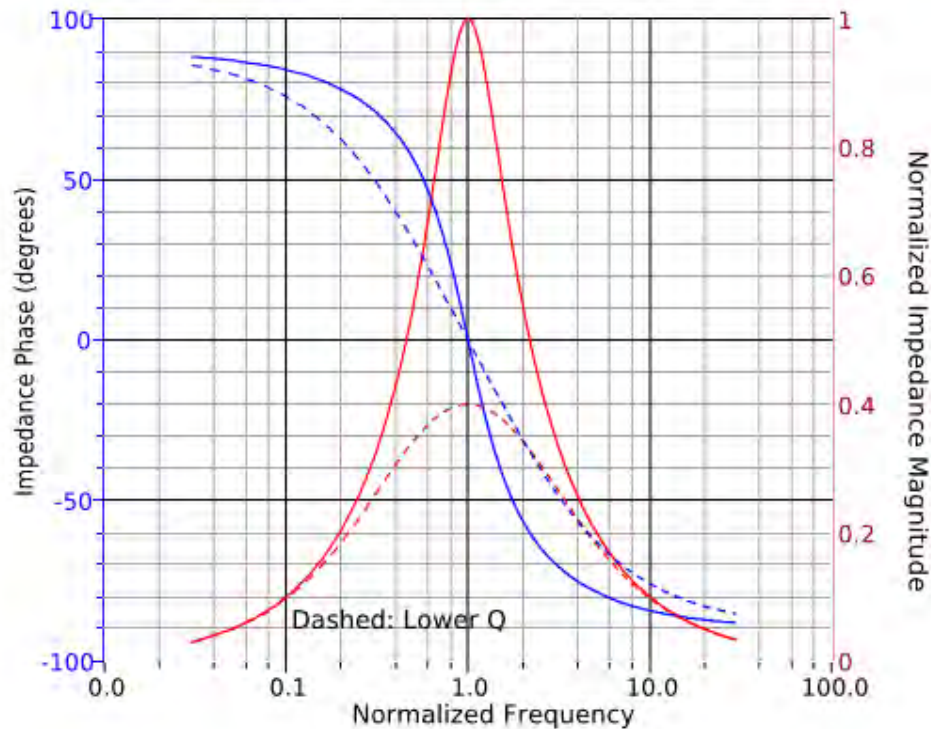


Εικόνα 25: Ιδανικό tank circuit.

Η συνολική εμπίδηση υπολογίζεται από την εξίσωση (22). Η απόκριση συχνότητας είναι ανάποδη από την σύνδεση σε σειρά. Συγκεκριμένα, στην συχνότητα συντονισμού η εμπίδηση μεγιστοποιείται και ελαχιστοποιείται για χαμηλές και ψηλές συχνότητες. Αυτό φαίνεται από την εξίσωση (24) όπου ο παρονομαστής μηδενίζεται για ίσες και αντίθετες αντιδράσεις. Συνεπώς στον παράλληλο συντονισμό η ένταση ελαχιστοποιείται όπως φαίνεται στην εικ.26. Σε μικρές συχνότητες το κύκλωμα είναι χωρητικό και σε μεγάλες επαγωγικό (εικ.27)[2]



Εικόνα 26: Απόκριση συχνότητας πλάτους έντασης σε παράλληλο κύκλωμα RLC. Η ένταση ελαχιστοποιείται στον συντονισμό. (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials.ws>)



Εικόνα 27: Απόκριση συχνότητας φάσης και εμπέδησης σε παράλληλο RLC. . (ΠΗΓΗ: AC Electrical Circuit Analysis- A Practical Approach)

Αν η πηγή του συστήματος είναι πηγή ρεύματος (π.χ. πηγή αρμονικών), τότε η παραγόμενη τάση θα μεγιστοποιηθεί στο ρεύμα συντονισμού. Δηλαδή, η μέγιστη τάση θα προκύπτει στην συχνότητα συντονισμού. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να «φιλτράρουμε» συχνότητες που δεν είναι γύρω από την συχνότητα συντονισμού. Πάνω σε αυτή τη λογική σχεδιάζονται τα φίλτρα *bandpass* τα οποία επιτρέπουν να περάσει μόνο ένα εύρος συχνοτήτων. Όπως και στα RLC σειρές ισχύουν [2]:

$BW = f_H - f_L$	(2.43)
$Q = \frac{f_0}{BW}$	(2.44)
$f_0 = \sqrt{f_H f_L}$	(2.45)

Για $Q > 10$ προσεγγίζονται:

$f_L \approx f_0 - \frac{BW}{2}$	(2.46)
$f_H \approx f_0 + \frac{BW}{2}$	(2.47)

Για χαμηλές τιμές του παράγοντα Q , θα προκύψει μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού. Όσο αυξάνεται ο παράγοντας Q , εμπέδηση μεταβάλλεται πιο «απότομα» και η φάση το ίδιο, όπως και στο κύκλωμα σειράς. Επιπλέον, αντί για την αύξηση της τάσης με το Q όπως στο RLC σειράς, αυξάνεται η ένταση σε σχέση με την ένταση από την πηγή. Ο

παράλληλος αντιστάτης χρησιμοποιείται για να αυξομειώσει τον παράγοντα Q, που ρυθμίζει το BW, του οποίου το όριο καθορίζεται από το πηνίο. Συνεπώς:

$$Q_{\text{κυκλώματος}} \leq Q_L$$

Κλείνοντας, ο συντονισμός αποτελεί σημαντικό φαινόμενο. Η ραγδαία αύξηση των τάσεων και των ρευμάτων έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο σύστημα όπως η καταστροφή πυκνωτών, ασφαλειών και υπερθέρμανση αγωγών. Τέλος, ο συντονισμός αποτελεί τη βάση σχεδιασμού φίλτρων αρμονικών.[2]

2.2 Συντελεστής ισχύος θεμελιώδους

2.2.1 Ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Η στιγμιαία ισχύς στο Ε.Ρ. είναι:

$$P(t) = i(t) \times v(t) \quad (2.48)$$

είναι στη γενική μορφή:

$$v(t) = V_{\text{peak}} \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2.49)$$

$$i(t) = I_{\text{peak}} \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.50)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (25) και (26) στην (24):

$$P(t) = \frac{V_{\text{peak}} \times I_{\text{peak}}}{2} [\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)] \quad (2.51)$$

Η μέση ισχύς είναι:

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.52)$$

Από την εξίσωση 2.24:

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2.53)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.27:

$$P_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{peak}} I_{\text{peak}} \cos(\theta_v - \theta_i)}{2T} \int_0^T dt + \frac{V_{\text{peak}} I_{\text{peak}}}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) dt$$

Η μέση ισχύς μιας περιόδου της συνάρτησης συνημίτονου είναι μηδέν. Συνεπώς η μέση ισχύς που καταναλώνεται σε μία περίοδο είναι:

$$P_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{peak}} I_{\text{peak}}}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (2.54)$$

Θέτοντας τη διαφορά φάσης:

$$\varphi = \theta_v - \theta_i$$

και παίρνοντας την τάση ως σημείο αναφοράς όπου:

$$\theta_v = 0^\circ$$

Προκύπτει:

$$P_{avg} = \frac{V_{peak} I_{peak}}{2} \cos(\varphi) \quad (2.55)$$

2.2.2 Ισχύς σε αντιστάτη

Έστω κύκλωμα μόνο με πραγματική αντίσταση. Από την εξίσωση 2.19 και 2.15 γνωρίζουμε πως η ένταση είναι συμφασική με την τάση. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.24 έχουμε:

$$\begin{aligned} P(t) &= (I_{peak} \sin(2\pi f t)) \times (V_{peak} \sin(2\pi f t)) \Rightarrow \\ P(t) &= V_{peak} I_{peak} (\sin 2\pi f t)^2 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Ισχύει η ταυτότητα:

$$(\sin \omega t)^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \quad (2.57)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.33 στην 2.32 προκύπτει:

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{peak} \times I_{peak} \times \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right] \Rightarrow \\ P(t) &= \frac{V_{peak} \times I_{peak}}{2} [1 - \cos(2\omega t)] \end{aligned} \quad (2.58)$$

Η εξίσωση 2.34 αποτελεί την εξίσωση της στιγμιαίας ισχύος σε έναν καθαρό αντιστάτη που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Η μέση ισχύς μιας περιόδου αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.34 στην 2.28 είναι:

$$P_{avg} = \frac{V_{peak} \times I_{peak}}{16} \left(8 - \frac{\sin(8f\pi^2)}{f\pi^2} \right) \quad (2.59)$$

Για $f = 50\text{Hz}$ και $f = 60\text{Hz}$ είναι:

$$\frac{\sin(8f\pi^2)}{f\pi^2} \approx 0$$

Επιπλέον:

$$\lim_{f \rightarrow \infty} \frac{\sin(8f\pi^2)}{f\pi^2} = 0$$

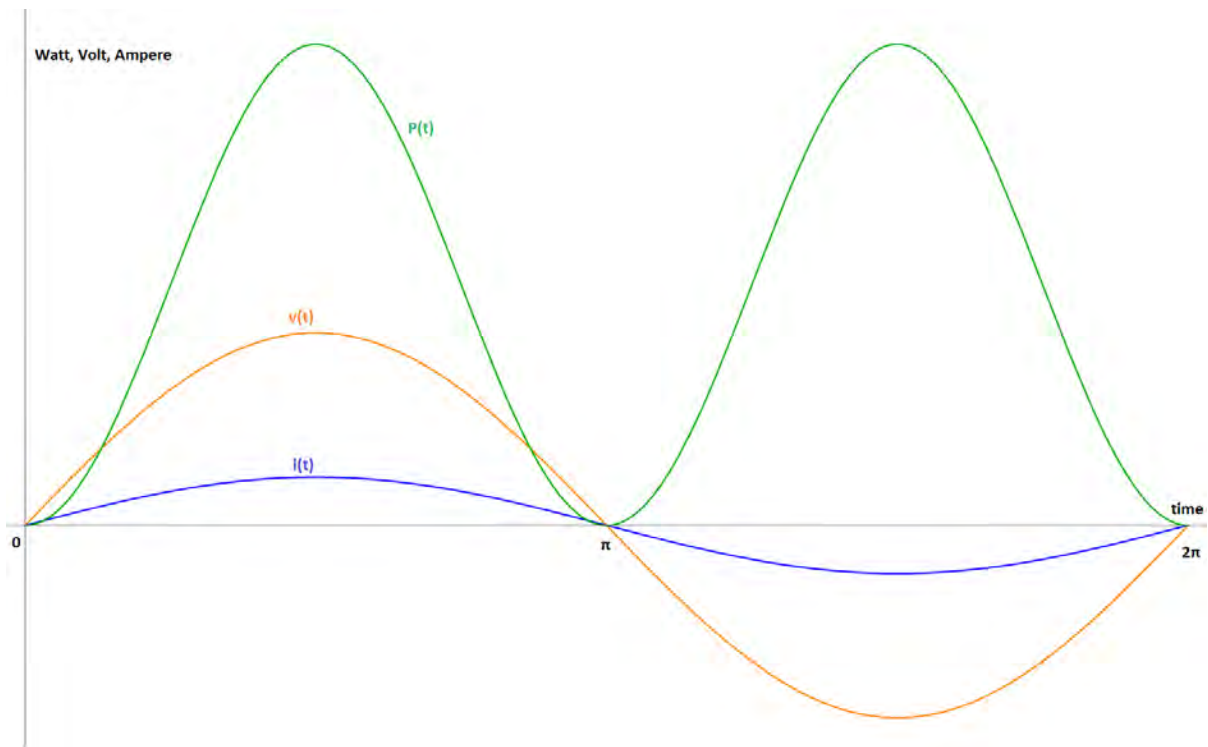
Συνεπώς η εξίσωση 2.35 γίνεται:

$$P_{avg} = \frac{V_{peak} I_{peak}}{2} \Rightarrow \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} &\frac{V_{peak} \times I_{peak}}{\sqrt{2} \times \sqrt{2}} \Rightarrow \\ P_{avg_{resistor}} &= V_{rms} \times I_{rms} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Η εξίσωση (38) υποδεικνύει πως η μέση ισχύς στον αντιστάτη για κάθε περίοδο θα είναι ίδια με την ισχύ του Σ.Ρ. στον ίδιο χρόνο για τις ανάλογες τιμές RMS τάσης και έντασης. Συνεπώς όλη η ισχύς στον αντιστάτη είναι πραγματική και διαχέεται με τη μορφή θερμότητας. Στην εικ.28 αναπαρίσταται η ισχύς μαζί με την τάση και την ένταση. Παρατηρούμε πως είναι

πάντα θετική και κορυφώνεται κατά απόλυτο τιμή τις ίδιες χρονικές στιγμές με την ένταση και την τάση.



Εικόνα 28: Ισχύς, Τάση και Ένταση σε αντιστάτη. Η ισχύς είναι πάντα θετική και ενέργεια χάνεται από το σύστημα με τη μορφή θερμότητας.

2.2.3 Ισχύς σε ιδανικά επαγωγικά και χωρητικά φορτία

Έστω κύκλωμα μόνο με επαγωγική αντίδραση. Από την εξ.(19) και (10) γνωρίζουμε ότι η ένταση του ρεύματος θα καθυστερεί κατά 90 μοίρες από την τάση. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (25) παίρνοντας την τάση ως σημείο αναφοράς:

$$p(t) = (V_{peak} \sin(2\pi ft)) \times (I_{peak} \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{2})) \Rightarrow$$

$$p(t) = (V_{peak} \sin(2\pi ft)) \times (-I_{peak} \cos 2\pi ft) \quad (2.62)$$

Εφαρμόζοντας στην εξίσωση (39) την ταυτότητα:

$$\sin 2\omega t = 2 \times \sin \omega t \times \cos \omega t$$

προκύπτει

$$p(t) = -\frac{V_{peak} I_{peak}}{2} \sin 2\omega t \Rightarrow$$

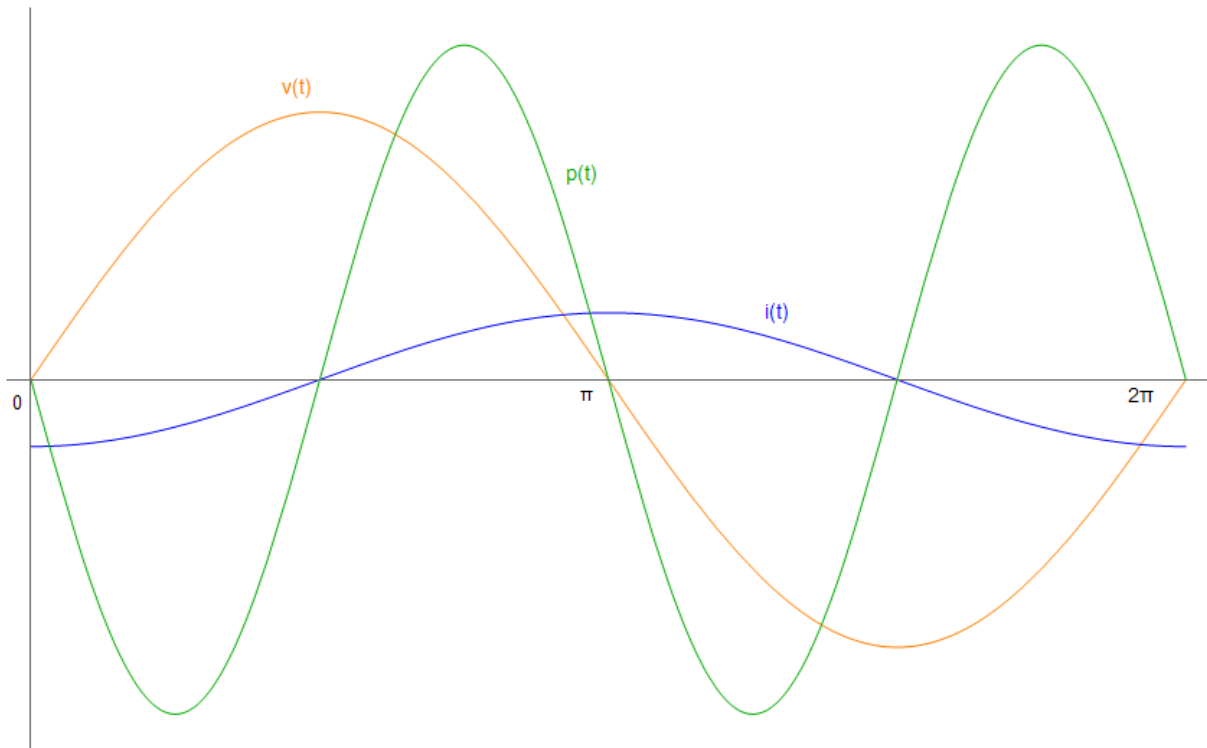
$$p(t) = -V_{rms} I_{rms} \sin 2\omega t \quad (2.63)$$

Κάνοντας την ίδια διαδικασία για τον πυκνωτή με τη διαφορά πως το ρεύμα προπορεύεται κατά 90 μοίρες, η ισχύς θα είναι ίδια με αντίθετο πρόσημο:

$$p(t) = (V_{rms} \times I_{rms}) \sin(2\omega t) \quad (2.64)$$

Στην εικ.29 αναπαρίσταται η ισχύς μαζί με την τάση και την ένταση στο πηνίο. Παρατηρούμε πως εναλλάσσεται από αρνητική σε θετική σε κάθε τέταρτο του κύκλου έχοντας διπλάσια συχνότητα από την τάση και την ένταση· το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια στο μαγνητικό του

πεδίο και την απελευθερώνει δύο φορές σε έναν κύκλο. Ακριβώς ανάλογα, ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια στο ηλεκτρικό πεδίο του.



Εικόνα 29: Ισχύς, Τάση και Ένταση σε Πηνίο. Ισχύς χάνεται και προσδίδεται στο σύστημα περιοδικά.

Η μέση ισχύς για το πηνίο και τον πυκνωτή σε μια περίοδο είναι:

$$P_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(t) i(t) dt$$

Από τις εξισώσεις (5) και (10) για το ρεύμα, $\varphi \pm 90^\circ$ και έχοντας την τάση ως σημείο αναφοράς:

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_{peak} \sin \omega t) \times (I_{peak} \sin \omega t \pm 90) dt \\ P_{avg} &= \frac{V_{peak} I_{peak}}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t) \times (\sin \omega t \pm 90) dt \end{aligned} \quad (2.65)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (42) την ταυτότητα:

$$\sin(A \pm B) = \sin A \times \cos B \pm \sin B \times \cos A$$

προκύπτει:

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \frac{V_{peak} I_{peak} \cos \pm 90^\circ}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t)^2 dt \\ &\quad - \frac{V_{peak} I_{peak} \sin \varphi}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t) \times (\cos \omega t) dt \end{aligned}$$

όπου:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t) \times (\cos \omega t) dt = 0$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t)^2 dt = \frac{1}{2}$$

$$\cos \pm 90^\circ = 0$$

άρα:

$$P_{avg_{L,c}} = 0 \quad (2.66)$$

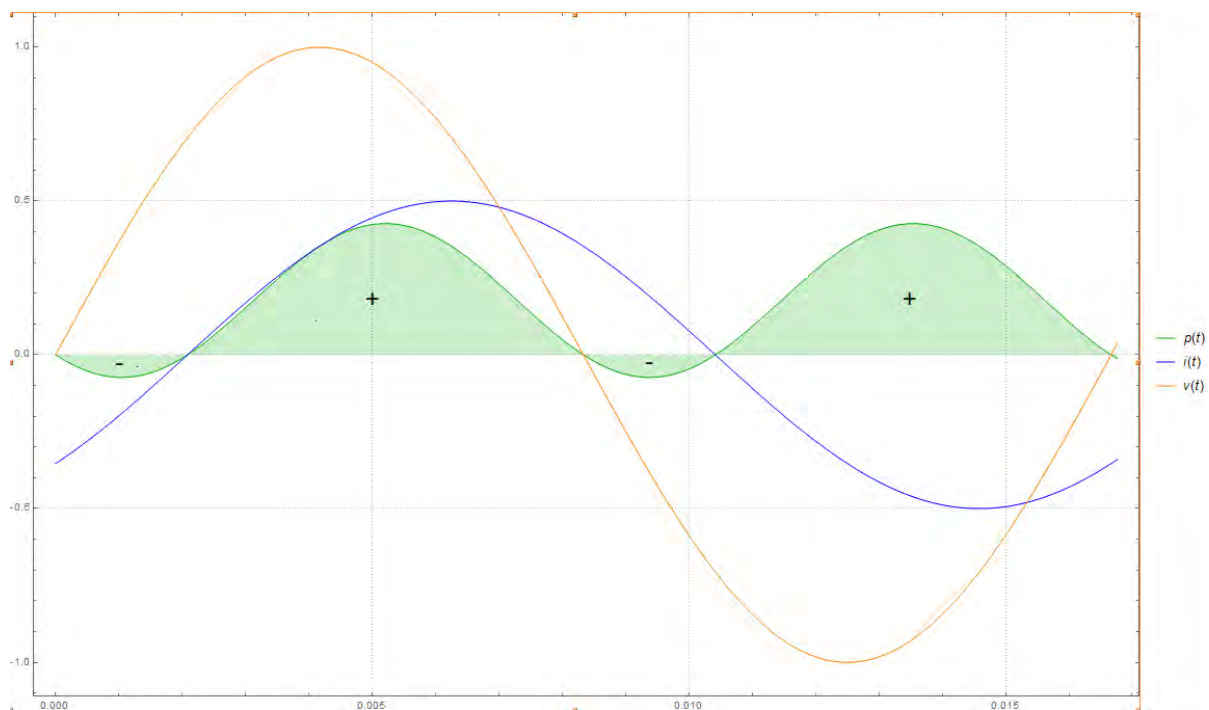
Συνεπώς η μέση ισχύς ανά περίοδο τόσο σε ιδανικό πηνίο όσο και ιδανικό πυκνωτή είναι μηδενική· όση ενέργεια αποθηκεύεται τόση απελευθερώνεται σε κάθε περίοδο. Τέλος, στις εξισώσεις (35), (38), (40), (41), και (43) θα καταλήγαμε αν αντικαθιστούσαμε τις αντίστοιχες φάσεις τάσης-έντασης στις γενικές εξισώσεις (28) και (31). [1][2]

2.2.4 Φαινόμενη ισχύς και συντελεστής ισχύος

Ένα βασικό πρόβλημα που δημιουργείται είναι το εξής: Ο αντιστάτης καταναλώνει πραγματική ισχύ ενώ το πηνίο και ο πυκνωτής την αποθηκεύουν. Σε ένα σύνθετο κύκλωμα RLC εμπέδησης Z και φάσης φ , ως προς το σύστημα αυτό μεταφράζεται το ίδιο, δηλαδή σε ισχύ που χάνεται (κατανάλωση) αν και μόνο στον αντιστάτη χάνεται πραγματικά ενέργεια. Έστω κύκλωμα με $\varphi = -45^\circ$. Η εξίσωση (28) θα είναι:

$$P(t) = \frac{V_{peak} I_{peak}}{2} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos(2\omega t + \frac{\pi}{4}) \right) \quad (2.67)$$

Στην εικ.30 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης, έντασης και ισχύος:



Εικόνα 30 Ισχύς, Τάση και Ένταση σε σύνθετη αντίσταση με $\varphi = -45^\circ$.

Στο γράφημα παρατηρούμε το αρνητικό πρόσημο της ισχύος που υποδηλώνει ότι παράγεται (απελευθερώνεται στο σύστημα) από τους πυκνωτές και τα πηνία. Το θετικό κομμάτι, όμως, αποτελεί τόσο πραγματική ενέργεια που καταναλώνεται από τους αντιστάτες, όσο και ενέργεια που αποθηκεύουν τα χωρητικά/επαγωγικά στοιχεία. Η μέση

ισχύς που θα υπολογίζαμε θα μας έδινε «ψευδή» πληροφορία καθώς μόνο ένα μέρος αυτής παράγει έργο. Ως εκ τούτου εισάγονται δύο όροι: η *φαινόμενη* και η *άεργη* ισχύς.

Η φαινόμενη ισχύς είναι η ολική ισχύς που θα υπολογίζαμε πολλαπλασιάζοντας τη τάση και την ένταση που θα μετρούσαμε με το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο, εξού και η ονομασία «φαινόμενη» με τα δύο αυτά όργανα δεν μπορούσαμε να αναγνωρίσουμε τη διαφορά φάσης ανάμεσα στις δύο ποσότητες. Ως αποτέλεσμα η άεργος ισχύς, δηλαδή η ισχύς που αποθηκεύεται σε πυκνωτές και πηνία θα θεωρούνταν ωφέλιμη.

Για να μετρήσουμε, διαχωρίζοντας τα 3 είδη ισχύος, χρησιμοποιούμε διαφορετικές μονάδες μέτρησης:

Ποσότητα	Σύμβολο	Μονάδα μέτρησης
Πραγματική	P	<i>Watt, W</i>
Άεργος	Q	<i>Volt-Ampere Reactive, (VAR)</i>
Φαινόμενη	S	<i>Volt-Ampere, (VA)</i>

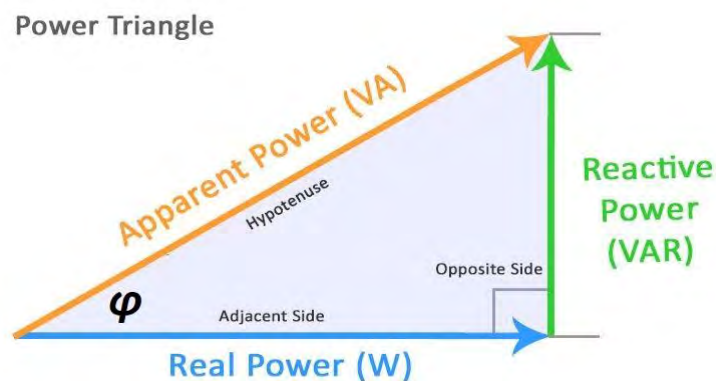
Πίνακας 5: Σύμβολα και μονάδες μέτρησης των ισχύων.

Ο νόμος του Ohm στο Σ.Ρ. ορίζει πως η ισχύς είναι ίση με το τετράγωνο του ρεύματος επί την αντίσταση. Ακολουθώντας ανάλογα στο Ε.Ρ., έχοντας το τρίγωνο διανυσμάτων της εμπέδησης (εικ.17), πολλαπλασιάζουμε τη κάθε μία αντίσταση με το τετράγωνο του ρεύματος και προκύπτει το τρίγωνο της ισχύος:

$$P = I^2 R \text{ [W]}$$

$$Q = I^2 X \text{ [VAR]}$$

$$S = I^2 Z \text{ [VA]}$$



Εικόνα 31: Τρίγωνο ισχύος άεργων ρευμάτων. Διακρίνεται η διαφορά φάσης φ . (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials>)

Η φαινόμενη ισχύς είναι ίση με :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.68)$$

Ο λόγος της πραγματικής προς την φαινόμενη είναι:

$$PF_D = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (2.69)$$

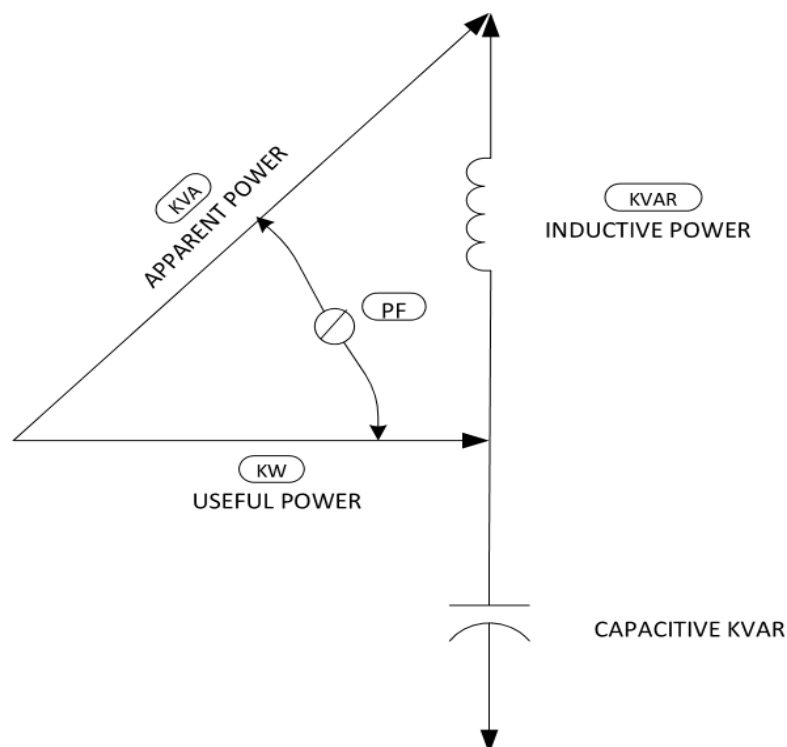
Η τελευταία σχέση πρόκειται για τον *συντελεστή ισχύος θεμελιώδους (Displacement Power Factor)*. Αφορά μόνο την θεμελιώδη συχνότητα, δηλαδή την συχνότητα εισόδου που παράγουν οι γεννήτριες. Όσο η διαφορά φάσης φ μεταξύ τάσης-έντασης αυξάνεται τόσο η

πραγματική ισχύς θα μειώνεται. Αυτό συνεπάγεται ότι συγκριτικά με έναν μεγαλύτερο συντελεστή, απαιτείται περισσότερο ηλεκτρικό φορτίο για την παραγωγή του ίδιου έργου. Επιπλέον όταν η διαφορά φάσης πλησιάζει τις $|90^\circ|$, η μέση ισχύς μηδενίζεται, όπως αποδείχτηκε. Αντίστοιχα, όταν η γωνία τείνει στο μηδέν η φαινόμενη ισχύς ισοδυναμεί με την πραγματική και η μέση ισχύς περιγράφεται από την εξίσωση (38). Τέλος, σαν σύμβαση, θεωρείται πως τα επαγωγικά συστήματα καταναλώνουν άεργο ισχύ ενώ τα χωρητικά παράγουν.[1][2]

2.3 Απόσβεση άεργων ρευμάτων

2.3.1 Διόρθωση συντελεστή ισχύος

Η διόρθωση της φάσης, προκύπτει από την «εξουδετέρωση» των αντιδράσεων ώστε το σύστημα να τείνει στο να έχει μόνο πραγματική αντίσταση. Αυτό οδηγεί σε αλληλεξουδετέρωση των άεργων ρευμάτων και μείωση της συνολικής έντασης του ρεύματος λειτουργίας του φορτίου. Το πρώτο μέλημα είναι να υπολογιστούν τα συνολικά VAR που απαιτούνται. Αν το σύστημα είναι επαγωγικό τότε πρέπει να προστεθεί χωρητική αντίδραση με άεργη ισχύ ίδιου μέτρου ενώ αν είναι χωρητικό πρέπει να προστεθεί επαγωγική άεργος ισχύς. Αφού υπολογιστούν τα VAR ισχύος, και με γνωστή την φάση επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος αντίδρασης και συναρτήσει της σύνδεσης στο κύκλωμα (παράλληλα ή σε σειρά) και της συχνότητας, υπολογίζονται οι παράμετροι του φίλτρου. Στην εικ.32 παρουσιάζεται η διαδικασία διόρθωσης με τη μορφή διανυσμάτων. Η πρόσθεση αντίθετης και ίσης ποσότητας VAR περιστρέφει το διάνυσμα της φαινόμενης ισχύος με στόχο να ταυτιστεί με το διάνυσμα της πραγματικής, όπου $\phi=0$ και $PF=1$.



Εικόνα 32: Διανυσματική αναπαράσταση διόρθωσης συντελεστή σε επαγωγικό φορτίο.

Συνήθως, ειδικότερα στις βιομηχανίες, τα φορτία είναι επαγωγικά άρα η απόσβεση πραγματοποιείται με χωρητικά φίλτρα. Η πιο συνηθισμένη πρακτική είναι η τοποθέτηση

τους σε παράλληλη σύνδεση με τα φορτία ενδιαφέροντος. Η σύνδεση γίνεται παράλληλα για τους εξής λόγους:

- 1) Η τάση είναι ίδια για το φορτίο και το φίλτρο και η ένταση του ρεύματος του φίλτρου εξαρτάται από το φορτίο.
- 2) Αν τοποθετήσουμε το φίλτρο σε σειρά τότε θα προκύψει πτώση τάσης.
- 3) Αν το φορτίο βραχυκυκλώσει τότε αν η σύνδεση είναι σε σειρά η υψηλή τάση θα μεταφερθεί στο φίλτρο με κίνδυνο να εκραγεί αν πρόκειται για στατικό πυκνωτή.
- 4) Στη παράλληλη συνδεσμολογία είναι πολύ εύκολη μια νέα σύνδεση. Στη σύνδεση σε σειρά θα πρέπει να «ανοιχτεί» το κύκλωμα που σημαίνει διακοπή τροφοδοσίας για όσο διαρκέσει η εγκατάσταση.
- 5) Στη σύνδεση σε σειρά η ανακτώμενη τάση στα άκρα της συσκευής μεταγωγής και ελέγχου τάσης θα είναι υψηλή.

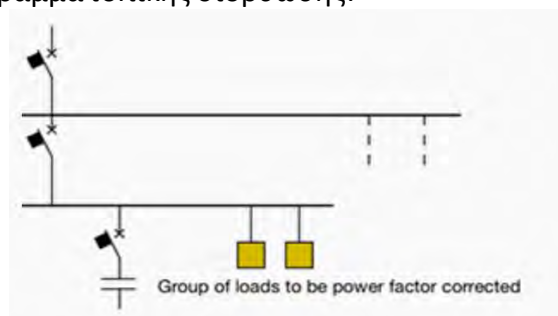
2.3.2 Φίλτρα Πυκνωτών

Υλικά κατασκευής

Οι πιο συνηθισμένοι πυκνωτές είναι τύπου μεμβράνης μεταλλικού πολυπροπυλενίου ενώ για μεγάλη παροχή VAR χρησιμοποιούνται τύπου επιμεταλλωμένου χάρτου με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και αρμονικά ρεύματα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και πυκνωτές επιμεταλλωμένου πολυεστέρα που διακρίνονται για την σταθερή χωρητικότητά τους. Η διαστασιολόγηση τους γίνεται βάσει της χωρητικότητάς τους. Η επιλογή τους εξαρτάται από το είδος του φορτίου, τον τρόπο εκκίνησης του, (π.χ. soft starters), το χρόνο λειτουργίας του, το μέγεθος του ακόμα και τον τρόπο χρέωσης του παρόχου.

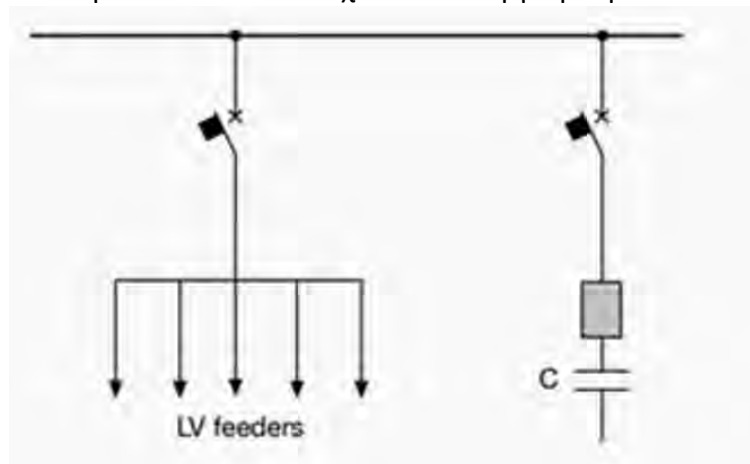
Τύποι Σύνδεσης

Τα φίλτρα πυκνωτών μπορεί να είναι μεμονωμένοι πυκνωτές που συνδέονται στον τερματικό συγκεκριμένου φορτίου και μπορούν να εγκατασταθούν και να αντικατασταθούν εύκολα, ή μια τράπεζα πυκνωτών όταν πρόκειται για μεγάλες εγκαταστάσεις και σταθμούς που αναλαμβάνουν τροφοδότηση σε πολλαπλές συσκευές. Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν παράδειγμα απευθείας σύνδεσης σε φίλτρο. Γενικά, η σύνδεση σε μεμονωμένο φορτίο δεν ενδείκνυται για φορτία που λειτουργούν για μικρό διάστημα διότι τα φίλτρα παραμένουν ανενεργά για το περισσότερο χρόνο ζωής τους. Για ανομοιόμορφη κατανομή χρόνου λειτουργίας πολλών φορτίων και φορτίων που λειτουργούν συγκεκριμένες ώρες την ημέρα, οι τράπεζες πυκνωτών έχουν μικρότερο κόστος ανά VAR και παρέχουν επακριβή διόρθωση όταν συνδυάζονται με αυτόματο έλεγχο ώστε να μην δημιουργείται υπερδιόρθωση ή υποδιόρθωση της φάσης. Γενικότερα, συνδυάζονται ατομικά ή ομαδικά με κεντρικά φίλτρα με τα ατομικά να αναλαμβάνουν μεγάλης ισχύος φορτία. Στην εικ.33 παρουσιάζεται σχεδιάγραμμα τοπικής διόρθωσης.



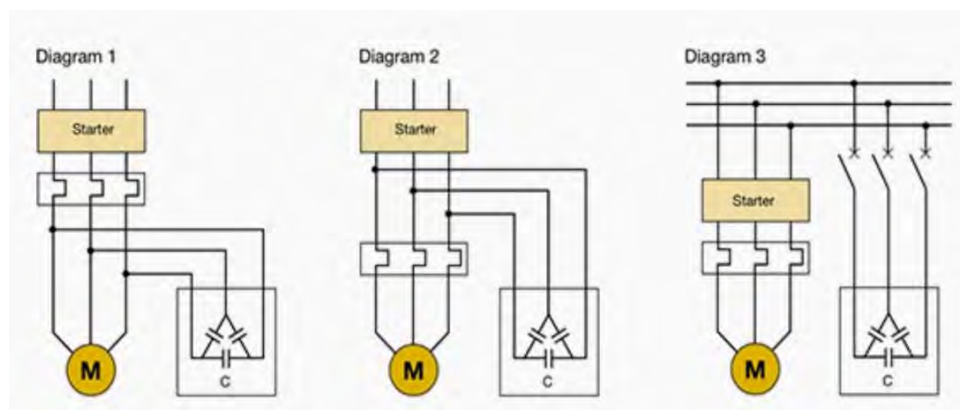
Εικόνα 33: Ομαδοποιημένη σύνδεση δύο και παραπάνω φορτίων παρόμοιων χαρακτηριστικών λειτουργίας σε μια κοινή τράπεζα πυκνωτών για τοπική διόρθωση του συντελεστή ισχύος. . (ΠΗΓΗ: <https://electrical-engineering-portal.com>)

Στην εικ.34 παρουσιάζεται σχεδιάγραμμα κεντρικής σύνδεσης. Τα φίλτρα συνδέονται απευθείας στους κεντρικούς πίνακες τροφοδοσίας. Η σύνδεση αυτή, επιτρέπει μια βελτιστοποίηση στα κόστη των πυκνωτών, ωστόσο οι αγωγοί από την πλευρά των φορτίων πρέπει να διαστασιολογούνται ώστε να δέχονται τα άεργα ρεύματα.



Εικόνα 34: Κεντρική σύνδεση του δικτύου σε ενιαίο φίλτρο. Αποτελεί τη πιο βολική λύση. Ιδανική για πολλά φορτία με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας. (ΠΗΓΗ: <https://electrical-engineering-portal.com>)

Στη περίπτωση σύνδεσης σε ηλεκτροκινητήρα, είναι σημαντικό η σύνδεση να πραγματοποιείται με τον κατάλληλο τρόπο. Η μόνιμη σύνδεση του φίλτρου στην έξοδο του εκκινητήρα ή του ρυθμιστή στροφών, εγκυμονεί πιθανότητα βλάβης. Πιο αναλυτικά, όταν διακοπεί η τροφοδοσία ρεύματος ο κινητήρας θα συνεχίζει να περιστρέφεται για ένα χρονικό διάστημα λόγω ροπής αδράνειας. Κατά τη λειτουργία του, με το ρεύμα διέγερσης του πυκνωτή, θα μετατραπεί σε ασύγχρονη γεννήτρια. Η τάση στους διακόπτες και στη συσκευή ελέγχου από τη πλευρά του φορτίου, διατηρείται με κίνδυνο να προκληθεί υπέρταση ακόμα και δύο φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική. Η προβλεπόμενη διαδικασία είναι το φίλτρο να συνδέεται στην τροφοδοσία και οι διακόπτες να κλείνουν αφού πραγματοποιηθεί εκκίνηση και να ανοίγουν πριν το πέρας της λειτουργίας. Επιπλέον το δίκτυο από τη πλευρά της παροχής, λειτουργεί με βελτιωμένο συντελεστή. Παρότι προσφέρεται ικανοποιητικότερη διόρθωση και ασφάλεια, οικονομικά είναι πιο ακριβή εγκατάσταση.

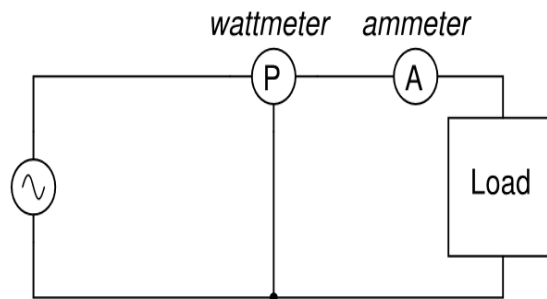


Εικόνα 35: Σύνδεση πυκνωτών σε επαγωγικό κινητήρα. Στο πρώτο και το δεύτερο σχήμα το φίλτρο συνδέεται μετά τον εκκινητήρα. Στο τρίτο σχήμα γίνεται σύνδεση ανάντη με διακόπτες. (ΠΗΓΗ: <https://electrical-engineering-portal.com>)

Αυτοματισμοί εμπεριέχουν αισθητήρες όπως αμπερόμετρα και βολτόμετρα που υπολογίζουν χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο τα σήματα τροφοδοτώντας πληροφορίες σε έναν προγραμματιζόμενο ελεγκτή ο οποίος συγκρίνει τον τρέχων συντελεστή ισχύος με τον επιθυμητό και αναλόγως κλείνει ή ανοίγει διακόπτες (π.χ. θυρίστορ) συνδέοντας ή αποσυνδέοντας τα φίλτρα.

Διαστασιολόγηση πυκνωτή

Για την διαστασιολόγηση ενός πυκνωτή πρέπει να γνωρίζουμε, όπως αναφέρθηκε, την απαιτούμενη ισχύ VAR που θα τροφοδοτεί. Σε ένα απλό παράδειγμα ενός φορτίου, ο πιο απλός τρόπος είναι χρησιμοποιώντας ένα βατόμετρο να μετρήσουμε την πραγματική ισχύ και τη φαινόμενη πολλαπλασιάζοντας την ένταση του ρεύματος που υποδεικνύει το αμπερόμετρο, με την τάση, στο φορτίο.



Εικόνα 36: Μέτρηση πραγματικής και φαινόμενης ισχύος φορτίου για υπολογισμό συντελεστή ισχύος.

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$PF_D = \frac{|P|}{|S|}$$

Η άεργος ισχύς θα είναι:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ [VAr]}$$

Ιδανικά, πρέπει να εγκαταστήσουμε έναν πυκνωτή ο οποίος θα προσδίδει τα ίδια VAR ισχύος. Η σύνδεση γίνεται παράλληλα :

$$Q_C = Q \Rightarrow$$

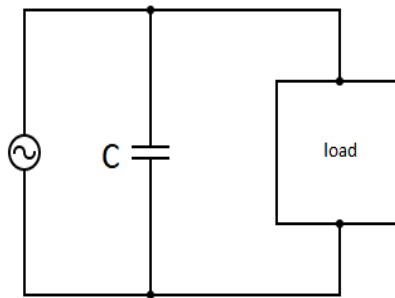
$$Q_C = I^2 |X_C| = \frac{V_{rms}^2}{|X_C|} \Rightarrow$$

$$|X_C| = \frac{V_{rms}^2}{Q_C} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2\pi f C} = \frac{V_{rms}^2}{Q_C} \Rightarrow$$

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f V_{rms}^2} [\text{Farad}]$$

(2.70)



Εικόνα 37: Παράλληλη σύνδεση πυκνωτή σε επαγωγικό φορτίο για βελτίωση συντελεστή.

Τριφασικές μονάδες πυκνωτών

Για σύνδεση αστέρα, η τάση φάσης με την τάση γραμμής σχετίζονται από την σχέση:

$$V_{\varphi} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

Η χωρητικότητα ανά φάση είναι:

$$C_Y = \frac{Q}{\omega V_{\varphi}^2} = \frac{Q}{\omega \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}} \right)^2} \Rightarrow$$

$$C_Y = \frac{3 Q}{\omega V_L^2} \quad (2.71)$$

Για την σύνδεση τριγώνου:

$$V_L = V_{\varphi}$$

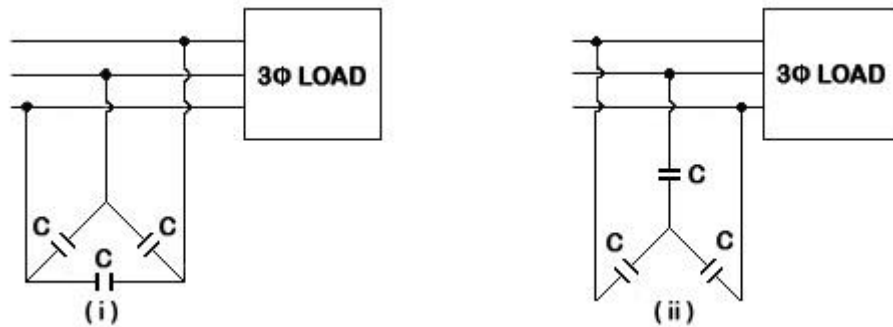
Η χωρητικότητα ανά φάση είναι:

$$C_{\Delta} = \frac{Q}{\omega V_L^2} = \frac{Q}{\omega V_{\varphi}^2} \quad (2.72)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 2.47 και 2.48 προκύπτει:

$C_Y = 3 C_{\Delta}$	(2.73)
----------------------	----------

Το αποτέλεσμα μεταφράζεται ως εξής: στην σύνδεση αστέρα η απαιτούμενη χωρητικότητα για την ίδια άεργο ισχύ είναι τριπλάσια της σύνδεσης τριγώνου. Έτσι η συνδεσμολογία τριγώνου αποτελεί τη προτιμότερη μέθοδο όταν πρόκειται για εγκατάσταση φίλτρου πυκνωτών σε τριφασικό φορτίο.



Εικόνα 38: Παράλληλη σύνδεση φίλτρου πυκνωτών τριγώνου(i) και αστέρα (ii) σε τριφασικό επαγωγικό φορτίο. (ΠΗΓΗ: www.mepits.com)

Βαθμίδες

Η εγκατάσταση των πυκνωτών πραγματοποιείται σε βαθμίδες για δυναμική απόκριση. Το άνοιγμα και το κλείσιμο διακοπών συνδέει και αποσυνδέει πυκνωτές ανάλογα με την επιθυμητή άεργη ισχύ. Υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί διαδοχών βημάτων όπως:

1.1.1.1.1.1	1.2.2.2.2.2	1.2.3.3.3.3	1.2.3.4.4.4
1.1.2.3.3.3	1.1.2.2.2.2	1.2.4.8.8.8	1.2.4.4.4.4

Πιο συγκεκριμένα, για παράδειγμα, η διαδοχή 1.1.1.1.1.1 σημαίνει πως η ισχύς του κάθε βήματος είναι ίση με την πρώτη, δηλαδή:

$$Q_2 = Q_1, Q_3 = Q_1 \dots \dots Q_n = Q_1$$

Διαδοχή 1.1.2.2.2.2 είναι:

$$Q_2 = Q_1, Q_3 = 2Q_1, Q_4 = 2Q_1 \dots \dots Q_n = 2Q_1$$

Διαδοχή 1.2.3.4.4.4. είναι:

$$Q_2 = 2Q_1, Q_3 = 3Q_1, Q_4 = 4Q_1 \dots \dots Q_n = 4Q_1$$

Διαδοχή 1.2.4.8.8.8:

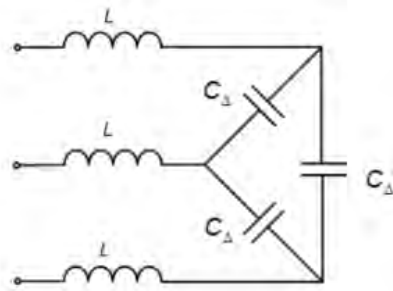
$$Q_2 = 2Q_1, Q_3 = 4Q_1, Q_4 = 8Q_1 \dots \dots Q_n = 8Q_1$$

Η επιλογή του αριθμού των βημάτων εξαρτάται από

1. Τον αριθμό των εξόδων του οργάνου αυτόματης αντιστάθμισης που χρησιμοποιείται
2. Τον συνδυασμό που έχει επιλεγεί με βάσει την ισχύ των διαφόρων βημάτων

Αρμονικές

Εάν υπάρχουν αρμονικά ρεύματα και δεν είναι δυνατή η απόσβεση τους, τότε είναι αναγκαία η προστασία των πυκνωτών με τη χρήση πηνίων στραγγαλισμού (choke). Το πηνίο συνδέεται σε σειρά με τον πυκνωτή και ρυθμίζονται έτσι ώστε το σύστημα τους να είναι επαγωγικό στις κρίσιμες συχνότητες και χωρητικό στην θεμελιώδη. Για να γίνει αυτό πρέπει η συχνότητα συντονισμού να είναι να είναι μικρότερη από την μικρότερη τάξη των υπαρκτών αρμονικών (συνήθως είναι η 5^η). Δεδομένου αυτού, για δίκτυα συχνότητας 60Hz συντονίζονται στα 150-250 Hz ενώ για 50Hz στα 120-210 Hz. Η προσθήκη του πηνίου αυξάνει την πτώση τάσης θεμελιώδους στον πυκνωτή, συνεπώς πρέπει να γίνεται έλεγχος για να μην υπερβεί κρίσιμα όρια.



Εικόνα 39: Τριφασικό φίλτρο πυκνωτών VAR με πηνία στραγγαλισμού.

Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης πυκνωτών για διόρθωση συντελεστή ισχύος
Τα βασικά πλεονεκτήματα των πυκνωτών είναι:

- Αμελητέες απώλειες
- Απαιτούν απλούστερη συντήρηση καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη
- Η εγκατάσταση τους είναι απλή

Τα μειονεκτήματά τους:

- Δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (8-10 έτη)
- Η λειτουργία τους συνοδεύεται με λειτουργία διακοπών που προκαλούν μεταβατικά φαινόμενα υπερτάσεων.
- Κινδυνεύουν από αρμονικά ρεύματα και τάσεις.
- Η επισκευή τους είναι δαπανηρή εάν καταστραφούν.
- Η μεταβολή της άεργης ισχύος είναι βηματική.

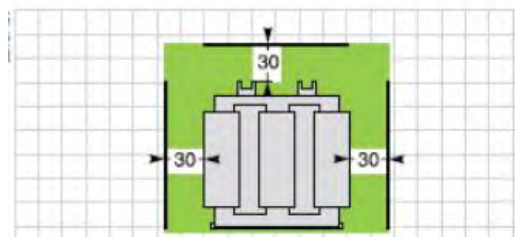
Προστασία IP

Περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν η υγρασία και η σκόνη που επικρατούν στο χώρο. Η υγρασία μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα και διάβρωση ενώ η σκόνη να υπερθερμάνει το φίλτρο παρεμποδίζοντας την ροή του αέρα ψύξης ακόμα και να προκαλέσει βραχυκύκλωμα εάν είναι μεταλλική. Συνεπώς αναλόγως με τον βαθμό υγρασίας και το μέγεθος της σκόνης (π.χ. πούδρα) επιλέγεται η κατάλληλη προστασία βάσει του προτύπου IP.

Σε γενικές γραμμές πρέπει να ισχύουν τα εξής:

1. Εσωτερική εγκατάσταση σταθερής στήριξης με συνθήκες σωστού εξαερισμού τοπικά η περιφερειακά.
2. Η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τους 35 βαθμούς Κελσίου σε χρόνο 12 μηνών, τους 45 σε 1 ημέρα και τους 55 που είναι η μέγιστη βάσει του προτύπου IEC60831
3. Απόσταση τουλάχιστον 30 χιλιοστών μεταξύ των πυκνωτικών μονάδων και μεταξύ των πυκνωτικών μονάδων και ερμαρίου ώστε να γίνει εύκολα και σωστά η κυκλοφορία του αέρα. Επίσης, απόσταση 30 χιλιοστών μεταξύ των μερών των φάσεων.
4. Στους τριφασικούς πυκνωτές απαιτείται κενό 30 χιλιοστών επίσης στο επάνω μέρος του.
5. Οι πυκνωτές θα πρέπει να τοποθετούνται σε ξηρό περιβάλλον και να βρίσκονται μακριά από πηγές παραγωγής θερμότητας και σκόνη.

6. Ροπή σύσφιξης 10 NM για το εξαγωγικό παξιμάδι στη βάση των πυκνωτών.
7. Η γείωση της πυκνωτικής μονάδας γίνεται από το διαθέσιμο σημείο στη βάση του πυκνωτή.
8. Τα στραγγαλιστικά πηνία τοποθετούνται σε ξεχωριστή κολώνα στον πίνακα αντιστάθμισης ειδικά σχεδιασμένη για αυτά καθώς επίσης απαιτούν εξαναγκασμένη συναγωγή για ψύξη. Για τον βέλτιστο αερισμό το τύλιγμά τους έχει κάθετο προσανατολισμό και να αφήνονται κενά τουλάχιστον 30 χιλιοστών από κάθε πλευρά.

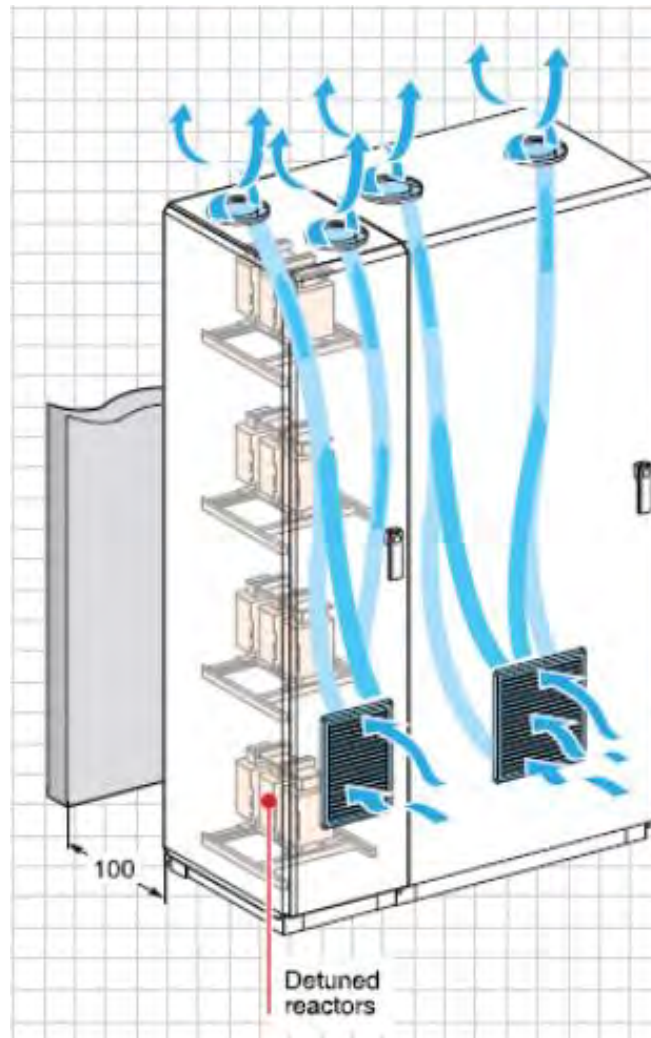


Εικόνα 40: Τοποθέτηση και εξαερισμός στραγγαλιστικών πηνίων. (ΠΗΓΗ: Schneider Electric)

Εξαερισμός

Οι θερμικές απώλειες εκτιμώνται στα 8-9 W/kVA_r για πίνακες με στραγγαλιστικά πηνία και απαιτείται πάντα εξαναγκασμένη συναγωγή για τη μεταφορά θερμότητας. Οι κανόνες εξαερισμού απαιτούν:

1. Κατεύθυνση του αέρα από κάτω προς τα επάνω.
2. Εξαγωγή αέρα από την οροφή.
3. Εισαγωγή αέρα στο πιο χαμηλό δυνατό σημείο.
4. Η διατομή εξαγωγής είναι μεγαλύτερη από της εισαγωγής.
5. Τα ανοίγματα είναι συμβατά με το βαθμό προστασίας IP.
6. Απόσταση τουλάχιστον 100 χιλιοστών μεταξύ ανεμιστήρα και συσκευών.
7. Κενό τουλάχιστον 600 χιλιοστών μεταξύ πίσω μέρους πίνακα και του τοίχου για τον πίνακα καθώς θα ανοίγει από εμπρός.
8. Ενδεικτικά η ροή του αέρα είναι 0.6 με 0.75 φορές της ροής που δίνεται από τον κατασκευαστή του ανεμιστήρα.



Εικόνα 41: Ιδανική ροή εξαερισμού πίνακα αντιστάθμισης. (ΠΗΓΗ: Schneider Electric)

Η επιλογή του ελάχιστου αριθμού των ανεμιστήρων είναι τυποποιημένη και γίνεται βάσει του παρακάτω πίνακα.

Θερμικές απώλειες (Watt)	Ελάχιστος αριθμός ανεμιστήρων
0-500	0
500-1500	1
1500-2400	2
2400-3000	3
3000-3500	4
3500-4500	5
4500-5000	6

Πίνακας 6: Επιλογή ελάχιστου αριθμού ανεμιστήρων.

Οι διαστάσεις του πίνακα για βέλτιστο εξαερισμό επιλέγονται με ανάλογο τρόπο :

kVAr	Total no. of steps	Dimensions
100	5	1800 X 800 X 800
150	6	1800 X 800 X 800
200	6	1800 X 800 X 800

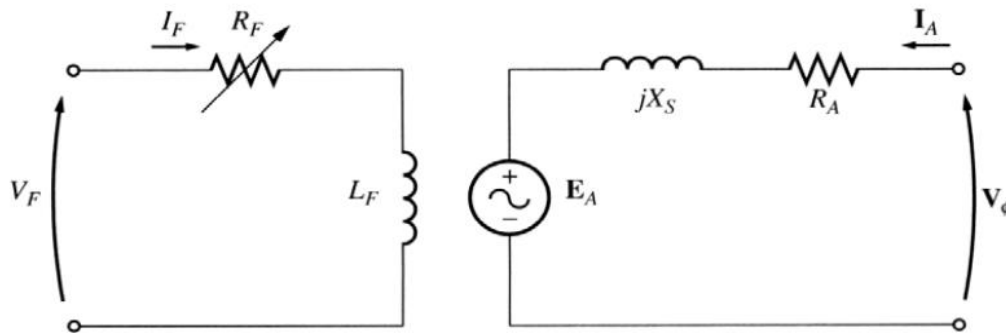
250	7	2000 X 800 X 800
300	8	2000 X 800 X 800
350	8	2000 X 800 X 800
400	8	2000 X 800 X 800

Πίνακας 7: Ενδεικτικές διαστάσεις πίνακα βάσει ισχύος και βημάτων. (ΠΗΓΗ: Schneider Electric)

2.3.3 Σύγχρονοι συμπυκνωτές

Πρόκειται ουσιαστικά για σύγχρονους ηλεκτροκινητήρες που λειτουργούν χωρίς μηχανικό φορτίο. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι η τροποποίηση της εμπέδησής τους ανάλογα με την ένταση του ρεύματος διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης μεταβάλλει την αντίδραση από χωρητική σε επαγωγική ή την μηδενίζει εντελώς. Αν το ρεύμα διέγερσης είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό, ο κινητήρας βρίσκεται σε υπερ-διέγερση, η αντι-ΗΕΔ που εφαρμόζεται στον οπλισμό είναι μεγαλύτερη από την τάση δικτύου και στον στάτορα τροφοδοτείται ρεύμα απομαγνήτισης που αντιτίθεται στην υπερμαγνήτιση του ρότορα. Το ρεύμα αυτό είναι χωρητικό (leading)· ο κινητήρας προσφέρει άεργο ισχύ στο δίκτυο. Έτσι, χρησιμοποιούμε τις εν λόγω διατάξεις σαν πυκνωτές για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Για τον λόγο αυτό καλούνται και σύγχρονοι πυκνωτές. Κατά κύριο λόγο εφαρμόζονται σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. [20]

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού σύγχρονου κινητήρα είναι :



Εικόνα 42: Ισοδύναμο κύκλωμα φάσης σύγχρονου κινητήρα. Το αριστερό κομμάτι αντιστοιχεί στον ρότορα και το δεξί στον οπλισμό της φάσης. [<https://www.tutorialspoint.com/equivalent-circuit-of-a-synchronous-motor>]

- V_ϕ = τάση φάσης δικτύου οπλισμού
- E_A = επαγόμενη ΑΗΕΔ οπλισμού λόγω μαγνητικού πεδίου ρότορα (Α-ΗΕΔ)
- I_α = ρεύμα οπλισμού
- R_a = αντίσταση οπλισμού
- X_s = αντίδραση οπλισμού
- $Z_s = R_a + jX_s$ εμπέδηση του οπλισμού
- V_F = Σταθερή τάση διέγερσης ρότορα
- I_f = ρεύμα διέγερσης
- L_f = αντίδραση τυλίγματος ρότορα
- R_F = μεταβλητή αντίσταση τυλίγματος διέγερσης

Εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο του Kirchhoff:

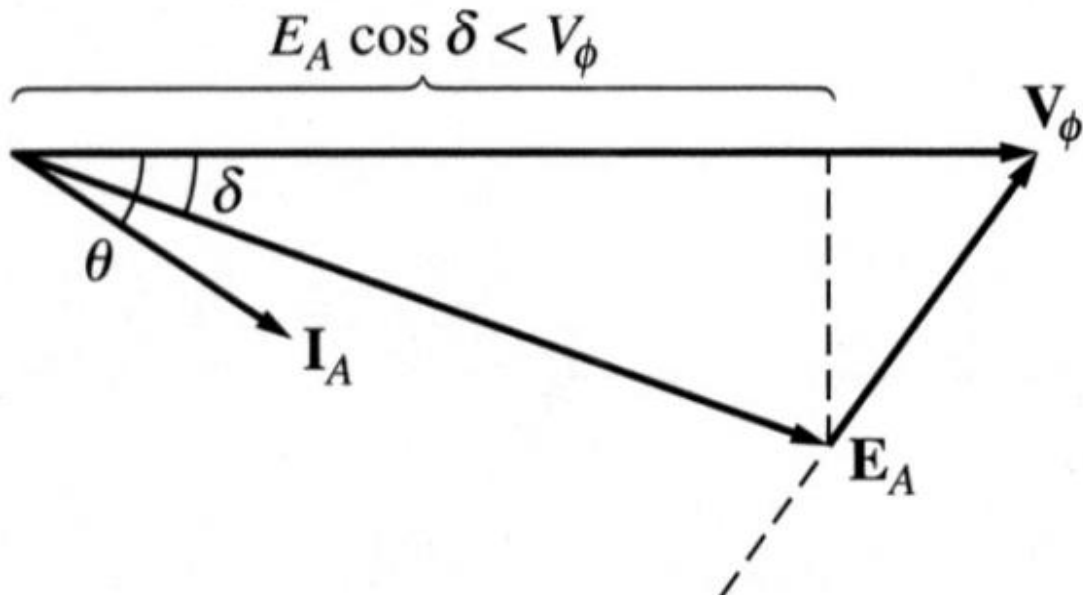
$$V_\phi = E_A + I_\alpha Z_s \Rightarrow$$

$$V_\phi = E_A \angle \delta + I_\alpha (R_a + jX_s) \Rightarrow$$

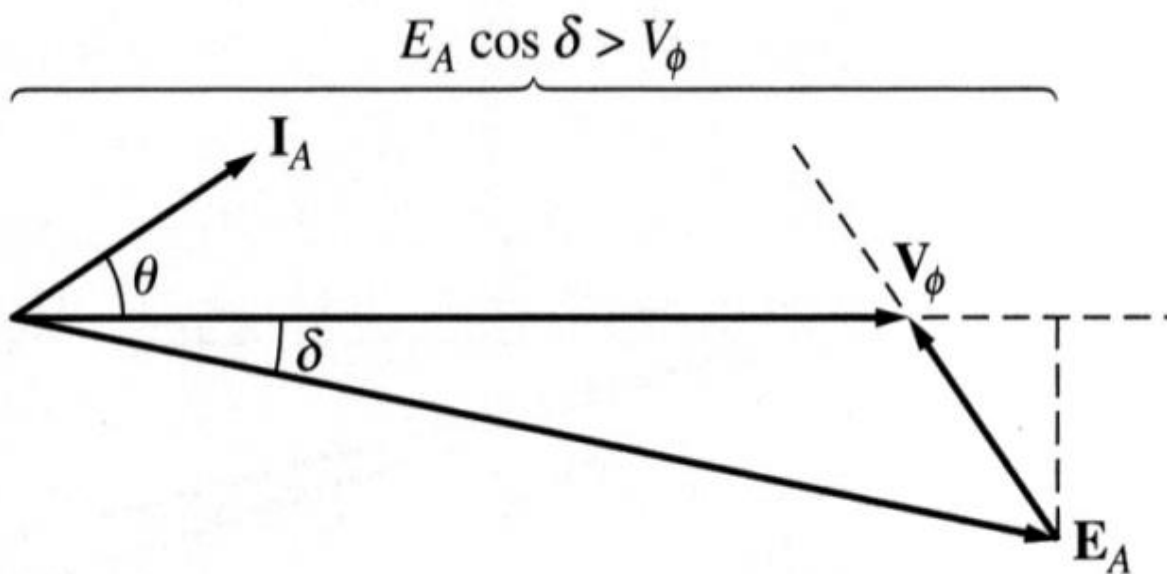
$I_\alpha = \frac{V_\phi - E_A \angle \delta}{R_a + jX_s}$	(2.74)
--	--------

--	--

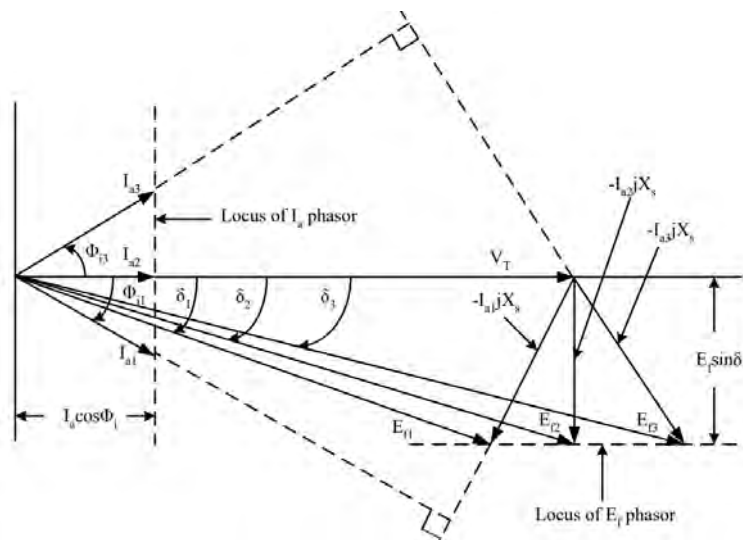
Από την τελευταία σχέση προκύπτει το εξής: Για σταθερό φορτίο, όσο η ένταση του ρεύματος I_F αυξάνεται, τόσο θα αυξάνεται και η E_A . Σε μία δεδομένη τιμή της έντασης, η τάση εξ επαγωγής θα είναι ίση με την τάση δικτύου και το ρεύμα οπλισμού θα αποκτήσει μια ελάχιστη τιμή. Στη συνέχεια, με περεταίρω αύξηση της έντασης πεδίου, η τάση εξ επαγωγής θα είναι μεγαλύτερη από την τάση δικτύου και το ρεύμα οπλισμού θα αρχίσει να αυξάνεται. Παράλληλα, μεταβάλλεται και η φάση του ρεύματος, από επαγωγική, σε μηδενική και τελικά σε χωρητική. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα [19]:



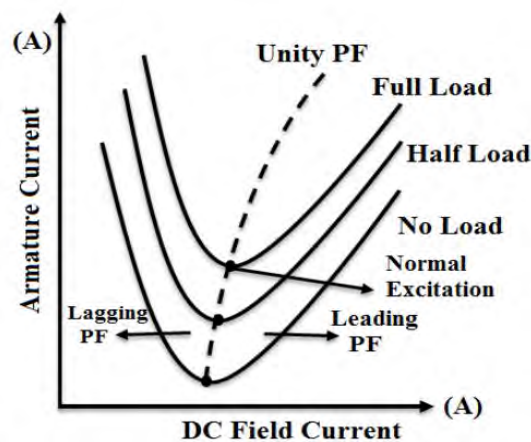
Εικόνα 43: Υποδιέγερση. Το ρεύμα ακολουθεί την τάση εισόδου η οποία είναι μεγαλύτερη της επαγόμενης. Ο κινητήρας απορροφά VAR από το δίκτυο. (ΠΗΓΗ: http://www.ee.hacettepe.edu.tr/~usezen/eem473/synchronous_machines-1p.pdf)



Εικόνα 44: Υπερδιέγερση. Το ρεύμα προπορεύεται της τάσης εισόδου η οποία είναι μικρότερη της επαγόμενης. Ο κινητήρας προσφέρει VAR ισχύος στο δίκτυο.

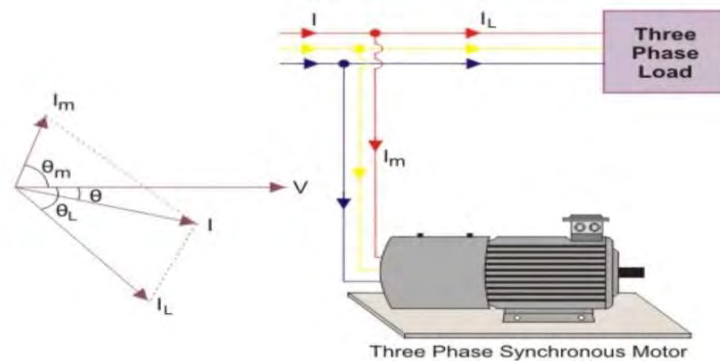


Εικόνα 45: Μεταβολή έντασης και φάσης ρεύματος οπλισμού από υποδιέγερση σε υπερδιέγερση κατά την αύξηση της επαγόμενης τάσης για σταθερό φορτίο. (ΠΗΓΗ: <https://ijsea.com/archive/volume3/issue3/IJSEA03031002.pdf>)



Εικόνα 46: Γραφική συνάρτηση ρεύματος οπλισμού και συντελεστή ισχύος για διάφορα φορτία ως προς το ρεύμα διέγερσης. Για μηδενικό φορτίο παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές στις εντάσεις και το ολικό ελάχιστο για συντελεστή ίσο με τη μονάδα. (ΠΗΓΗ: <https://www.electricaldeck.com>)

Ο κινητήρας συνδέεται παράλληλα σε τριφασικά φορτία. Ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου μεταβάλλει την αντίσταση διέγερσης R_F ρυθμίζοντας την ένταση I_F και τελικά την τάση E_A για ρύθμιση του συντελεστή, ανάλογα με τα στιγμιαία απαιτούμενα VAR ισχύος.



Εικόνα 47: Σύγχρονος συμπακκωτής σαν φίλτρο απόσβεσης άεργων ρευμάτων. (ΠΗΓΗ: <https://www.electrical4u.com>)

Τα πλεονεκτήματα των αντισταθμιστών είναι [20]:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής (έως και 25 έτη)
- Αξιοπιστία
- Συνεχόμενη και όχι βηματική διόρθωση του συντελεστή.
- Μη συχνή συντήρηση
- Δεν παράγουν αρμονικές
- Δεν επηρεάζονται από αρμονικές

Τα μειονεκτήματά τους είναι:

- Μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης
- Ηχορύπανση
- Σε αντίθεση με τον πυκνωτή, ο σύγχρονος κινητήρας έχει ωμικές απώλειες και πρέπει να ληφθούν υπόψιν.
- Ανάγκη βοηθητικού κινητήρα καθώς δεν μπορεί να εκκινήσει μόνος.
- Πιο ακριβοί από πυκνωτές ίδιων προδιαγραφών για παροχή έως 500 kVAR



Εικόνα 48: Σύγχρονος συμπυκνωτής σε βιομηχανική εγκατάσταση. (ΠΗΓΗ: www.mepits.com)

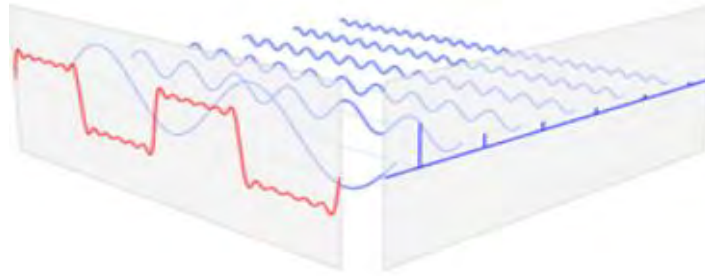
2.4 Αρμονικές

2.4.1 Θεώρημα Fourier

Στην ηλεκτροτεχνία ως αρμονική ορίζεται κύμα σήματος το οποίο ταλαντώνεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα η οποία είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας του δικτύου, δηλαδή της συχνότητας των γεννητριών, την θεμελιώδη.

$$f_{\text{harmonics}} = N \times f_{\text{fundamental}}$$

Η ανάλυση των αρμονικών αφορά τη διαδικασία εύρεσης των συχνοτήτων και φάσεων των κυμάτων που μέσω υπέρθεσης παράγουν το αλλοιωμένο σήμα. Μαθηματικά αυτό περιγράφεται από τις σειρές Fourier. Η διαδικασία πραγματοποιείται με το μετασχηματισμό Fourier η οποία εγκαθιστά μια σχέση μεταξύ μιας συνάρτησης στο πεδίο του χρόνου και μιας συνάρτησης στο πεδίο της συχνότητας.



Εικόνα 49: Ανάλυση κύματος με τον μετασχηματισμό Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. (ΠΗΓΗ: Wikipedia)

Το θεώρημα του Fourier ορίζει πως κάθε περιοδικό μη ημιτονοειδές κύμα αποσυντίθεται σε άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων δεδομένου ότι:

- Το ολοκλήρωμα μιας περιόδου έχει πεπερασμένη τιμή.
- Η συνάρτηση έχει πεπερασμένο αριθμό ασυνεχειών σε μια περίοδο.
- Η συνάρτηση έχει πεπερασμένο αριθμό μεγίστων και ελαχίστων σε μια περίοδο.

Η σειρά Fourier για μια περιοδική συνάρτηση σε καρτεσιανές συντεταγμένες ορίζεται ως :

$$s_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) \right] \quad (2.75)$$

ή στη μορφή πλάτους-φάσης:

$$s_n(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{P} - \varphi_n\right) \right] \quad (2.76)$$

οπου:

- $A_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{P} - \varphi_n\right)$ = η νιοστή αρμονική
- A_n = πλάτος νιοστής αρμονικής
- φ_n = φάση νιοστής αρμονικής
- $\frac{A_0}{2}$ = μέση τιμή της $x(t)$. Καλείται μηδενική αρμονική ή συνεχές τμήμα.

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (50) από το x_0 έως P :

$$X_f(t) = \frac{2}{P} \int_{x_0}^{x_0+P} s(x) \cos(2\pi f(x-t)) dx, \quad t \in \left[0, \frac{2\pi}{f}\right] \quad (2.77)$$

Το μέγιστο της $X_f(t)$ είναι το πλάτος (A) συχνότητας (f) στη συνάρτηση $s(x)$ και η τιμή του (t) στο μέγιστο καθορίζει την φάση (φ) της συχνότητας. Αντικαθιστούμε την ταυτότητα:

$$\cos\left(\frac{2\pi nx}{P} - \varphi_n\right) = \cos \varphi_n + \cos\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) + \sin \varphi_n + \sin\left(\frac{2\pi nx}{P}\right)$$

στην εξίσωση (51) και προκύπτει:

$$X_n(\varphi) = \frac{2}{P} \int_P s(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{P} - \varphi\right) dx \Rightarrow$$

$$X_n(\varphi) = \cos(\varphi) \frac{2}{P} \int_P s(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) dx + \sin(\varphi) \frac{2}{P} \int_P s(x) \sin\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) dx \Rightarrow$$

$$X_n(\varphi) = \cos(\varphi) \alpha_n + \sin(\varphi) b_n$$

Η παράγωγος της $X_n(\varphi)$ μηδενίζεται στη φάση της μέγιστης συσχέτισης:

$$X'_n(\varphi_n) = \sin(\varphi_n) \alpha_n - \cos(\varphi_n) b_n = 0 \Rightarrow$$

$$\tan(\varphi_n) = \frac{b_n}{\alpha_n} \Rightarrow$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{\alpha_n}\right)$$

Η μέγιστη τιμή συσχέτισης είναι:

$$A_n \triangleq X_n(\varphi_n) = \cos(\varphi_n) \alpha_n + \sin(\varphi_n) b_n \Rightarrow$$

$$A_n \triangleq X_n(\varphi_n) = \frac{\alpha_n}{\sqrt{\alpha_n^2 + b_n^2}} \alpha_n + \frac{b_n}{\sqrt{\alpha_n^2 + b_n^2}} b_n = \frac{\alpha_n^2 + b_n^2}{\sqrt{\alpha_n^2 + b_n^2}} \Rightarrow$$

$$A_n \triangleq X_n(\varphi_n) = \sqrt{\alpha_n^2 + b_n^2}$$

Τα α_n και b_n είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες ενός διανύσματος μιας αρμονικής με πολικές συντεταγμένες (A_n, φ_n) , με μέτρο και φάση:

$$A_n = \sqrt{\alpha_n^2 + b_n^2} \quad \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{\alpha_n}\right) \quad (2.78)$$

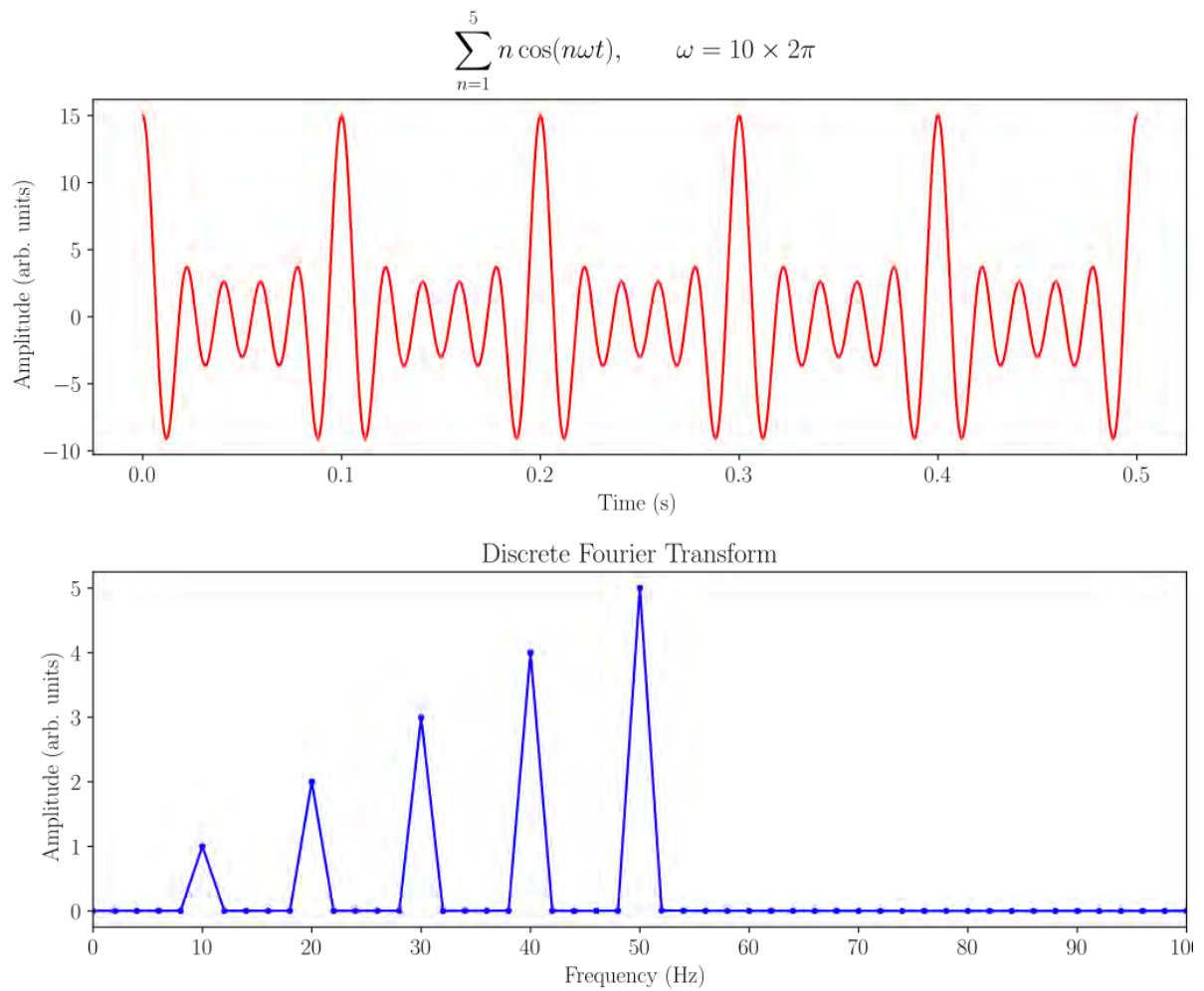
Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier πραγματοποιούμε φασματική ανάλυση «αποκαλύπτοντας» τα επιμέρους «συστατικά» ενός κύματος στο πεδίο της συχνότητας:

$$f(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j2\pi x \xi} dx$$

Στην πράξη, τα όργανα μετρήσεων, και τα λογισμικά γενικότερα, χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform (FFT) που εκτελεί διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT):

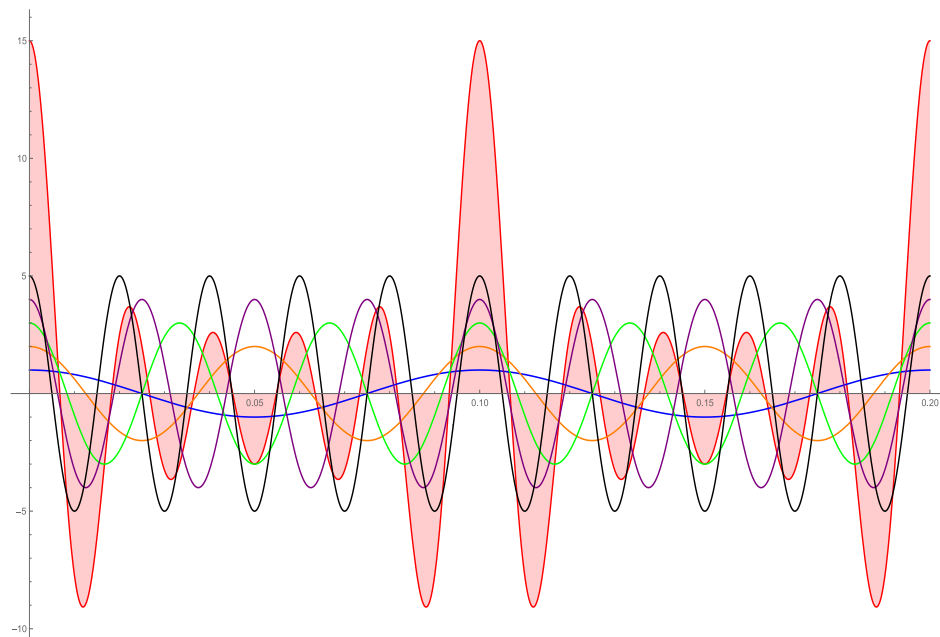
$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$	(2.79)
---	--------

Ο DFT περιλαμβάνει μόνο θετικές συχνότητες σε ένα πεπερασμένο εύρος, μη συνεχές (διακριτό). Στην εικ.50 παρουσιάζεται παράδειγμα φασματικής διακριτής ανάλυσης:



Εικόνα 50: Διακριτή φασματική ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας. «Αποσύνθεση» παραμορφωμένου κύματος σε επιμέρους αρμονικές: 10Hz με $A_1=1$, 20Hz με $A_2=2$, 30Hz με $A_3=3$, 40Hz με $A_4=4$ και 50Hz με $A_5=5$. (ΠΗΓΗ: wikipedia.com)

Αντιστρόφως, η επαλληλία των 5 αρμονικών συνθέτει το αρχικό κύμα:



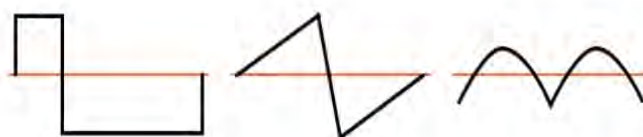
Εικόνα 51: Υπέρθεση των 5 αρμονικών στο πεδίο του χρόνου της εικ.39.
 $f(t) = \cos(\omega t) + 2 \cos(2\omega t) + 3 \cos(3\omega t) + 4 \cos(4\omega t) + 5 \cos(5\omega t)$

2.4.2 Κατηγορίες αρμονικών

Ανάλογα με το είδος της παραμόρφωσης μπορεί να γίνει εκτίμηση των υπαρχουσών αρμονικών. Για παράδειγμα, τα πριονοδόντια κύματα περιέχουν αρμονικές υψηλής τάξης. Επιπλέον το είδος των αρμονικών καθορίζει την ύπαρξη της συμμετρίας. Συγκεκριμένα, όταν υπάρχουν μόνο περιττές συχνότητες ($3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$, $7^{\text{η}}$, κοκ), το τελικό κύμα είναι συμμετρικό ενώ στην ύπαρξη άρτιων αρμονικών ($2^{\text{η}}$, $4^{\text{η}}$, $6^{\text{η}}$ κοκ) το κύμα είναι ασύμμετρο ενώ αποτελεί ένδειξη ύπαρξης συνεχούς ρεύματος. Κατά κύριο λόγο, στη πράξη οι παραμορφώσεις είναι συμμετρικές που σημαίνει ότι κατά βάση συναντώνται περιττές αρμονικές. Εκτός αυτού, οι άρτιες αρμονικές τείνουν να αλληλοεξουδετερώνονται.



Εικόνα 52: Συμμετρικά κύματα από επαλληλία περιττών συχνοτήτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το θεμελιώδες κύμα $1^{\text{η}}$ ς αρμονικής. (πρώτο από δεξιά) (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC)



Εικόνα 53: Μη συμμετρικά κύματα υποδηλώνουν ύπαρξη άρτιων αρμονικών. (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC)

Στα τριφασικά κυκλώματα οι αρμονικές χαρακτηρίζονται και από την ακολουθία τους (harmonic sequence). Αφορά το στρεφόμενο διάνυσμα τους σε σχέση με της θεμελιώδους συχνότητας σε ισορροπημένο τριφασικό σύστημα. Κατηγοριοποιούνται σε θετικής, αρνητικής και ουδέτερης πολικότητας (τριπλές). Στις θετικές αρμονικές, η σειρά των φάσεων είναι ίδια με της θεμελιώδους ενώ των αρνητικών αντίθετη. Οι τριπλές χαρακτηρίζονται από μηδενική περιστροφή δηλαδή οι τρεις φάσεις του συμπίπτουν. Η πολικότητα των αρμονικών επηρεάζει κυρίως τους κινητήρες. Οι θετικές αποτελούν τις αρμονικές που ανήκουν στην ακολουθία:

$$f_n = f_1 \times (3n - 2)$$

Οι αρνητικές ανήκουν στην ακολουθία:

$$f_n = f_1 \times (3n - 1)$$

ενώ οι τριπλές αποτελούν πολλαπλάσια της $3^{\text{ης}}$:

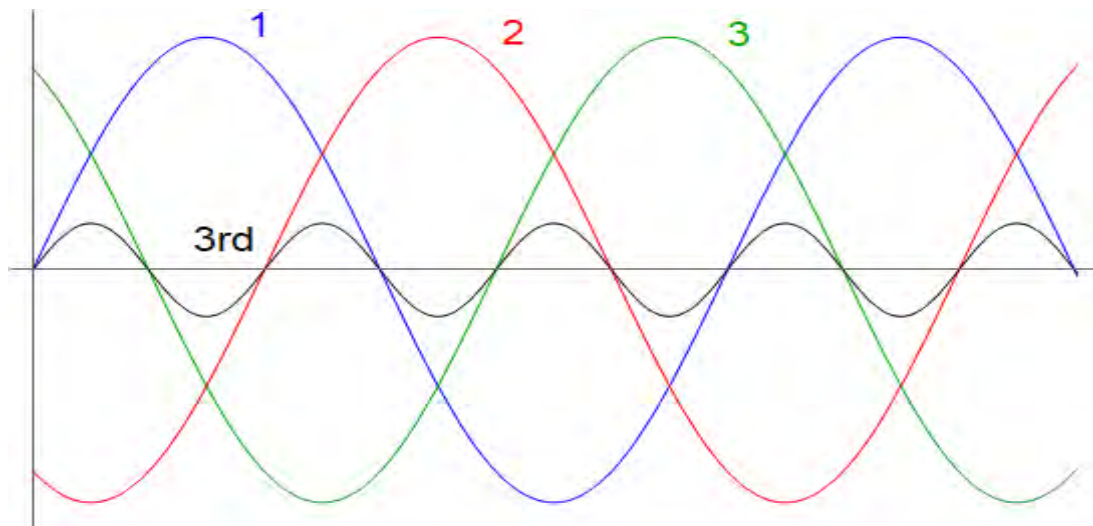
$$f_n = f_3 \times n$$

Οι αρμονικές θετικής πολικότητας αν και δεν επιβραδύνουν τους κινητήρες, υπερφορτώνουν γενικότερα τους αγωγούς, τους μετασχηματιστές, τους κινητήρες, τις ασφάλειες κ.α. αυξάνοντας τη θερμοκρασία και προκαλώντας βλάβες.

Οι αρμονικές αρνητικής πολικότητας έχουν την ίδια επιρροή με τις θετικές. Ωστόσο, καταπονούν περισσότερο τους ηλεκτροκινητήρες, ειδικά τους επαγωγικούς, αποδυναμώνοντας το μαγνητικό τους πεδίο και μειώνοντάς την ροπή εξόδου τους. Ακόμα και αν δεν είναι ικανές να αντιστρέψουν την περιστροφή, οδηγούν σε επιπλέον κατανάλωση

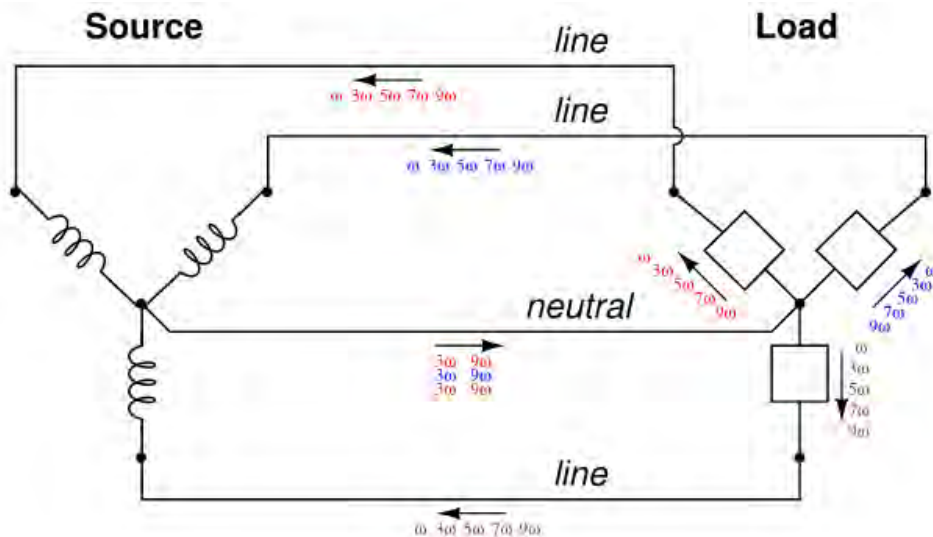
ηλεκτρικού ρεύματος για αντιστάθμιση της ροπής. Ως αποτέλεσμα οι κινητήρες επιβαρύνονται ακόμα περισσότερο από υψηλές θερμοκρασίες και δονήσεις. Από τις πιο συχνές που απαντώνται στα συστήματα είναι η 5^η.

Η υπερφόρτωση του ουδέτερου αποτελεί σοβαρό πρόβλημα που οφείλεται στις τριπλές. Συγκεκριμένα οι τρεις φάσεις των αρμονικών αυτών συμπίπτουν η μία πάνω στην άλλη εξού και η μη περιστροφή. Αν σχεδιάζαμε μία φάση μίας τριπλής, για παράδειγμα της 3^{ης} αρμονικής, μαζί με τις τρεις φάσεις της θεμελιώδους θα παρατηρούσαμε πως για κάθε μισό κύκλο κάθε φάσης ισοδυναμεί ακριβώς ενάμισης κύκλος της φάσης της αρμονικής που ισοδυναμεί με τη διαφορά φάσης των φάσεων της θεμελιώδους. Αυτό παρουσιάζεται γραφικά στην εικ.54.



Εικόνα 54: Φάσεις θεμελιώδους και μία φάση τρίτης αρμονικής. Οι υπόλοιπες δύο φάσεις της 3^{ης} συμπίπτουν ακριβώς πάνω στην πρώτη.

Αυτό συνεπάγεται ότι οι κυματομορφές των φάσεων της τρίτης αρμονικής για ένα τριφασικό σύστημα συμπίπτουν. Η διαφορά 120 μοιρών των φάσεων ισχύει μόνο για την θεμελιώδη συχνότητα. Η χάραξη των τριών φάσεων της 3^{ης} θα ήταν ίδια με την μονή φάση της εικ.54. Μαθηματικά αυτό συμβαίνει διότι οι φάσεις της 3^{ης} αρμονικής «ταλαντώνονται» τρεις φορές γρηγορότερα από τις θεμελιώδεις και ως αποτέλεσμα η διαφορά φάσης θα είναι τρεις φορές της θεμελιώδους. Άρα μεταξύ πρώτης και δεύτερης φάσης θα είναι 360° και μεταξύ τρίτης και πρώτης 720°, συνεπώς συμπίπτουν. Γενικά, η μετατόπιση μεταξύ κυματομορφών μπορεί να εκφραστεί επακριβώς μέσω της διαφοράς φάσης (phase shift) στο πεδίο της συχνότητας μόνο όταν οι γωνιακές ταχύτητες είναι ίδιες. Όταν γίνεται συσχέτιση μεταξύ κυματομορφών διαφορετικών συχνοτήτων ο κατάλληλος τρόπος είναι να γίνει σύγκριση στο πεδίο του χρόνου (time shift). Ως εκ τούτου, η μετατόπιση ως προς τον χρόνο για τις φάσεις της 3^{ης} αρμονικής ισοδυναμεί με διαφορά, ως προς την φάση, των 120°, αλλά για τρεις φορές χαμηλότερη συχνότητα. Επιστρέφοντας στο πρόβλημα του ουδέτερου, τελικά, υπερφορτώνεται με ρεύμα της 3^{ης} αρμονικής, το οποίο είναι έντασης τρεις φορές μεγαλύτερη των φάσεων αφού οι τριπλές αρμονικές προστίθενται στον ουδέτερο όντας συμφασικές. Δεδομένου πως στην πράξη συναντώνται κυρίως περιττές αρμονικές, ιδιαίτερο ενδιαφέρουν παρουσιάζουν η 3^η, 9^η και 15^η. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μη γραμμικού φορτίου που παράγει αρμονικές 3^{ης} είναι οι προσωπικοί υπολογιστές (PCs). Η υπερφόρτωση του ουδέτερου εγκυμονεί πιθανότητες πυρκαγιάς και καθιστά την προσεκτική διαστασιολόγηση του και την απόσβεση των τριπλών αρμονικών πολύ σημαντικές.



Εικόνα 55: Τριφασική πηγή και φορτίο σε σύνδεση αστέρα. Τα ρεύματα των τριπλών αρμονικών κάθε φάσης προστίθενται στον ουδέτερο. (ΠΗΓΗ: Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC)

Με την έλλειψη ουδετέρου οι τριπλές δεν εξαφανίζονται. Αντίθετα προκαλούν νέα προβλήματα όπως ανομοιόμορφες μεταβολές στην τάση των φάσεων.

Αρμονική	Φάση Α	Φάση Β	Φάση Γ	Σειρά
Θεμελιώδης	0°	120°	240°	A-B-Γ, θετική
3 ^η	0°	360°	720°	Μηδενική
5 ^η	0°	600° = 720 – 120	1200° = 1440 – 240	Γ-B-A, αρνητική
7 ^η	0°	840° = 720 + 120	1680° = 1440 + 240	A-B-Γ, θετική
9 ^η	0°	1080°	2160°	Μηδενική
11 ^η	0°	1320° = 1440 – 120	2640°=2520+120	Γ-B-A, αρνητική

Πίνακας 8: Φάσεις και πολικότητα συνήθων αρμονικών.

2.4.3 Συντελεστής παραμόρφωσης

Τα ρεύματα πέρα της θεμελιώδους αυξάνουν την τιμή RMS της έντασης. Απόρροια αυτού είναι η αύξηση κατανάλωσης άεργης ισχύος. Συνεπώς, αυτό οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ισχύος. Άρα, εκτός από τα άεργα ρεύματα της θεμελιώδους συχνότητας, η άεργη ισχύς έχει δεύτερο παράγοντα, τις αρμονικές. Η συνολική άεργη ισχύς είναι:

$$Q_{total} = \sqrt{Q^2 + H^2}$$

Όπου H τα VAR αρμονικών. Συνεπώς η φαινόμενη ισχύς θα είναι:

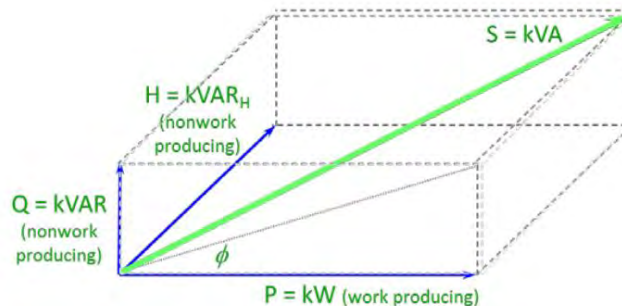
$$S = \sqrt{P^2 + Q_{total}^2} \Rightarrow$$

$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2}$	(2.80)
------------------------------	---------------

Με την επιρροή των αρμονικών, ο λόγος της πραγματικής προς την φαινόμενη είναι ο πραγματικός συντελεστής ισχύος και όχι το συνημίτονο:

$PF_T = \frac{ P }{ S }$	(2.81)
--------------------------	--------

Διανυσματικά παρουσιάζεται στην εικ.56:



Εικόνα 56: Διάνυσμα φαινόμενης ισχύος με την επιρροή τόσο της διαφοράς φάσης όσο και των αρμονικών. Η άεργη ισχύς έχει δύο συνιστώσες, Q και H. (ΠΗΓΗ: Mirus international Inc.)

Η συνολική επιρροή των αρμονικών στην αλλοίωση του σήματος περιγράφεται από τον συνολικό συντελεστή παραμόρφωσης. Είναι ο λόγος της ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των πλατών (RMS) των αρμονικών προς το πλάτος της θεμελιώδους. Τα πλάτη των αρμονικών προέρχονται από την φασματική ανάλυση.

$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n A_{rms_i}^2}}{A_{rms_1}}$	(2.82)
---	--------

Η παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί και για μεμονωμένη αρμονική ή ένα εύρος αρμονικών. Στους πίνακες 9 και 10 αναγράφονται τα εύρη των παραμορφώσεων για τάση και ένταση.

THD (I) έντασης	
<10%	Χαμηλές παραμορφώσεις.
10%-50%	Σημαντικές παραμορφώσεις. Αύξηση θερμοκρασίας και ειδική διαστασιολόγηση εξοπλισμού. Χρήσιμη η εγκατάσταση ειδικών φίλτρων.
>50%	Καταστροφική παραμόρφωση. Εξαιρετική καταπόνηση και άμεση φθορά στον εξοπλισμό. Άμεση εγκατάσταση ειδικών φίλτρων.

Πίνακας 9: Παραμορφώσεις έντασης σε διάφορα εύρη. (ΠΗΓΗ: Schneider Electric)

THD (V) τάσης	
<5%	Χαμηλή παραμόρφωση της τάσης.
5%-8%	Σημαντική παραμόρφωση. Χρήσιμη η εγκατάσταση ειδικών φίλτρων.
>8%	Καταστροφική παραμόρφωση. Άμεση εγκατάσταση ειδικών φίλτρων.

Πίνακας 10: Παραμορφώσεις τάσης σε διάφορα εύρη. (ΠΗΓΗ: Schneider Electric.)

Η IEEE ορίζει για καταναλωτές μέσης τάσης, μέγιστο όριο συνολικής παραμόρφωσης τάσης 5% για κανονική λειτουργία (συνθήκες που διαρκούν τουλάχιστον μία ώρα). Επιπλέον για νοσοκομεία και αεροδρόμια, που αποτελούν ειδικές περιπτώσεις, το όριο είναι 3%. [21]

Με τον υπολογισμό της παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής παραμόρφωσης:

$$PF_H = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

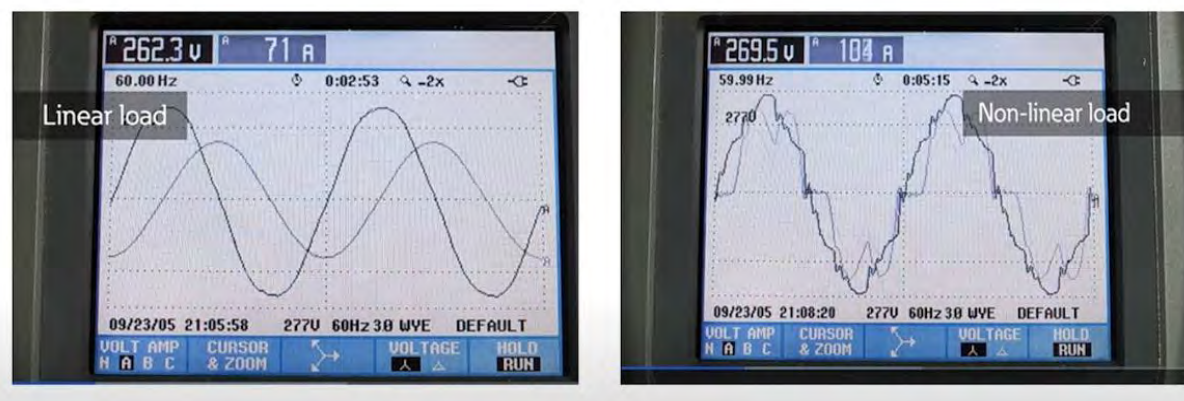
Ο πραγματικός συντελεστής θα είναι:

$$PF_T = PF_H \times PF_D$$

$PF_T = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}}$	(2.83)
--	--------

2.5 Μη γραμμικά φορτία

Τα μη γραμμικά φορτία είναι η πηγή αρμονικών ρευμάτων. Με τον όρο μη γραμμικά φορτία, περιγράφουμε φορτία των οποίων η ένταση του ρεύματος που τα διαρρέει δεν ακολουθεί τη μορφή της τάσης εισόδου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στον τρόπο που καταναλώνουν ρεύμα. Υπάρχουν μη γραμμικά φορτία που καταναλώνουν συνεχές ρεύμα όπως οι λαμπτήρες εκκένωσης και φορτία που καταναλώνουν ρεύμα με μη συνεχή τρόπο (παλμοί). Τα τελευταία αφορούν κυρίως ηλεκτρονικά ισχύος (θυρίστορ, τρανζίστορ, δίοδοι κ.τ.λ.) και είναι τα πιο προβληματικά ως προς την παραγωγή αρμονικών ρευμάτων. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα και τη παραμόρφωση της τάσης που ελλοχεύει σοβαρούς κινδύνους διότι οι τιμές κορυφής καθώς και οι τιμές RMS μεταβάλλονται από το φυσιολογικό. Ως παραμόρφωση ορίζεται από την IEEE 1159-2019 η οποιαδήποτε απόκλιση σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, από το ιδανικό ημιτονοειδές κύμα.



Εικόνα 57: Κυματομορφές τάσης και έντασης σε γραμμικό (αριστερά) και μη γραμμικό φορτίο (δεξιά). (ΠΗΓΗ: Eaton.com)

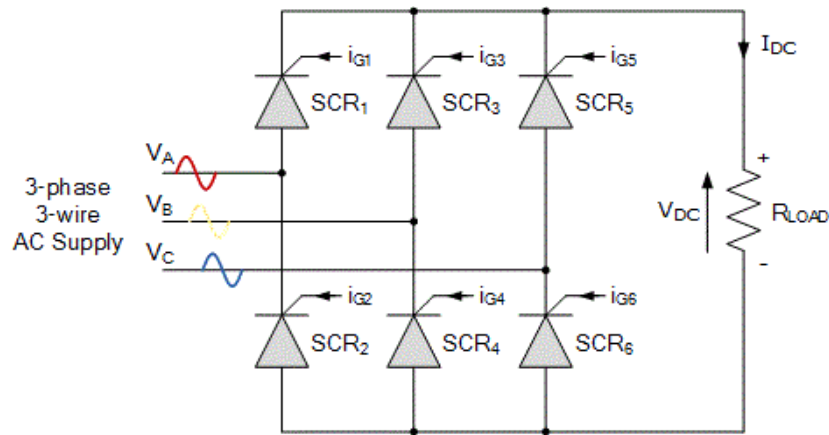
Συνήθεις μη γραμμικά αποτελούν :

- Ανορθωτές
- Αντισταθμιστές στατικών ροών (SVC)
- Φούρνοι τόξου (EAF)
- Τροφοδοτικά switch-mode
- Διαμορφωτές πλάτους παλμού (PWM)

- Αδιάλειπτα τροφοδοτικά (UPS)
- Οδηγοί ηλεκτροκινητήρων

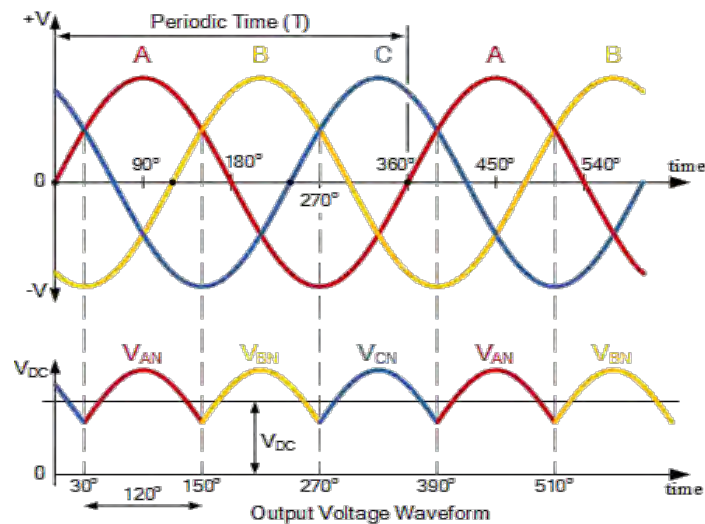
2.5.1 Ανορθωτής

Ο ανορθωτής απαντάται πολύ συχνά στις βιομηχανίες καθώς αποτελεί τόσο εξάρτημα οδηγών όσο και μετατροπέας ισχύος για φορτία συνεχούς ρεύματος όπως υπολογιστές που ελέγχουν συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Στην εικ.58 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα τριφασικού ανορθωτή μισού κύματος. Άμεσα παρατηρείται μη γραμμική φύση του από την ύπαρξη διόδων.



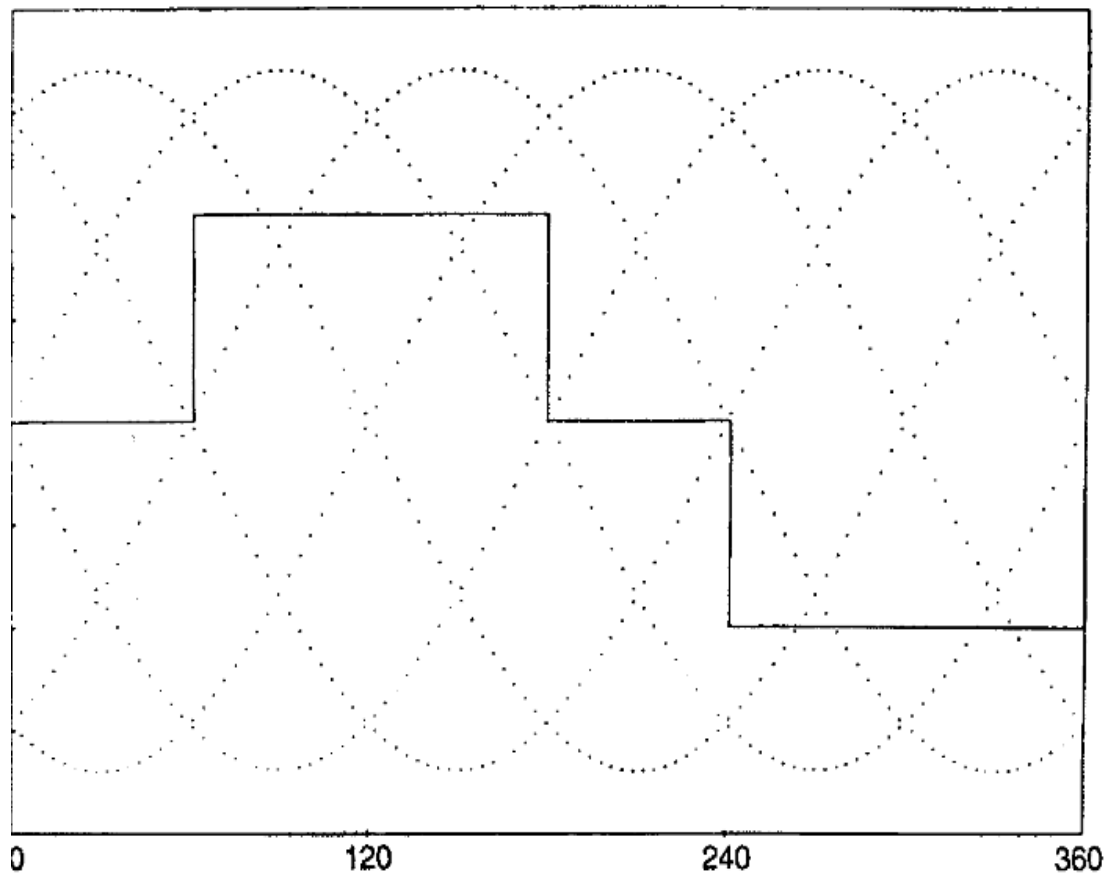
Εικόνα 58: Κύκλωμα τριφασικού ανορθωτή γέφυρας μισού κύματος. (ΠΗΓΗ: electronics-tutorials.com)

Η τάση εξόδου του ανορθωτή παρουσιάζεται στην εικ.59:



Εικόνα 59: Τάση εξόδου τριφασικού ανορθωτή γέφυρας. (ΠΗΓΗ: electronics-tutorials.com)

Το ιδανικό Ε.Ρ. του ανορθωτή παρουσιάζεται στην εικ.60. Υποθέτουμε πως το συνεχές ρεύμα δεν περιέχει κυματισμούς. Επιπλέον μεταφέρεται από μία φάση σε άλλη τη στιγμή που η τάση της επόμενης ξεπεράσει την τάση της εξερχόμενης.



Εικόνα 60: Ιδανική κυματομορφή Ε.Ρ. ρεύματος του ανορθωτή τετραγωνικού κύματος. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control)

Η σχέση για τις αρμονικές που εμπεριέχονται στο κύμα είναι:

$$h = kq \pm 1$$

όπου:

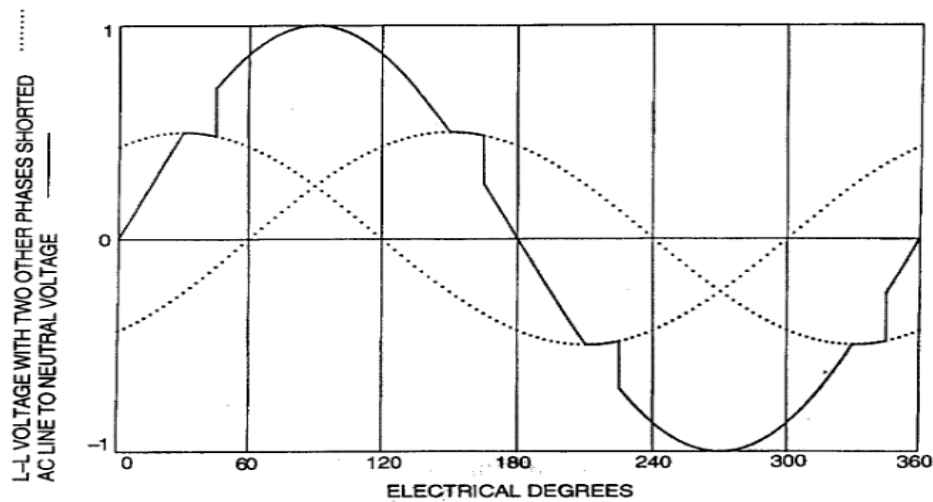
- h =βαθμός αρμονικής
- k =ακέραιος θετικός αριθμός
- q =αριθμός παλμών του ανορθωτή

Το πλάτος των αρμονικών είναι:

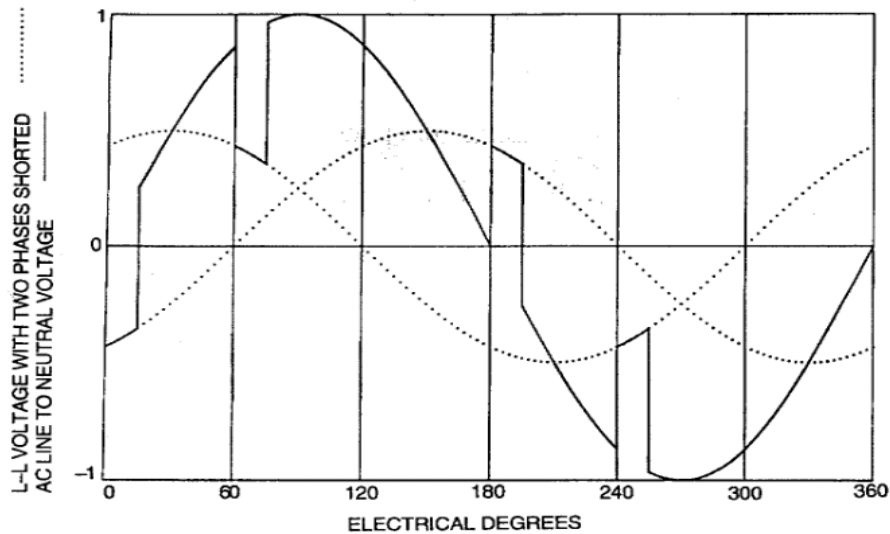
$$I_h = \frac{I_0}{h}$$

με I_0 το πλάτος της θεμελιώδους.

Όταν υπάρχουν επαγωγικές αντιδράσεις στη τροφοδοσία του ανορθωτή οι συνθήκες που περιεγράφηκαν δεν ισχύουν και το κύμα παύει να είναι τετραγωνικό. Η επαγωγικότητα καθυστερεί το «κλείσιμο» των διόδων (ή θυρίστορ) με αποτέλεσμα να μην διακόπτεται η τροφοδοσία της τρέχουσας φάσης όταν η τάση της επόμενης γίνει μεγαλύτερη. Η τάση παρουσιάζει εντονότερες εγκοπές (notches) στη κυματομορφή της για μεγαλύτερη καθυστέρηση.[21]



Εικόνα 61: Τάση γραμμής-ουδετέρου λόγω δυσλειτουργίας των ημιαγωγών. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control)



Εικόνα 62: Τάση γραμμής-ουδετέρου για μεγαλύτερη αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των φάσεων. Παρατηρούνται εντονότερες εγχοπές. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control)

Το βάθος των «εγχοπών» σε σημεία κοντά στη πηγή ισχύος είναι ανάλογα στην εμπέδηση του συστήματος μέχρι τα σημεία αυτά. Το πλάτος είναι ίσο με την γωνία εναλλαγής (commutation angle):

$$\mu = \frac{1}{\cos[\cos \alpha - (X_s + X_t)I_d]} - \alpha$$

$$\cos \mu = 1 - \frac{2E_x}{E_{do}}$$

όπου

X_s = αντίδραση συστήματος ανά μονάδα με βάση τον μετατροπέα

X_t = αντίδραση μετασχηματιστή μετατροπέα ανά μονάδα με βάση τον μετατροπέα

I_d = συνεχές ρεύμα ανά μονάδα με βάση τον μετατροπέα

Η σχέση για τα αρμονικά ρεύματα υποθέτοντας συνεχές ρεύμα χωρίς κυματισμούς (ripples) είναι:

$$I_h = I_{dc} \left[\sqrt{\frac{6}{\pi} \frac{\sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos(2\alpha + \mu)}}{h[\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)]}} \right]$$

όπου

$$A = \frac{\sin \left[(h-1) \frac{\mu}{2} \right]}{h-1}$$

$$B = \frac{\sin \left[(h+1) \frac{\mu}{2} \right]}{h+1}$$

α: εξαρτάται από την τάση Σ.Ρ.

μ: εξαρτάται από την εμπέδηση

Το συνεχές ρεύμα που καταναλώνουν φορτία με χαμηλή επαγωγικότητα από έναν ανορθωτή, περιέχει κυματισμούς (ripples) που προέρχονται από τις αρμονικές της τάσης και σχετίζονται με τον αριθμό παλμών του ανορθωτή. Οι αρμονικές έντασης για έναν τριφασικό ανορθωτή γέφυρας συνδεδεμένο με τα εν λόγω φορτία είναι:

$$I_h = I_c \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{\sin \left(\frac{h\pi}{3} \right) \times \sin \left(h \frac{\mu}{2} \right)}{\frac{\mu}{2} h^2} + \frac{r_c g_h \cos \left(\frac{h\pi}{6} \right)}{1 - \sin \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2} \right)} \right]$$

όπου

$$g_h = \frac{\sin \left[(h+1) \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2} \right) \right]}{h+1} + \frac{\sin \left[(h-1) \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2} \right) \right]}{h-1} - \frac{2 \sin \left[h \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2} \right) \right] \sin \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2} \right)}{h}$$

I_c = τιμή συνεχούς ρεύματος στο τέλος της μεταγωγής (commutation)

$$r_c = \frac{\Delta i}{I_c}$$

Οι χαρακτηριστικές αρμονικές παράγονται όταν υπάρχουν ισορροπημένες αντιδράσεις στο σύστημα Ε.Ρ. και σωστή ενεργοποίηση των ημιαγωγών στον μετατροπέα. Όταν εμφανίζονται φαινόμενα μεταγωγής από λανθασμένη χρονική ενεργοποίηση παράγονται μη χαρακτηριστικές αρμονικές οι οποίες είναι μικρές. Ωστόσο, αν υπάρξει συντονισμός, μεγεθύνονται και προκαλούν βλάβες.

Η μείωση των αρμονικών μπορεί να επιτευχθεί με τη διαδικασία του πολλαπλασιασμού των φάσεων. Συνδέοντας παράλληλα η αριθμό ανορθωτών έξι παλμών οι οποίοι [21]:

- έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού
- έχουν μετασχηματιστές ίδιας εμπέδησης
- έχουν διαφορά φάσης ακριβώς κατά 60/η μοίρες ο ένας από τον άλλον
- ελέγχονται ακριβώς με την ίδια γωνία καθυστέρησης
- μοιράζονται το συνεχές ρεύμα του φορτίου όμοια

τότε οι χαρακτηριστικές αρμονικές της τάξεως $kq \pm 1$ θα είναι οι μόνες υπαρκτές. Πρακτικά δύο ανορθωτές δεν είναι ποτέ ίδιοι και μη χαρακτηριστικές αρμονικές θα υπάρχουν, ωστόσο θα είναι μικρές στο βαθμό που τηρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν. Για δύο ανορθωτές έχουμε 12 παλμούς, διαφορά φάσης 30 μοιρών με την μικρότερη αρμονική την 11^η. Για τρεις, έχουμε 18 παλμούς, με διαφορά φάσης 20 μοιρών με την μικρότερη την 17^η. κ.ο.κ. Στον πιν.11 παρουσιάζονται οι τυπικές αρμονικές για συνήθεις αριθμό ανορθωτών.

Αριθμός Ανορθωτών	Αριθμός Παλμών	Διαφορά φάσης	Τυπικές Αρμονικές
1	6	60	5 ^η , 7 ^η , 11 ^η , 13 ^η , 17 ^η , 19 ^η
2	12	30	11 ^η , 13 ^η , 23 ^η , 25 ^η
3	18	20	17 ^η , 19 ^η , 35 ^η , 37 ^η
4	24	15	23 ^η , 25 ^η , 47 ^η , 49 ^η

Πίνακας 11: Τυπικές αρμονικές για διαφορετικό αριθμό παλμών. (ΠΗΓΗ: 519-1992 IEEE Recommended Practice for Harmonics Control)

2.5.2 Φούρνος Τόξου

Οι φούρνοι τόξου (EAF) αποτελούν από τα πιο επιβλαβή φορτία όσο αφορά τη ποιότητα ισχύος. Η μελέτη τους έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές με πολλά διαφορετικά μοντέλα, ειδικά για το τόξο, να έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση τους. Οι απότομες μεταβολές ισχύος, ειδικά στην αρχή της τήξεως, προκαλούν σημαντικές πτώσεις τάσης, υπερτάσεις και flickering. Το ηλεκτρικό τόξο προκαλεί παραμόρφωση του ρεύματος η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό απρόβλεπτη καθώς το ρεύμα που καταναλώνεται είναι μη περιοδικό. Επιπροσθέτως, είναι και ασύμμετρο, συνεπώς υπάρχουν άρτιες αρμονικές. Κύριες αρμονικές που επικρατούν είναι η 2^η έως την 7^η. Επιπλέον, παράγονται διαρμονικές (interharmonics), συχνότητες δηλαδή που δεν αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, ωστόσο η επιρροή τους είναι μικρότερη συγκριτικά με τις προαναφερθείσες. Οι μελέτες έχουν δείξει πως καθώς η μάζα του λιωμένου μετάλλου αυξάνεται, το τόξο γίνεται πιο σταθερό, άρα και το ρεύμα. Έτσι, όσο προχωράει η διαδικασία τήξης, οι αρμονικές μειώνονται (άρα και η παραμόρφωση) καθώς επίσης επανέρχεται η συμμετρία της κυματομορφής, συνεπώς οι διαρμονικές και οι άρτιες αρμονικές ελαχιστοποιούνται επίσης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικά στοιχεία των αρμονικών από μελέτες πάνω στους EAF.

Πίνακας 12: Αρμονικές ρεύματος % της θεμελιώδους φούρνου τόξου σε δύο στάδια κύκλου τήξης [25].

Αρμονική	2	3	4	5	7
Αρχική τήξη (ενεργό τόξο)	7,7	5,8	2,5	4,2	3,1
Εξευγενισμός (σταθερό τόξο)	0,0	2,0	0,0	2,1	0,0

Στον πιν.13 παρουσιάζονται τυπικές τιμές άνω ορίων αρμονικών.

Πίνακας 13: Άνω όρια % παραγόμενων αρμονικών [25].

Αρμονικές	Τήξη	Εξευγενισμός
2 ^η	5	2
3 ^η	20	10
4 ^η	3	2
5 ^η	10	10
6 ^η	1.5	1.5

7 ^η	6	6
8 ^η	1	1
9 ^η	3	3
11 ^η	2	2
13 ^η	1	1

Στον πιν.14 παρουσιάζεται ανάλυση αρμονικών από μελέτη των Alfonso Alzate Gomez *et al*[25].

Πίνακας 14: Δείγμα αποτελεσμάτων από αρμονική ανάλυση ρεύματος σε φούρνου τόξου.

Αρμονική	Φάση Α (peak %)	Φάση Β (peak %)	Φάση Γ (peak %)
Θεμελιώδης	100	100	100
2 ^η	8.02	7.37	6.36
3 ^η	7.36	6.71	7.74
4 ^η	8.37	7.46	8.15
5 ^η	4.67	4.47	4.29
THD	13.47	11.82	11.37

2.5.3 Στατικός Αντισταθμιστής Άεργης Ισχύος

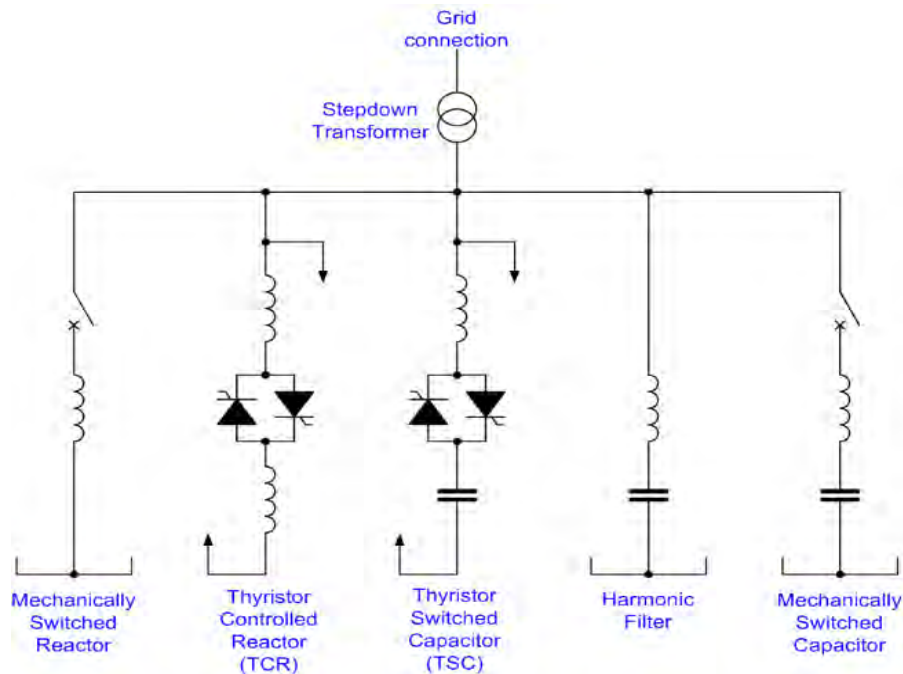
Ο στατικός αντισταθμιστής άεργης ισχύος (Static VAR Compensator) αποτελεί σύνολο ηλεκτρικών συσκευών με σκοπό την άμεση παροχή kVAR σε δίκτυα μέσης τάσης και άνω, όπως οι βιομηχανίες, με σκοπό την διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Συμπεριλαμβάνει φίλτρα αρμονικών, φίλτρα άεργης ισχύος και αντιδραστήρες (reactors), παθητικά ή ενεργά.

Η πηγή αρμονικών σε ένα SVC είναι ο ελεγχόμενος με θυρίστορ αντιδραστήρας (Thyristor Controlled Reactor-TCR) που χρησιμοποιείται εκτεταμένα ως στατικός αντισταθμιστής διακλάδωσης για συστήματα τροφοδοσίας φορτίων όπως οι ηλεκτρικοί φούρνοι τόξου για διατήρηση των επιπέδων τάσης και μείωση του flickering, βελτίωση του συντελεστή ισχύος και διατήρηση ισορροπίας μεταξύ των φάσεων. Το ρεύμα στον αντιδραστήρα είναι επαγωγικό (lagging) σχεδόν κατά 90 μοίρες και προκαλεί χρονοκαθυστερήση στην «ανάφλεξη» του θυρίστορ. Ως αποτέλεσμα, η ημιτονοειδής κυματομορφή αλλοιώνεται. Οι αρμονικές θα είναι περιττής τάξης αν η γωνία έναυσης είναι ισορροπημένη και για τα δύο θυρίστορ. Η ενεργός τιμή του ρεύματος μιας αρμονικής τάξεως h είναι:

$$I_h = \frac{4V}{\pi X} \left[\frac{\sin(h+1)}{2(h+1)} \alpha + \frac{\sin(h-1)}{2(h-1)} \alpha - \alpha \frac{\sin h}{h} \cos(\alpha) \right]$$

Όπου

- h = τάξη αρμονικής (περιττή)
- V = τάση θεμελιώδους γραμμής-γραμμής
- X = συνολική επαγωγική αντίδραση αντιδραστήρα κάθε φάσης
- α = γωνία πυροδότησης



Εικόνα 63: Τυπικός στατικός αντισταθμιστής άεργης ισχύος. Δεύτερος από τα αριστερά στη διακλάδωση είναι ο ελεγχόμενος με θυρίστορ αντιδραστήρας (TCR).

Στον πιν.15 δίνονται τα μέγιστα πλάτη αρμονικών ρευμάτων ενός ενεργού αντιδραστήρα.

Αρμονική	% πλάτος θεμελιώδους
Θεμελιώδης	100
3 ^η	13.78
5 ^η	5.05
7 ^η	2.59
9 ^η	1.57
11 ^η	1.05
13 ^η	0.75
15 ^η	0.57
17 ^η	0.44
19 ^η	0.35
21 ^η	0.29
23 ^η	0.24
25 ^η	0.2

Πίνακας 15: Μέγιστα πλάτη αρμονικών ρευμάτων TCR

Υποθέτοντας ισορροπία, οι τιμές του πιν.15 είναι ίδιες για τα ρεύματα φάσης και γραμμής. Να σημειωθεί πως, σε έναν φούρνο τόξου, όπου στην αρχή οι συνθήκες είναι ασταθείς όπως αναφέρθηκε, κάποιες τριπλές αρμονικές ρέουν στα ρεύματα γραμμής.

2.5.4 Ηλεκτρονικός έλεγχος

Ο έλεγχος της ισχύος στα φορτία μέσω των θυρίστορ προκαλεί αρμονικά ρεύματα. Ο TCR, αποτελεί τέτοια περίπτωση. Επιπλέον, γραμμικά φορτία που έχουν συντελεστή ισχύος PF_D σχεδόν ίσο με μονάδα, όπως οι αντιστάσεις, πολλές φορές ελέγχονται με θυρίστορ παράγοντας αρμονικές περιττών τάξεων. Συνεπώς, ο πραγματικός συντελεστής μειώνεται. Στη πραγματικότητα, κανένα γραμμικό φορτίο δεν είναι ιδανικό, άρα κανένα φορτίο δεν είναι απολύτως επαγωγικό ή ωμικό. Η ένταση των αρμονικών που παράγονται σε συνδιασμό

με τα θυρίστορ θα είναι ανάμεσα στις τιμές των αρμονικών των ιδανικών στοιχείων για μηδενικό PF_D και ίσο με μονάδα.

2.5.5 Κυκλομετατροπέας

Ο κυκλομετατροπέας (Cycloconverter-CCV) μετατρέπει Ε.Ρ. σε Ε.Ρ. Συγκεκριμένα, μεταβάλλει τη συχνότητα ενός κύματος. Στην είσοδο δέχεται κύμα σταθερής περιόδου και πλάτους και στην έξοδο δίνει κύμα διαφορετικής συχνότητας. Συνήθως η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη. Το χαρακτηριστικό του είναι η έλλειψη γέφυρας συνεχούς ρεύματος· η μετατροπή γίνεται απευθείας από εναλλασσόμενο σε εναλλασσόμενο. Η πιο γνωστή εφαρμογή τους στις βιομηχανίες είναι στην τσιμεντοποιία όπου τροφοδοτούν κινητήρες για τη περιστροφή μύλων τσιμέντου. Γενικά χρησιμοποιούνται σε υψηλής ισχύος και χαμηλής ταχύτητας κινητήρες με σταθερή συχνότητα εισόδου.

Οι αρμονικές που παράγουν είναι σε μεγάλο βαθμό περίπλοκες και μεταβάλλονται ανάλογα με τον λόγο των συχνοτήτων εισόδου-εξόδου. Οι συχνότητες των αρμονικών δίνονται από τον παρακάτω τύπο.

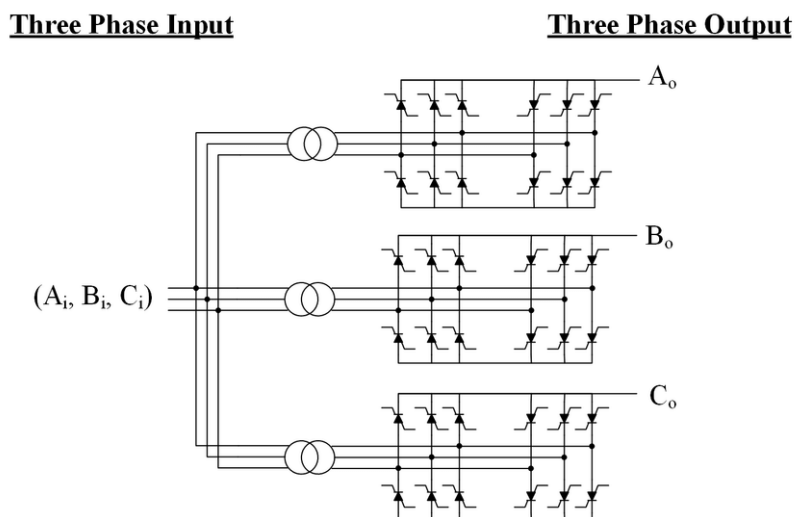
$$f_h = f_1(k q \pm 1) \pm 6 n f_0$$

Όπου

f_h = η αρμονική συχνότητα που παράγεται

f_0 = η συχνότητα εξόδου

Στην εικ.64 παρουσιάζεται διάγραμμα του κυκλώματος ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα.

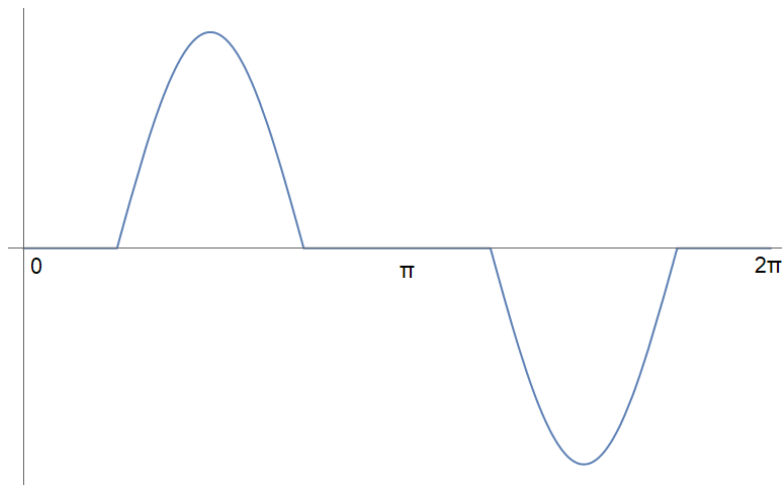


Εικόνα 64: Κύκλωμα τριφασικού κυκλομετατροπέα. (ΠΗΓΗ: Lao, Keng Weng & Nguyen, Quan & Santoso, Surya. (2018). *Power Electronic Converters for Low-Frequency HVac Transmission: Functions and Challenges*. 10.1109/PESGM.2018.8586199.)

2.5.6 Τροφοδοτικά Switch Mode

Τα τροφοδοτικά Switch mode (SMPS) χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την απαιτούμενη στιγμιαία τάση (voltage regulation) σε ευαίσθητες συσκευές Σ.Ρ. όπως οι υπολογιστές. Είναι οικονομικά και δεν επηρεάζονται από μικρές μεταβολές της τάσης του δικτύου. Κάνουν χρήση ημιαγωγών, αντί τυπικών γραμμικών στοιχείων, για τη ρύθμιση της τάσης και έχουν υψηλότερη απόδοση. Ουσιαστικά, τροφοδοτείται ένας πυκνωτής ο οποίος παρέχει την τάση στην φορτίο. Συνεπώς, το δίκτυο «βλέπει» το τροφοδοτικό σαν πυκνωτή και το ρεύμα προς το τροφοδοτικό είναι μη συνεχές· ρεύμα ρέει μόνο για μισό κύκλο. Στην

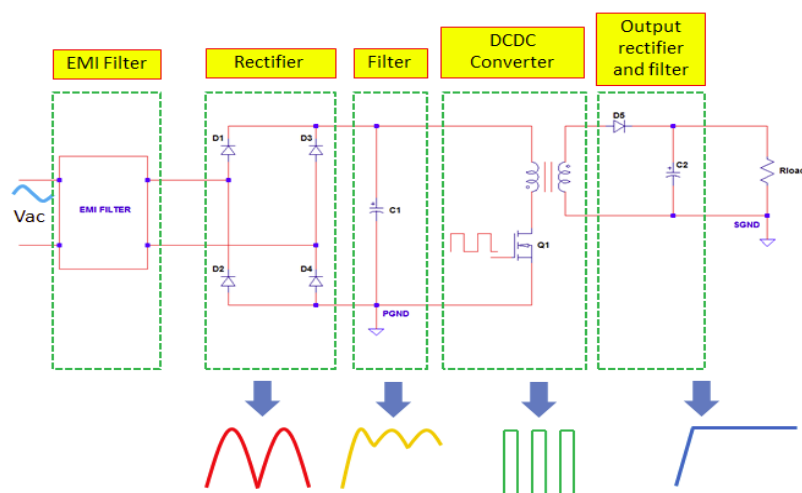
εικ.65 παρουσιάζεται η εν λόγω κυματομορφή και στον πίν.16 οι αρμονικές ενώ στην εικ.66 κύκλωμα SMPS για μετατροπή Ε.Ρ. σε Σ.Ρ.



Εικόνα 65: Τυπική κυματομορφή ρεύματος SMPS.

Αρμονική	Πλάτος% θεμελιώδους
1	1
3	0.9
5	0.606
7	0.37
9	0.157
11	0.024
13	0.063
15	0.079

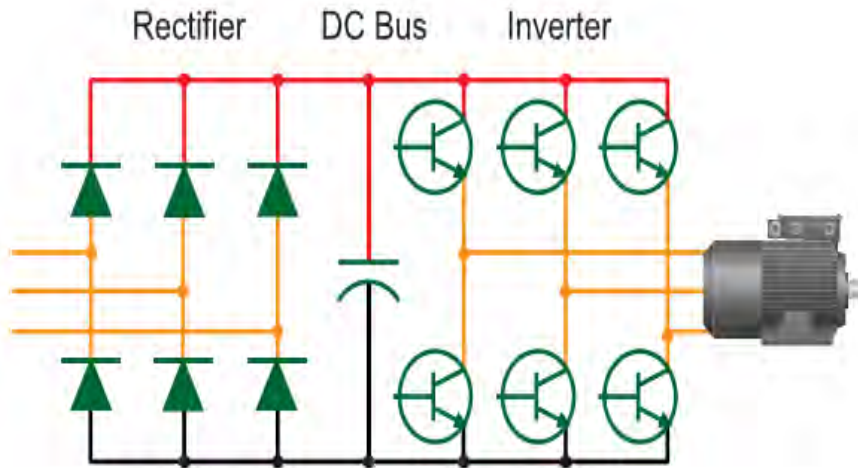
Πίνακας 16: Τυπικές αρμονικές SMPS.



Εικόνα 66: Κύκλωμα SMPS Ε.Ρ σε Σ.Ρ. Παρουσιάζονται τα 5 βασικά μέρη και η μεταβολή της κυματομορφής σε κάθε στάδιο. Στο τελικό διακρίνεται ο πυκνωτής τροφοδοσίας του φορτίου. (ΠΗΓΗ: <http://electronicsbeliever.com>)

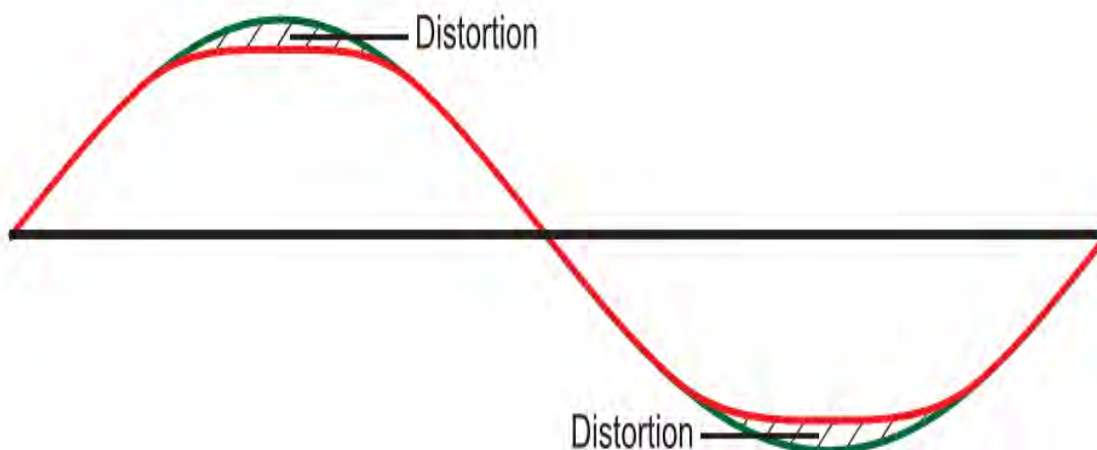
2.5.7 Ρυθμιστής Στροφών Μεταβλητού Πλάτους Παλμών

Οι ρυθμιστές στροφών μεταβλητού πλάτους παλμών (Pulse Width Modulated Variable Frequency Drives-PWM VFDs) χρησιμοποιούνται ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής των ηλεκτροκινητήρων. Στην ουσία αποτελούνται από έναν ανορθωτή (rectifier) και έναν αντιστροφέα (inverter) ανάμεσα στα οποία υπάρχει δίαιλος πυκνωτή Σ.Ρ. και όπως αναλύθηκε στη παράγραφο 2.5.1, ο ανορθωτής είναι πηγή αρμονικών ρευμάτων. Στην εικ.67 παρουσιάζεται η μορφή ενός τυπικού VFD.

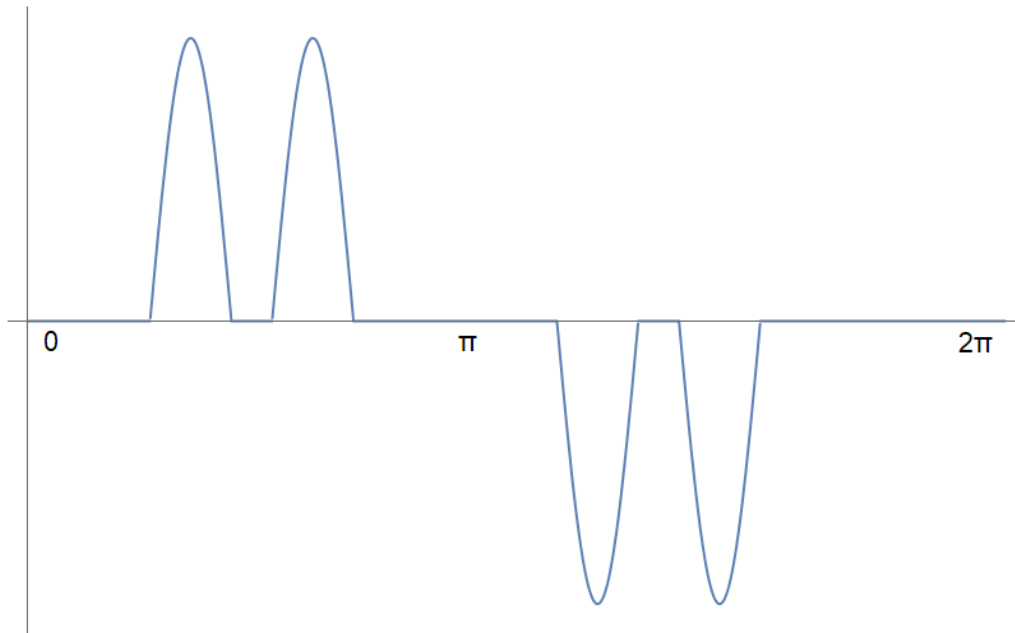


Εικόνα 67: Τυπικό κύκλωμα οδηγού ηλεκτροκινητήρα 6 παλμών. (ΠΗΓΗ: www.nidec.com)

Σε μικρά φορτία (30%-50%) ρεύμα ρέει μόνο όταν η τάση εξόδου του ανορθωτή υπερβεί την τάση του πυκνωτή. Το ρεύμα στο εναλλασσόμενο μέρος είναι μη συνεχές. Αυτό παρουσιάζεται στην εικ.58. Η διαφορά με το SMPS, είναι πως πρόκειται για τριφασικό κύκλωμα με έντονη 5^η αρμονική. Όσο το φορτίο μεγαλώνει το ρεύμα τείνει στο να γίνει συνεχές. Η παραμόρφωση του ρεύματος εισόδου σε έναν οδηγό έξι παλμών κυμαίνεται από 70% έως 100%. Επιπλέον, τα VFDs προκαλούν επιπένωση της κορυφής της τάσης που αποτελεί κίνδυνο για ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Στην εικ.68 Παρουσιάζεται το φαινόμενο.



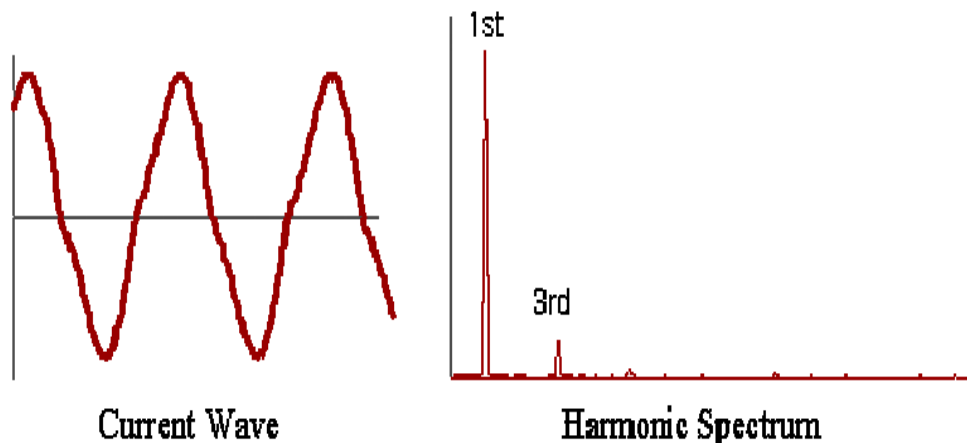
Εικόνα 68: Επιπένωση κορυφής της τάσης από οδηγούς ηλεκτροκινητήρων. Η περιοχή με πράσινη διαγράμμιση αποτελεί τη παραμόρφωση. (ΠΗΓΗ: www.nidec.com)



Εικόνα 69: Κυματομορφή ρεύματος PWM 6 παλμών σε μικρό φορτίο.

2.5.8 Λάμπες φθορισμού

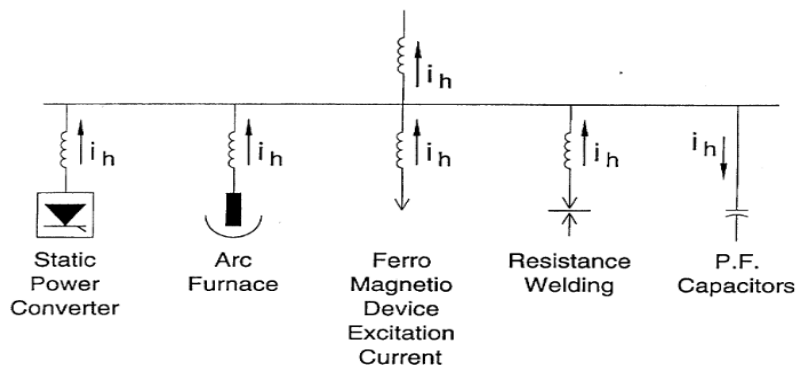
Οι λάμπες φθορισμού είναι διαδομένες σε εργοστασιακές εγκαταστάσεις για τον γενικό φωτισμό. Η κύρια αρμονική που παράγουν είναι η 3^η όπως δείχνεται στην εικ.70.



Εικόνα 70: Τυπική κυματομορφή και φασματική ανάλυση ρεύματος λάμπας φθορισμού.

2.6 Απόσβεση Αρμονικών

Οι αρμονικές συνυπάρχουν με άεργα ρεύματα της θεμελιώδους καθώς σχεδόν πάντα συνυπάρχουν γραμμικά με σημαντικό αριθμό μη γραμμικών φορτίων. Άλλοτε έχουν μεγαλύτερη επιρροή και άλλοτε μικρότερη ανάλογος τον συνδυασμό των φορτίων. Τα μη γραμμικά φορτία, όπως αυτά της προηγούμενης ενότητας, μοντελοποιούνται σαν πηγές ρευμάτων. Ο κύριος τρόπος απόσβεσης των αρμονικών σε ένα δίκτυο είναι η προσθήκη φίλτρων τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και είναι είτε παθητικά, είτε ενεργά ή συνδυασμός των δύο.

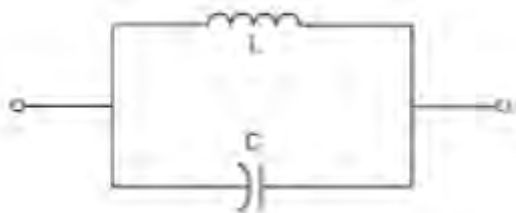


Εικόνα 71: Μοντελοποίηση μη γραμμικών φορτίων ως πηγές ρευμάτων. (ΠΗΓΗ: IEEE 519-1992)

2.6.1 Παθητικά φίλτρα

Τα παθητικά φίλτρα χωρίζονται αναλόγως με τη σύνδεση τους σε:

1. Παθητικά φίλτρα αρμονικών σειράς (Series passive harmonic filter): Συνδέονται σε σειρά ανάμεσα στο φορτίο και το υπόλοιπο δίκτυο(εικ.72). Συντονίζονται έτσι ώστε να παρέχουν μέγιστη εμπέδηση στις αρμονικές συχνότητες και μικρή στην θεμελιώδη, επιτρέποντας τη διέλευση μόνο της τελευταίας.
2. Παράλληλα παθητικά φίλτρα αρμονικών(Passive shunt harmonic filter): Αντίθετα από τα φίλτρα σειράς, συντονίζονται έτσι ώστε να παρέχουν την ελάχιστη εμπέδηση στις αρμονικές, απορροφώντας και οδηγώντας τις εκτός δικτύου(π.χ. γείωση).

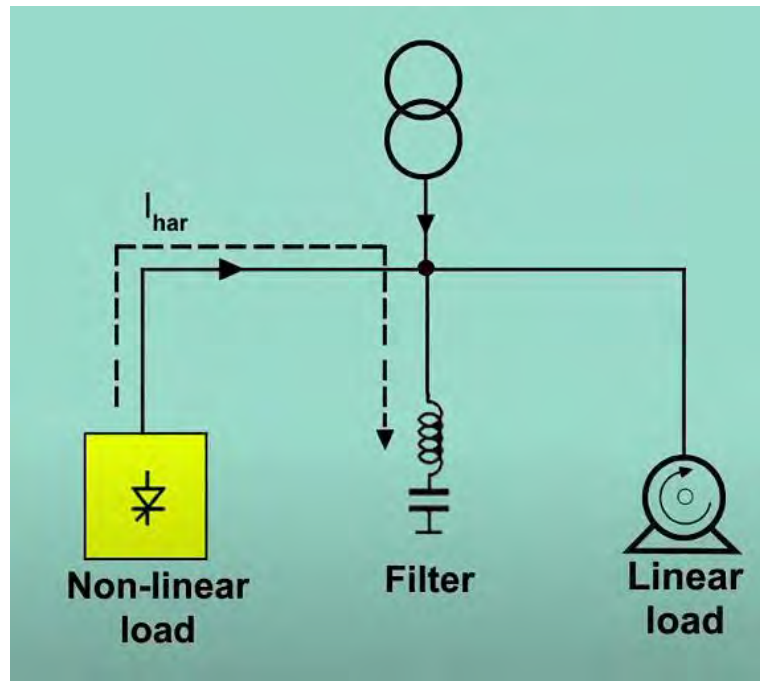


Εικόνα 72: Παθητικό φίλτρον αρμονικών σειράς.

Κυρίως επιλέγονται τα παράλληλα φίλτρα καθώς τα φίλτρα σειράς είναι ακριβότερα διότι πρέπει να διαστασιολογούνται να αντέχουν μεγαλύτερα φορτία ρεύματος επειδή δέχονται και την θεμελιώδη. Για αυτό τον λόγο η ανάλυση θα επικεντρωθεί στα παράλληλα (shunt).

Όπως αναλύθηκε και στη παράγραφο 2.1.5, τα κυκλώματα RLC συναρτήσει της συχνότητας παρουσιάζουν μεταβλητή εμπέδηση. Στο σημείο συντονισμού, αναλόγως με το σχεδιασμού για για τη συχνότητα συντονισμού παρουσιάζουν ολικό μέγιστο ή ελάχιστο της εμπέδησης. Αναλόγως την αρμονική που επιθυμούμε να αποσβήσουμε, συντονίζουμε το φίλτρο κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιείται σύνθετη αντίσταση του στην αρμονική αυτή με αποτέλεσμα το αρμονικό ρεύμα να απορροφάται. Με άλλα λόγια λειτουργούν σαν καταβόθρες. Σε συνδυασμό με τη φυσική αντίσταση του κυκλώματος, μόνο ένα μικρό ποσοστό θα φτάσει στο δίκτυο. Όντας παθητικά, είναι οικονομικά αφού στην ουσία πρόκειται για κυκλώματα LC. Επίσης μπορούν να προσφέρουν και τα απαραίτητα VAR μέσω κατάλληλης διαστασιολόγησης για διόρθωση της φάσης. Έτσι λοιπόν η χρήση τους έχει διπλό σκοπό. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να αποσβήνουν και αρμονικές κοντά στη συχνότητα συντονισμού τους, όμως μόνο υψηλότερες καθώς οι αρμονικές μικρότερης συχνότητας του

φίλτρου ενισχύονται. Τέλος, απαιτείται προσεκτική επιλογή τους ειδικά αν θα υπάρξει συντονισμός με την πηγή οδηγώντας σε επιδείνωση της ποιότητας ισχύος.

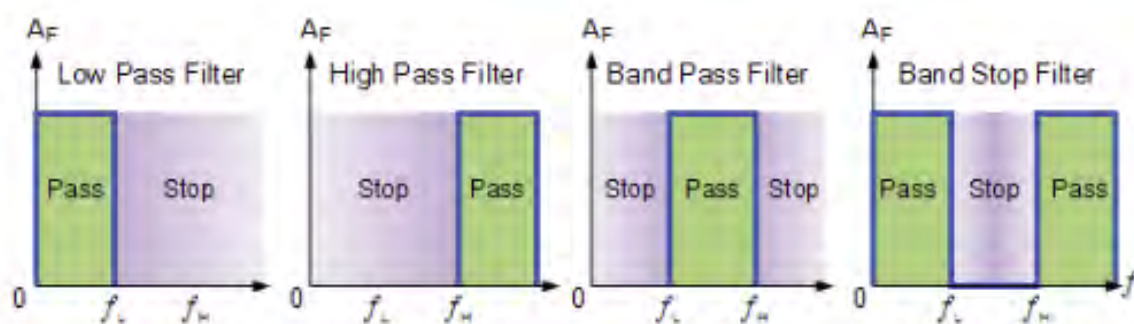


Εικόνα 73: Τυπική διάταξη παράλληλου παθητικού φίλτρου αρμονικών. Το φίλτρο απορροφά το αρμονικό ρεύμα εμποδίζοντας το να φτάσει στον υπόλοιπο εξοπλισμό.

Οι 3 βασικές κατηγορίες παράλληλων φίλτρων(shunt filters) είναι:

1. Φίλτρα μονής συχνότητας (single tuned filters),
2. Διπλής συχνότητας (double tuned filters)
3. Απόσβεσμένα (damped filters) που μπορούν να αποσβήσουν συγκεκριμένο εύρος και διακρίνονται σε 1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} τάξης (ανάλογα τους πόλους) και κατηγορίας “C”.

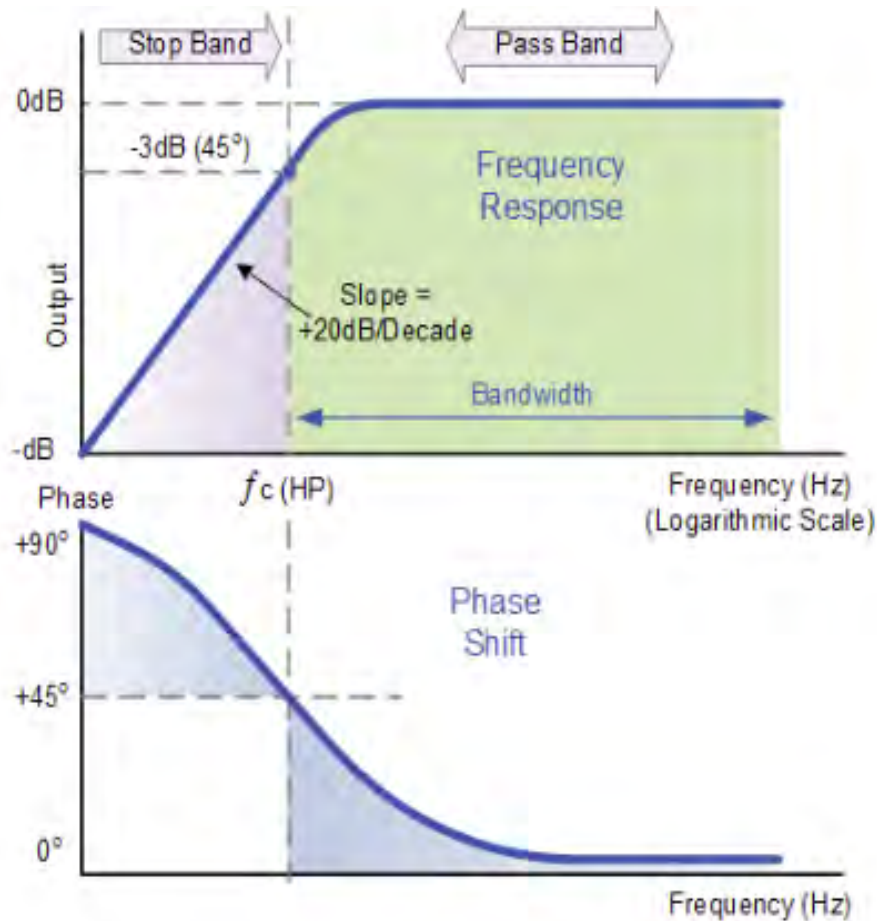
Ανάλογα με τις αρμονικές που αποσβήνουν κατηγοριοποιούνται σε υψηλών συχνοτήτων (high pass), χαμηλών συχνοτήτων (low pass), διέλευσης ζώνης (band pass) και φραγμού ζώνης (band stop). Στην εικ.74 παρουσιάζονται οι ιδανικές αποκρίσεις τους.



Εικόνα 74: Ιδανική απόκριση συχνότητας.

Τα φίλτρα υψηλών συχνοτήτων είναι σχεδιασμένα να έχουν σταθεροποιημένη εμπέδηση σε υψηλές συχνότητες και επιλέγονται για αρμονικές 5^{ης} τάξεως και άνω. Επιτρέπουν την διέλευση συχνοτήτων πάνω από την συχνότητα αποκοπής f_c (cut-off). Ο αντιστάτης δημιουργεί ασύμπτωτη συμπεριφορά στη εμπέδηση, περιορίζοντας τη μέγιστη

τιμή σε υψηλές συχνότητες. Ο συντελεστής ποιότητας είναι από 0.5 έως 2. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι αποκρίσεις συχνότητας φίλτρων υψηλών συχνοτήτων.



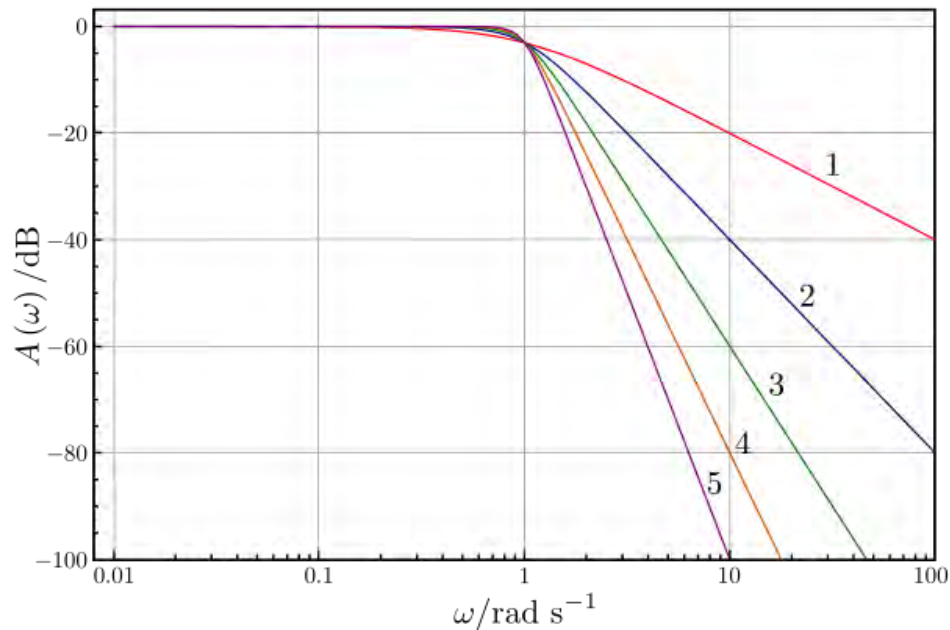
Εικόνα 75: Διαγράμματα Bode φίλτρου high-pass. (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials.ws>)



Εικόνα 76: Τυπική απόκριση συχνότητας εμπέδησης σε φίλτρο 2^{ης} τάξης high pass 11^{ης}. αρμονικής (ΠΗΓΗ: <https://www.pscad.com>)

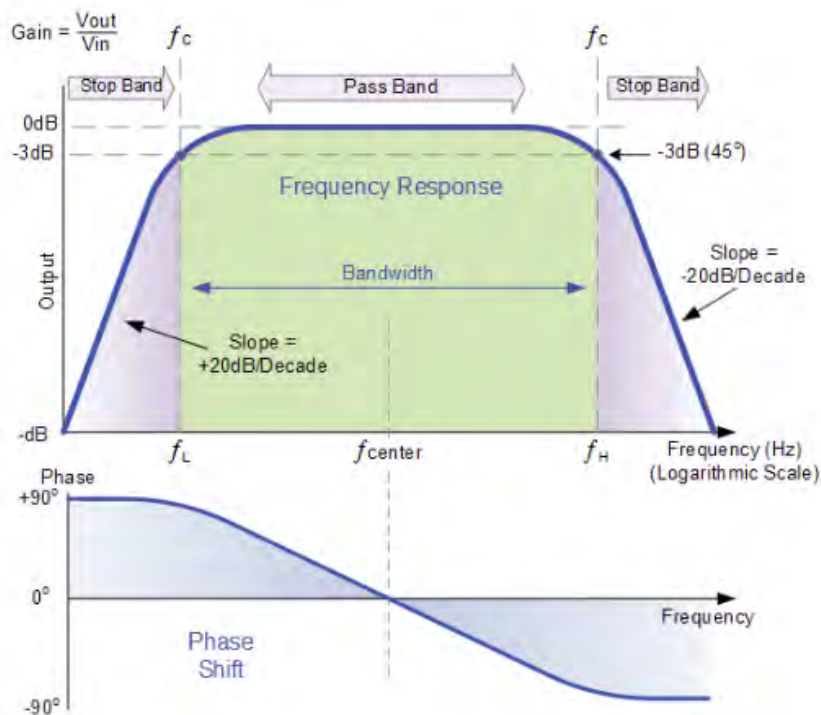
Τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων είναι τα αντίθετα. Επιτρέπουν την διέλευση συχνοτήτων από το μηδέν (Σ.Ρ.) έως την συχνότητα αποκοπής f_c (cut-off). Παρουσιάζονται

οι αποκρίσεις συχνότητας για φίλτρο 1^{ης} έως 5^{ης} τάξης. Τα φίλτρα υψηλότερης τάξης εξασθενούν πιο απότομα τις υψηλότερες συχνότητες.



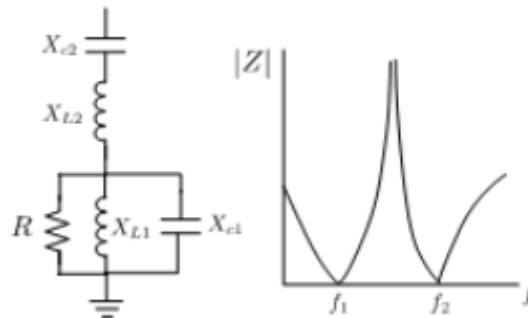
Εικόνα 77: Διαγράμματα Bode φίλτρο low-pass. (ΠΗΓΗ: File:Butterworth Filter Orders.svg - <https://en.wikipedia.org>)

Τα φίλτρα διέλευσης ζώνης (band pass) επιτρέπουν τη διέλευση σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Το εύρος αυτό είναι ανάμεσα στις συχνότητες αποκοπής. Δημιουργούνται ενώνοντας ένα low pass με ένα high pass. Αποτελούν φίλτρα 2^{ης} τάξης (δύο πόλοι) έχοντας δύο άεργα στοιχεία και γωνία φάσης 180 μοιρών. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας.



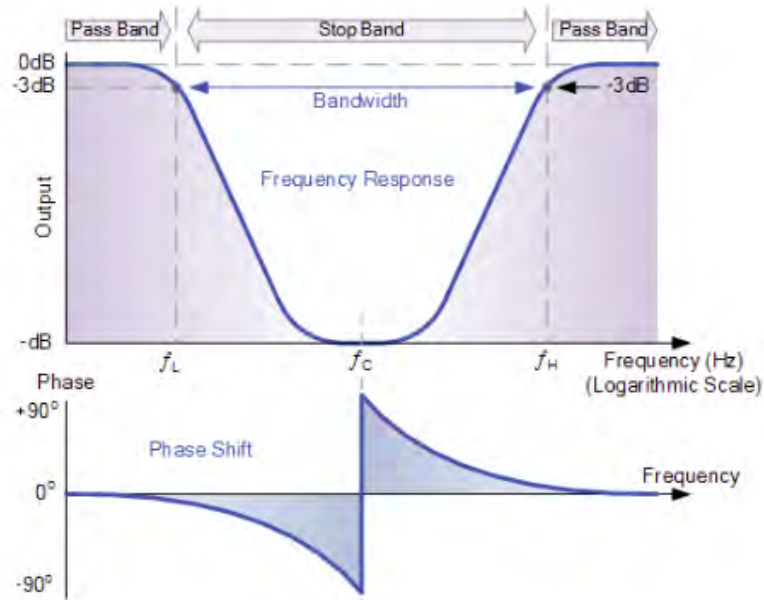
Εικόνα 78: Διαγράμματα Bode φίλτρου band pass. (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials.ws>)

Αυξάνοντας τον παράγοντα ποιότητας, το εύρος ζώνης «στενεύει» κάνοντας το φίλτρο πιο «επιλεκτικό» σε συγκεκριμένη συχνότητα, έχοντας τελικά ένα φίλτρο μονού συντονισμού. Συνδυάζοντας δύο τέτοια, κατασκευάζουμε φίλτρο διπλού συντονισμού. Ωστόσο, ένας πιο οικονομικός τρόπος είναι ο συνδυασμός ενός band pass σε σειρά με ένα κύκλωμα LC. Το φίλτρο διπλού συντονισμού αποτελεί και αυτό φίλτρο band pass, φιλτράροντας ένα συγκεκριμένο εύρος, όμως με διαφορετική απόκριση.



Εικόνα 79: Φίλτρο διπλού συντονισμού και απόκριση συχνότητας εμπέδησης. (ΠΗΓΗ: <https://www.pscad.com>)

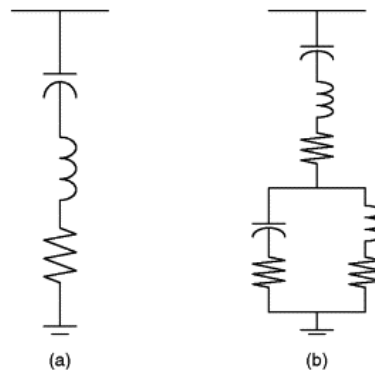
Την αντίθετη λειτουργία με τα φίλτρα διέλευσης ζώνης κάνουν τα φίλτρα Band Stop. Πρακτικά επιτρέπουν τη διέλευση συχνοτήτων εκτός του εύρους ζώνης των συχνοτήτων αποκοπής, δηλαδή από τη μηδενική (Σ.Ρ.) έως τη πρώτη συχνότητα αποκοπής f_L και από την δεύτερη συχνότητα αποκοπής f_H και άνω. Δημιουργούνται προσθέτοντας τα σήματα εξόδου ενός low pass και ενός high pass. Παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας.



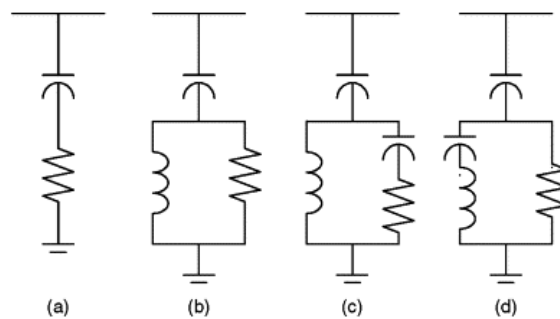
Εικόνα 80: Διάγραμμα Bode φίλτρου Band Stop. . (ΠΗΓΗ: <https://www.electronics-tutorials.ws>)

Τα φίλτρα τύπου 'C' είναι 2^{ης} τάξης (εικ.82,d) με την ικανότητα να αποσβήνουν αρμονικά ρεύματα με λιγότερες απώλειες από τα φίλτρα μονού συντονισμού και εύρους ζώνης. Τα στοιχεία πυκνωτή και πηνίου που είναι παράλληλα με τον αντιστάτη συντονίζονται στη θεμελιώδη συχνότητα. Έτσι, το θεμελιώδες ρεύμα που κυκλοφορεί μέσα από τον αντιστάτη μειώνεται στο ελάχιστο. Τέλος, τα φίλτρα αυτά είναι εξαιρετικά στο να αποσβήνουν υψηλές αρμονικές λόγω της «επίπεδης» εμπέδησης για συχνότητες μεγαλύτερες αυτής του συντονισμού.

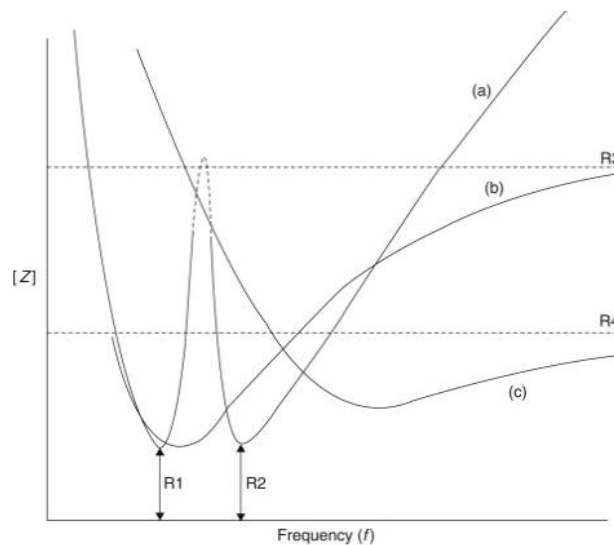
Σε απλά φορτία όπως οι λαμπτήρες φθορίου, που παράγουν συγκεκριμένες αρμονικές, επιλέγονται φίλτρα μονής συχνότητας ενώ για περίπλοκα όπως ο φούρνος τόξου γίνεται συνδυασμός damped με single. Συνήθως τα αποσβεσμένα φίλτρα χρησιμοποιούνται για σύνολο αρμονικών μεγάλων τάξεων και συντονίζονται ανάμεσα στην 11^η-13^η ή την 17^η - 19^η παρέχοντας μεγάλη απόσβεση σε αυτές τις συχνότητες αλλά και ικανοποιητική σε μεγαλύτερες. Επειδή τα φίλτρα αυτά έχουν μεγαλύτερες αντιστάσεις από τα μονού και διπλού συντονισμού δεν χρησιμοποιούνται για αρμονικές κοντά στην θεμελιώδη ώστε οι απώλειες να μην είναι μεγάλες.



Εικόνα 81: α) Μονού συντονισμού β) Διπλού συντονισμού



Εικόνα 82: Διατάξεις παθητικών φίλτρων απόσβεσης (damped filters). α) 1ης τάξης, β) 2ης τάξης, γ) 3ης τάξης, δ) C-type (Πηγή harmonic filters power quality power electronics Halpin, S. Mark)



Εικόνα 83: Εμπεδήσεις διαφορετικών τύπων συναρτήσεων της συχνότητας. α) Συνδυασμός δύο φίλτρων μονού συντονισμού, β) C-type, γ) 2ης τάξης. (ΠΗΓΗ: Power Quality – Harmonics in Power Systems HARDY B.)

Ο πυκνωτής σε κάθε περίπτωση πρέπει να επιλέγεται ώστε να αντέχει το άθροισμα των τάσεων κορυφής της πτώσης τάσης στον ίδιο, τόσο της θεμελιώδους όσο και των αρμονικών. Η αρμονική τάση στον πυκνωτή προκαλείται από το αρμονικό ρεύμα που εξαρτάται από τη ρύθμιση του συντονισμού, και είναι ίση με την ένταση του αρμονικού ρεύματος επί την αντίδραση του πυκνωτή για τη συχνότητα λειτουργίας. Επίσης για το πηνίο (choke), οι προδιαγραφές του θα πρέπει να είναι κατάλληλες για να αποφευχθεί υπερθέρμανση και φθορά. Κατά κανόνα τα φίλτρα δεν ρυθμίζονται ποτέ ακριβώς στη συχνότητα της αρμονικής για να αποφεύγεται η υπερφόρτωση τους. Τυπικά η ρύθμιση γίνεται με απόκλιση γύρω στο 90-95% της συχνότητας.

Τα παθητικά φίλτρα διέπονται από αρκετά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα:

- Η απόδοση τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπέδηση του δικτύου παροχής στο σημείο της σύνδεσης. Η τιμή της συνήθως δεν είναι γνωστή και μεταβάλλεται με αλλαγές στο σύστημα.
- Με τον καιρό αποσυντονίζονται λόγω μεταβολών στην θεμελιώδη συχνότητα τάσης και λόγω μεταβολών στα χαρακτηριστικά των στοιχείων LC από καταπόνηση κατά τη χρήση (υπερθέρμανση, χρόνια λειτουργία) ή απόκλιση προδιαγραφών κατά την παραγωγή. Λύση σε αυτό αποτελεί η σωστή ρύθμιση εξ αρχής για πρόβλεψη αποσυντόνισης ή η επιλογή φίλτρου μειωμένου συντελεστή ποιότητας. Ωστόσο, έτσι αυξάνονται οι απώλειες (αύξηση αντίστασης) και μειώνεται η απορρόφηση στοχευμένων αρμονικών. Η αποσυντόνιση περιγράφεται από τον συντελεστή συντονισμού (δ)
- Μόνο οι επιλεγμένες συχνότητες αρμονικών του συντονισμού φιλτράρονται αποτελεσματικά. Οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές δεν φιλτράρονται καθόλου.
- Τα παθητικά φίλτρα αν και απλά, είναι μεγάλα σε μέγεθος και ακριβή επιλογή για πολλές αρμονικές αφού για κάθε αρμονική ή ένα μικρό εύρος, απαιτείται ξεχωριστό φίλτρο.
- Η διάρκεια ζωής εξαρτάται από τους πυκνωτές που αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο τους και είναι επιρρεπείς σε υπερτάσεις και συντονισμούς.

Βασικοί παράμετροι σχεδιασμού είναι η τάξη του αρμονικού ρεύματος που θα αποκόπτεται, η άεργη ισχύς που θα προσφέρει και ο παράγοντας ποιότητας. Τα επίπεδα τάσης και η θεμελιώδης συχνότητα του συστήματος λαμβάνονται επίσης υπόψιν. Πριν την επιλογή πηνίου, πυκνωτή και αντίστασης, πρέπει να επιλεχθούν δύο βασικές παράμετροι. Ο συντελεστής συντονισμού (δ) και ο παράγοντας ποιότητας (Q) που ρυθμίζει το BW άρα την «ακρίβεια» στην συχνότητα επιλογής. Ο συντελεστής συντονισμού είναι [27]:

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_n)}{\omega_n}$$

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \quad (2. i)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2. ii)$$

Πρέπει να εκφράσουμε την εμπέδηση συναρτήσει του 'δ'. Για ένα φίλτρο RLC σειράς είναι:

$$Z = R \left[1 + jQ\delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right] \quad ()$$

Σε περίπτωση που το δ είναι σχετικά μικρό τότε:

$$Z \approx R\sqrt{1 + (2\delta Q)^2} \quad ()$$

Για τις μεταβολές επαγωγικότητας και χωρητικότητας λόγω φθοράς είναι:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (\alpha)$$

Η παρακάτω εξίσωση συσχετίζει την πραγματική τάξη αρμονικής που συντονίζεται το φίλτρο με την ιδανική τάξη αρμονικής που θέλουμε να συντονιστεί.

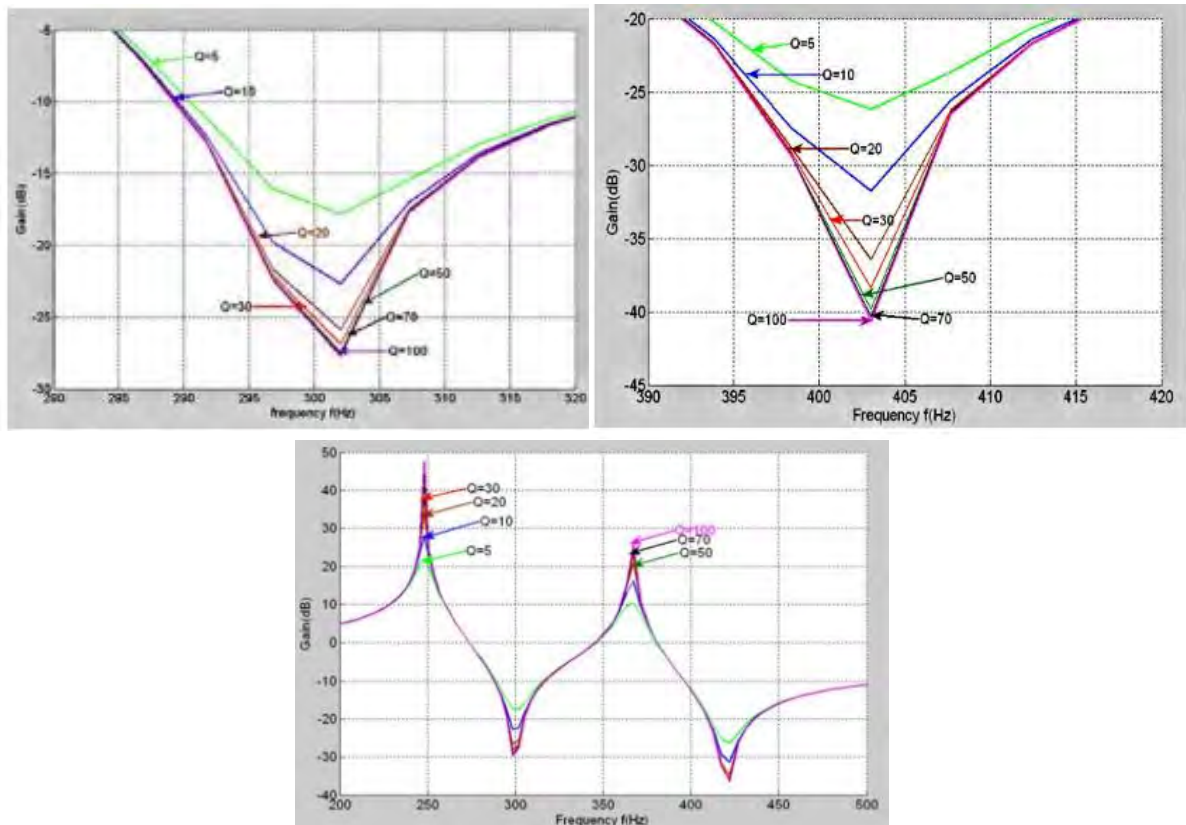
$$h = h_n + (\delta \times h_n) \quad (\beta)$$

Αν ένα φίλτρο μπορούσε να συντονιστεί ακριβώς με την ζητούμενη αρμονική, το αρμονικό ρεύμα θα έρρεε σχεδόν εξ ολοκλήρου στο φίλτρο. Για παράδειγμα σε φίλτρο μονής συχνότητας, με την απόκλιση στον πυκνωτή της τάξεως του 6.5% η απορρόφηση θα μειωνόταν δραματικά στο 70% περίπου. Συνεπώς, το υπόλοιπο 30% απορροφάται από τον εξοπλισμό έχοντας δυσμενείς επιπτώσεις. Ομοίως για το πηνίο, αν είχαμε μια ακραία απόκλιση από την τιμή σχεδιασμού της τάξεως του 20%, η απορρόφηση θα ήταν μόλις 30% και πρακτικά το φίλτρο δεν θα πρόσφερε βελτίωση[27]. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τυπικές αποκλίσεις για σφάλματα επαγωγής και χωρητικότητας σε φίλτρα 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής.

Τάξη αρμονικής φίλτρου	Απόκλιση σχεδιασμού	Αρμονική ρεύματος	Απορρόφηση %
5^{ης}	Μηδενική	4.785	95.7
	$X_C = +5\%$	3.509	70.17
	$X_C = -4.5\%$	4.194	83.87
	$X_C = +20\%$	1.475	29.49
	$X_L = -10\%$	2.598	51.95
7^{ης}	Μηδενική	4.873	97.46
	$X_C = +5\%$	3.938	78.76
	$X_C = -4.5\%$	4.35	87
	$X_L = +20\%$	1.984	39.68
	$X_L = -10\%$	3.244	64.88

Πίνακας 17: Επιδόσεις φίλτρων 5ης και 7ης αρμονικής συναρτήσει αποκλίσεων σχεδιασμού. (ΠΗΓΗ: Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor)

Η επιλογή του συντελεστή ποιότητας γίνεται βάσει του διαγράμματος Bode. Επιλέγουμε τον συντελεστή για τον οποίο η απόκριση αρχίζει να σταθεροποιείται. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode φίλτρων 5^{ης} και 7^{ης} για σύστημα θεμελιώδους 60Hz αρμονικής για διάφορες τιμές του Q.



Εικόνα 84: Διάγραμμα bode φίλτρου 5^{ης} , 7^{ης} και συνδυασμό των δύο για διάφορα τιμές του συντελεστή ποιότητας.
(ΠΗΓΗ: Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor)

Ο παράγοντας ποιότητας καθορίζει την ικανότητα του φίλτρου να απορροφά την αρμονική. Για πολύ μεγάλη απόσβεση (μικρό Q) το φίλτρο έχει χαμηλή επίδοση. Στον πίνακα 18 παρουσιάζεται η επίδοση των φίλτρων 5^{ης} και 7^{ης} όσο αφορά την απορρόφηση αρμονικών συναρτήσει του παράγοντα ποιότητας.[27]

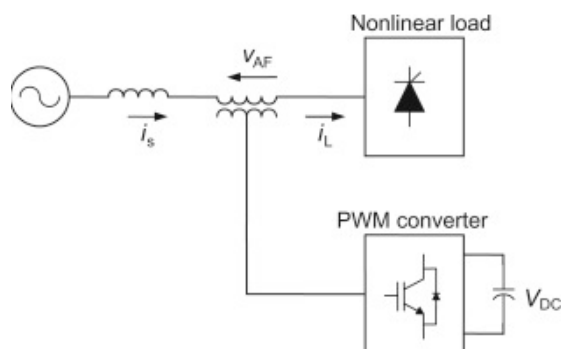
Φίλτρο	Q_5	Q_{10}	Q_{30}	Q_{50}	Q_{70}	Q_{100}
5 ^{ης}	28.6 %	51.2 %	87.28 %	94.48 %	97.98 %	98.66 %
7 ^{ης}	38.54 %	64.12 %	92.9 %	97.98 %	98.58 %	99.38 %

Πίνακας 18: Απορρόφηση ρευμάτων συναρτήσει του παράγοντα ποιότητας.(Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor)

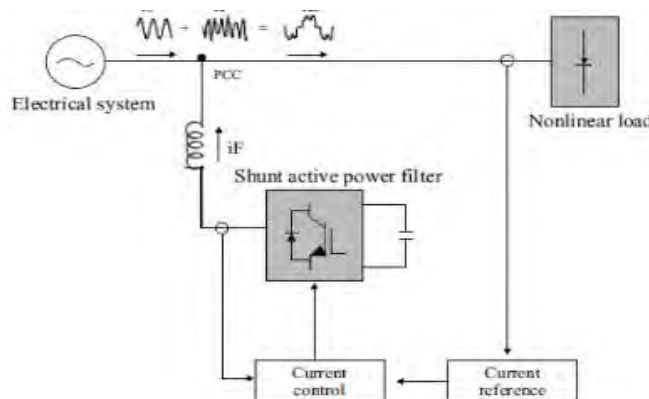
2.6.2 Ενεργά φίλτρα

Τα ενεργά φίλτρα απόσβεσης κάνουν χρήση στοιχείων ημιαγωγών και απαιτούν πηγή ισχύος για τη λειτουργία τους. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες:

1. *Ενεργά φίλτρα σειράς (Series active harmonic filters)*: δρουν ως ρυθμιστές τάσης και ως «μονωτικά» αρμονικών μεταξύ μη γραμμικού φορτίου και υπόλοιπου δικτύου. Τοποθετούνται στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή, ανάμεσα στη παροχή και το φορτίο και αποσβένουν αρμονικές τάσης. Ιδανικά για βελτίωση χαμηλής ποιότητας τάσης παροχής (Ανισορροπίες, απότομες πτώσεις κτλ).
2. *Παράλληλα ενεργά φίλτρα (Shunt active harmonic filters)*: Τοποθετούνται παράλληλα στο φορτία. Αποσβένουν αρμονικές ρεύματος που παράγονται.

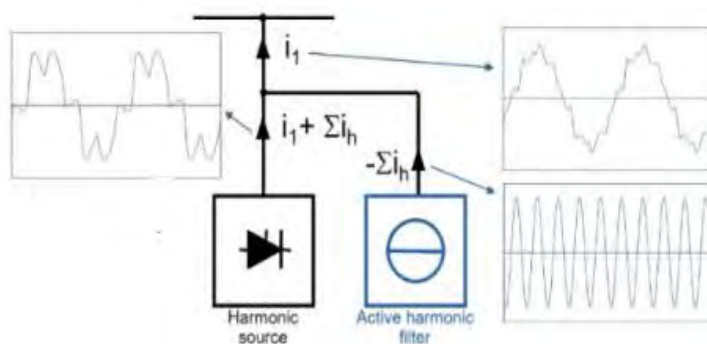


Εικόνα 85: Σχεδιάγραμμα συστήματος ενεργού φίλτρου σειράς-φορτίου-πηγής.



Εικόνα 86: Διάγραμμα συστήματος ενεργού παράλληλου φίλτρου-φορτίου-πηγής. (ΠΗΓΗ: DESIGN PARAMETERS OF SHUNT ACTIVE FILTER FOR HARMONICS CURRENT MITIGATION)

Η βάση λειτουργίας των ενεργών φίλτρων είναι η εξής: Αναγνωρίζοντας σε πραγματικό χρόνο τις αρμονικές, εισάγουν στο σύστημα τις ίδιες με διαφορά φάσης 180 μοιρών με αποτέλεσμα μέσω υπέρθεσης να αλληλοαναιρούνται. Αναλυτικότερα, ένας ελεγκτής αναγνωρίζει το ρεύμα του φορτίου. Στη συνέχεια μέσω παθητικών φίλτρων, εξάγονται οι αρμονικές του. Αφού «αναγνωριστούν» οι αρμονικές, αντιστροφείς (inverter) παράγουν τις ίδιες με αντίθετη φάση. Οι αρμονικές αυτές, προστίθενται στο ρεύμα της πηγής που αντλεί το φορτίο και στη συνέχεια εξαλείφουν τις παραμορφώσεις στο ρεύμα φορτίου. Σε πραγματικό χρόνο ο ελεγκτής δέχεται ρεύμα αναφοράς και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Το φίλτρο μοντελοποιείται ως πηγή ρευμάτων.



Εικόνα 87: Υπέρθεση ρευμάτων πηγής και φίλτρου. Το ρεύμα που φτάνει στο δίκτυο είναι διορθωμένο.

Αναφορικά, για το βήμα του διαχωρισμού των αρμονικών από την θεμελιώδη υπάρχουν πολλαπλοί μαθηματικοί αλγόριθμοι. Αναφορικά μερικοί:

- Θεωρίας στιγμιαίας ενεργής και άεργης ισχύος (PQ theory)
- Θεωρία σύγχρονου πλαισίου αναφοράς (DQ theory) με μέθοδο Fourier.
- Μέθοδος σύγχρονου εντοπισμού.
- Μέθοδος πολλαπλασιασμού συνημίτονου.

Η ρύθμιση των πυλών των ημιαγωγών στο στάδιο της παραγωγής είναι περίπλοκη διαδικασία και κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία του φίλτρου. Αναφορικά, μερικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sine PWM)
- Ρυθμιστής πλάτους παλμών διανυσμάτων χώρου. (Space Vector Modulation)
- Τριγωνική διαμόρφωση εύρους παλμών (Triangular PWM)

Για τις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται η τριγωνική PWM.

Τα πλεονεκτήματα των ενεργών φίλτρων είναι πολλαπλά. Πρώτον, οι αρμονικές που αποσβήνονται επιλέγονται από τον χρήστη. Μπορεί να γίνει επιλογή συγκεκριμένων συχνοτήτων ή εύρους συχνοτήτων. Έτσι, τα ενεργά φίλτρα μπορούν να ανταπεξέρχονται σε δυναμικές αλλαγές στο δίκτυο, άμεσα και για μεγάλο εύρος. Αυτή η ιδιότητα τα κάνει ιδανικά για περίπλοκα και κρίσιμα φορτία που προκαλούν δραστικές και έντονες παραμορφώσεις ειδικά σε σημαντικές εγκαταστάσεις όπως νοσοκομεία και αεροδρόμια (όριο $THD_v < 3\%$). Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα διόρθωσης συντελεστή θεμελιώδους συχνότητας. Λόγω ελέγχου μέσω υπολογιστή προστατεύονται από υπερφόρτωση και υπερθέρμανση. Τα ενεργά φίλτρα παραμένουν συντονισμένα καθώς ελέγχεται η τάση στους πυκνωτές και τα πηνία σε αντίθεση με τα παθητικά. Αν οι αρμονικές αυξηθούν, θα αποσβήσουν αυτές που είναι εφικτές από τον σχεδιασμό τους, χωρίς να υποστούν βλάβη. Ακόμα και αν ξεπεράσουν τα θερμικά όρια, μπορούν να απενεργοποιηθούν αυτόματα ή να ειδοποιηθεί ο χειριστής μέσω αυτόματου συναγερμού μέσω διαχείρισης συστημάτων εποπτείας (SCADA, PLC) ενώ για αδιάλειπτη λειτουργία σε εικοσιτετράωρη βάση, έχουν εξασφαλισμένο χρόνο ζωής άνω των δέκα ετών ενώ οι ανάγκες συντήρησης τους είναι μικρές. Λόγω του παραπάνω εξασφαλίζουν γρήγορα απόσβεση του αρχικού κόστους αγοράς και έτσι αποτελούν την οικονομικότερη επιλογή μακροπρόθεσμα.

Το κύριο μειονέκτημα τους είναι το κόστος ανά μονάδα. Ωστόσο, η ικανότητα τους να εκτελούν κεντρική αντιστάθμιση αλλά και αντιστάθμιση μεγάλου εύρους επιτρέπει τη χρήση μικρότερου αριθμού φίλτρων.

Για τα ενεργά φίλτρα κύριο μέλημα είναι ο υπολογισμός του ονομαστικού τους ρεύματος (ampacity) το οποίο είναι ίσο με:

$I_{AHFnominal} = \sqrt{1.2 I_{fund} \left[1.2 \left(\frac{THDI}{100} - \frac{THDI_{target}}{100} \right) \right]^2 + (I_q - I_{qnew})^2}$	(2.84)
--	--------

όπου

- $THDI$ = η παραμόρφωση προς διόρθωση
- $THDI_{target}$ = τελικός στόχος παραμόρφωσης
- I_{fund} = ένταση rms θεμελιώδους
- I_q = ρεύμα άεργης ισχύος
- I_{qnew} = τελικός στόχος έντασης άεργου ρεύματος

Βασικός παράγοντας αποτελεί το συνολικό αρμονικό ρεύμα στο δίκτυο (THC):

$I_{Hrms} = \sqrt{\sum_2^n I_n^2} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots I_n^2}$	(2.85)
---	--------

Και η συνολική ένταση rms

$I_{rms} = \sqrt{\sum_1^n I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots I_n^2} \Rightarrow$	(2.86)
--	--------

$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_{Hrms}^2}$	(2.87)
--	--------

είναι

$$THD = \frac{I_{harmonics}}{I_1}$$

$$I_{rms}^2 = I_{harmonics}^2 + I_1^2$$

Άρα

$I_{Hrms} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{1 + \frac{1}{THD^2}}}$	(2.88)
---	--------

Το συνολικό αρμονικό ρεύμα είναι η μέγιστη ποσότητα ρεύματος αντιστάθμισης που θα κληθεί (ιδανικά) να τροφοδοτήσει το φίλτρο για να εξαλείψει κάθε αρμονική. Στη πράξη το απαιτούμενο ρεύμα είναι μικρότερο καθώς στοχεύουμε σε μια ρεαλιστική βελτιστοποίηση με στόχο 5-10% παραμόρφωση κατά τη λειτουργία σε μέγιστο φορτίο.

$$THD_{comp} = THD - THD_{target}$$

Επομένως

$I_{Hrms} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{1 + \frac{1}{THD_{comp}^2}}}$	(2.89)
--	--------

Σε πραγματική λειτουργία, η παραπάνω τιμή του απαιτούμενου ρεύματος του φίλτρου πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα N για να αντισταθμιστούν δύο φαινόμενα που προκύπτουν κατά τη χρήση του ενεργού φίλτρου:

1. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιεί το φίλτρο για τον εντοπισμό των υπαρχουσών αρμονικών δεν είναι απολύτως ακριβείς και ως εκ τούτου προκύπτουν αποκλίσεις στα πλάτη και φάσεις της κάθε μιας αρμονικής.

2. Όταν βελτιστοποιείται (μειώνεται) η παραμόρφωση του ρεύματος η παραμόρφωση της τάσης παροχής θα μειωθεί επίσης. Αυτή η μεταβολή θα προκαλέσει αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος στη πλευρά του φορτίου.

Τελικά είναι

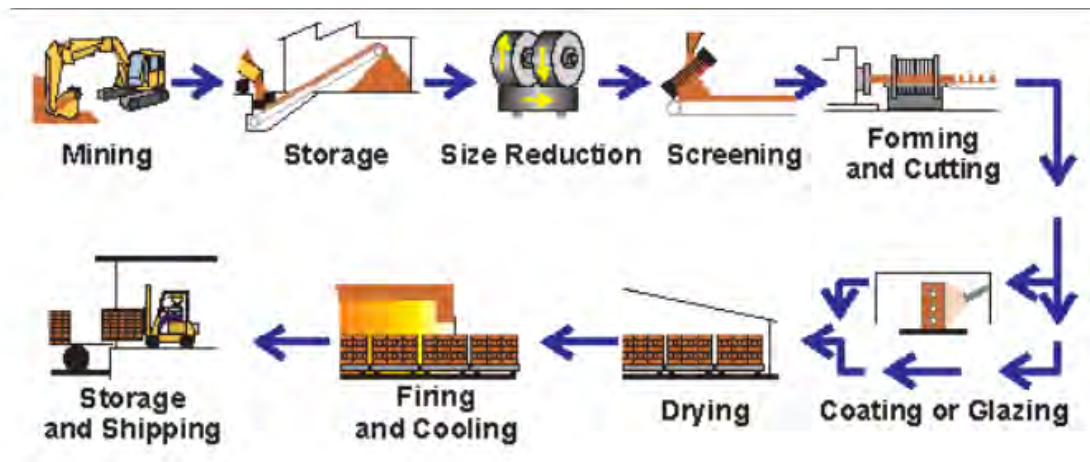
$I_{AHF_{rms}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{1 + \frac{1}{THD_{comp}^2}}} \times N$	(2.90)
--	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΕΡΑΜΟΠΟΙΙΑ

3.1 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

Η διαδικασία παραγωγής τούβλων αφορά τα εξής βασικά βήματα:

1. Εξόρυξη και επεξεργασία της πρώτης ύλης
2. Μορφοποίηση με χρήση πρεσών
3. Ξήρανση των τούβλων
4. Όπτηση με τη χρήση φούρνων
5. Ψύξη



Εικόνα 88: Διάγραμμα διαδικασίας παραγωγής πλίνθων.

Η πρέσα χρησιμοποιείται για διαμόρφωση τύπου *Dry-Press*. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για πηλό πολύ χαμηλής πλαστικότητας. Ο πηλός αναμιγνύεται με ελάχιστη ποσότητα νερού (10% περίπου) και στη συνέχεια εισέρχεται στη πρέσα όπου δέχεται πίεση από 3 έως 11 MPa.

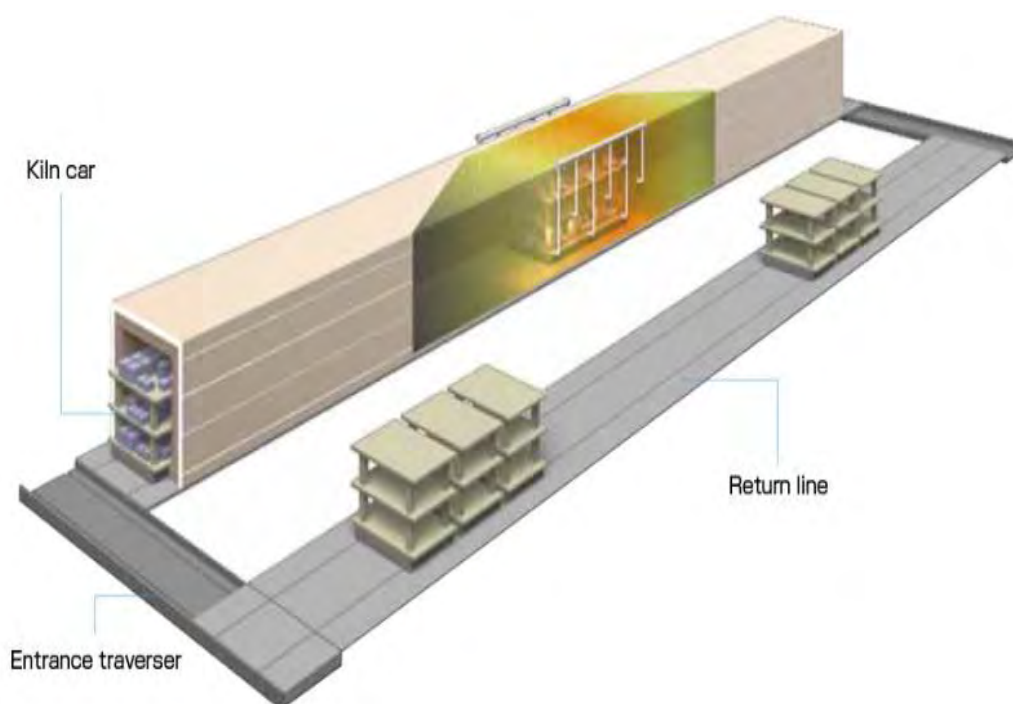


Εικόνα 89: Πρέσα πλίνθων σε γραμμή παραγωγής. (ΠΗΓΗ: <https://aimixconcreteblockmachine.com/press-brick-machine/>)

Το στάδιο της όπτησης αφορά το «ψήσιμο» του πηλού για 10 με 40 ώρες αναλόγως το είδος του φούρνου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φούρνων που χρησιμοποιούνται στις κεραμοποιίες. Οι πιο συνήθεις είναι τύπου τούνελ (tunnel kiln) και στη συνέχεια οι περιοδικοί φούρνοι (periodic kilns). Το καύσιμο μπορεί να είναι φυσικό αέριο ή κάρβουνο. Στους φούρνους τύπου τούνελ, τα τούβλα τοποθετούνται σε καρότσια τα οποία διέρχονται μέσα από τον φούρνο σε διαφορετικές θερμοκρασιακές ζώνες καθώς τον διασχίζουν. Η θερμότητα σε κάθε ζώνη ελέγχεται προσεκτικά. Σε έναν περιοδικό φούρνο οι πλίνθοι τοποθετούνται μέσα, ψήνονται, ψύχονται και στη συνέχεια εξάγονται. Τα στεγνά τούβλα τοποθετούνται σε περιοδικούς φούρνους σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο κύκλο που επιτρέπει την κυκλοφορία των ζεστών αερίων.

Η πυροδότηση μπορεί να χωριστεί σε 4 γενικές κατηγορίες:

1. Τελικό στέγνωμα (204°C)
2. Οξειδωση (538 – 982°C)
3. Εξυάλωση (871 – 1316°C)
4. Ξήρανση (149 – 982°C)



Εικόνα 90: Φούρνος τύπου τούνελ. (ΠΗΓΗ:<https://www.ngk-insulators.com/en/product/hd-tunnel-kiln.html>)

Τα φορτία της μελέτης αποτελούν ο οδηγός ηλεκτροκινητήρα πρέσας, η οποία συμμετέχει στο στάδιο της διαμόρφωσης, και ο φούρνος ο οποίος αφορά την όπτηση. Πρόκειται για τριφασικά φορτία που τροφοδοτούνται με Ε.Ρ. συχνότητας 50 Hz. Οι μετρήσεις στον πίνακα του φούρνου και στο drive του κινητήρα πραγματοποιήθηκαν με το όργανο PQ-BOX 200 της A.Eberle GmbH & Co.KG και ακολούθησε επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό του οργάνου WinPQMobil.

3.1.1 Φούρνος

Οι καταγραφές-μετρήσεις στον φούρνο διήρκησαν 13 ώρες και 24 λεπτά με intervals του ενός λεπτού. Το μετρητικό όργανο συνδέθηκε στις 3 φάσεις του πίνακα καθώς και στον ουδέτερο μετρώντας τάσεις και ρεύματα και πραγματοποιώντας τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών όπως αρμονικών ρευμάτων, παραμορφώσεων κτλ.



Εικόνα 91: Σύνδεση μετρητικού οργάνου στον πίνακα φούρνου τούθλου.

Με το πέρας των καταγραφών, τα δεδομένα μεταφέρονται σε υπολογιστή και αναλύονται με το εξειδικευμένο λογισμικό. Το λογισμικό περιλαμβάνει όρια αρμονικών βάσει του προτύπου IEC61000-2-2 και EN50160. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται το 95% της τιμής των μετρήσεων ενώ με μπλε το υπόλοιπο 5% που αποτελεί το μέγιστο. Η γενική επισκόπηση παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα:



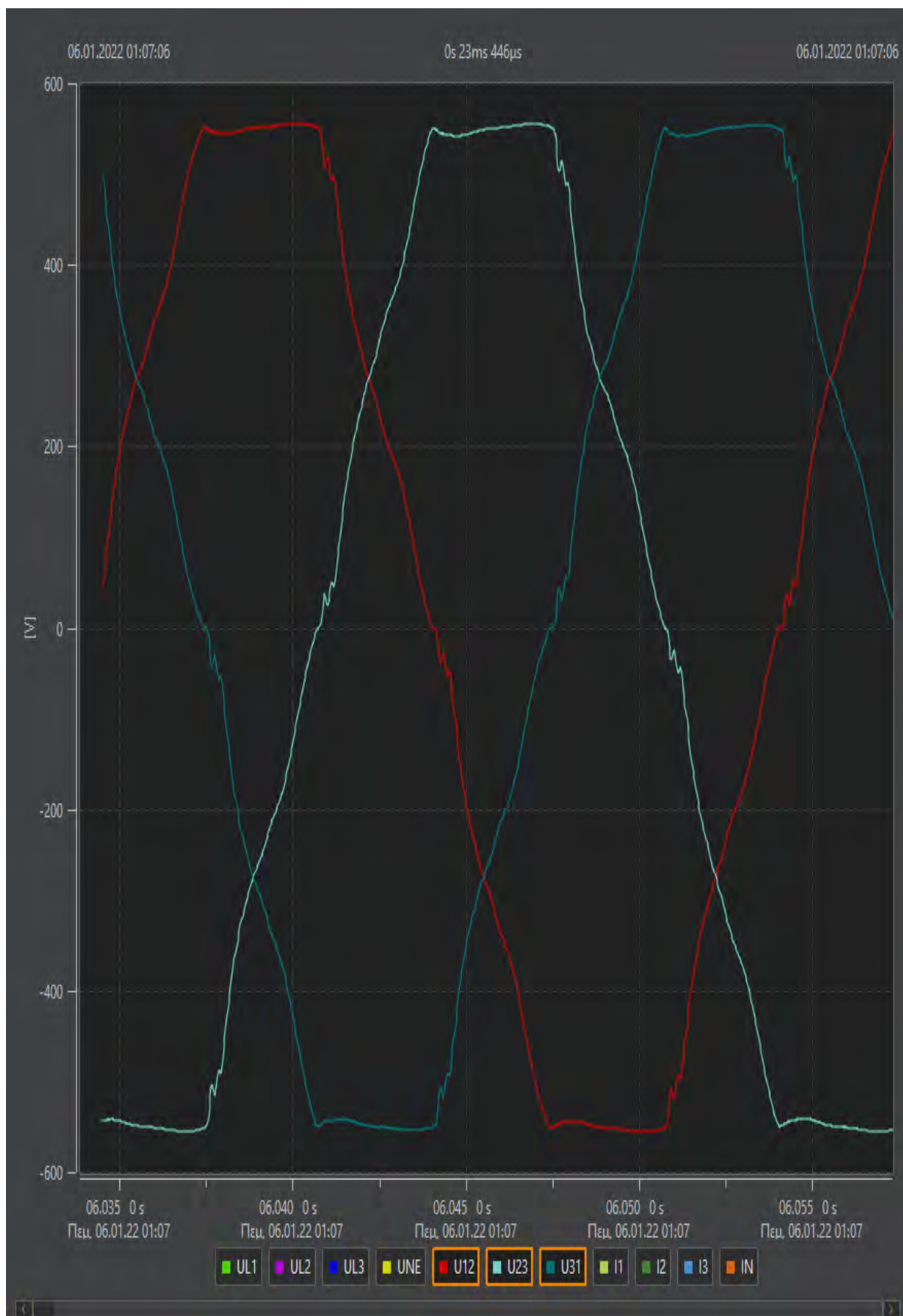
Εικόνα 92: Γενική εικόνα αρμονικών και συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης στον φούρνο τούθλου.

Από την παραπάνω εικόνα αντιλαμβανόμαστε εύκολα πως η παραμόρφωση της τάσεως υπερβαίνει τα συνιστώμενα όρια (THD) σε κάθε φάση απόρροια των έντονων υπαρχουσών αρμονικών (Harmonics). Η ανάλυση Fourier(FFT) τάσεων για την κάθε φάση ξεχωριστά παρουσιάζεται στην εικόνα 93, ως προς ποσοστό της θεμελιώδους. Παρατηρείται πως η πιο έντονη είναι η 5^η η οποία είναι άνω των ορίων σε όλες τις φάσεις με την 11^η να ακολουθεί και να ξεπερνάει τα όρια τόσο στην φάση L23 όσο και στην L31. Επιπλέον, η 33^η αρμονική είναι άνω των ορίων στην L23.



Εικόνα 93: Φάσμα αρμονικών τάσης κάθε φάσης.

Στην εικόνα 94 αποτυπώνεται τυχαίο στιγμιότυπο του παλμογράφου των τάσεων παρουσιάζοντας οπτικά την κυματική παραμόρφωση ενώ στην εικόνα 95 η αντίστοιχη φασματική ανάλυση αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT).



Εικόνα 94: Κυματομορφές τάσεων φάσεων σε τυχαία χρονική στιγμή..



Εικόνα 95: Fast Fourier Transform τάσεων της στιγμιαίας κυματομορφής..

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι κυρίαρχες αρμονικές τάσης και η συνολική αρμονική παραμόρφωση ως ποσοστό της θεμελιώδους και στον πίνακα 20 οι τιμές Volt.

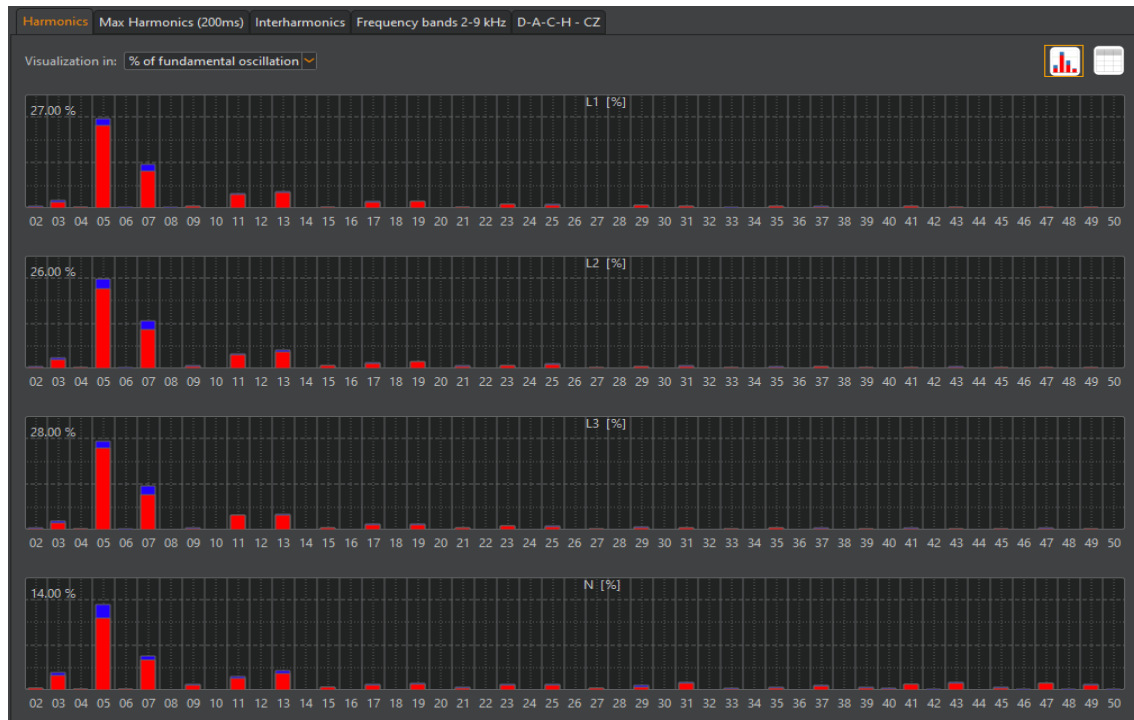
	Όριο	Φάση-1 95%	Φάση-1 Μέγιστο	Φάση-2 95%	Φάση-2 Μέγιστο	Φάση-3 95%	Φάση-3 Μέγιστο
THD	8	7,19	8,22	7,25	8,24	7,42	8,52
5 ^η	6	5,47	6,28	5,5	6,24	5,6	6,43
11 ^η	3,5	3,04	3,43	3,25	3,62	3,42	3,97
33 ^η	0,2	0,13	0,16	0,21	0,24	0,13	0,14

Πίνακας 19: Τιμές κυρίαρχων αρμονικών τάσεων ως ποσοστό θεμελιώδους. . Με κόκκινο τα όρια/άνω των ορίων τιμές.

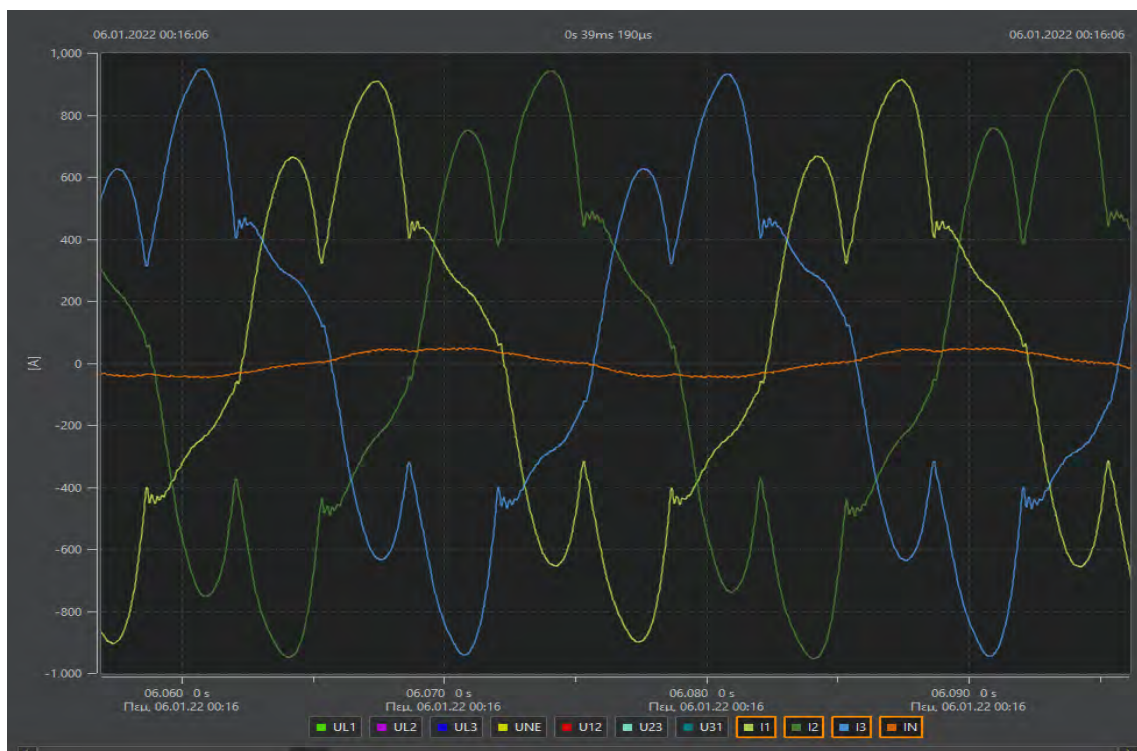
Volts	Φάση-1	Φάση-2	Φάση-3
Μέγιστο	424,67	425,02	423,73
Ελάχιστο	400,96	401,75	398,39

Πίνακας 20: Τιμές τάσεων [V] κάθε φάσης.

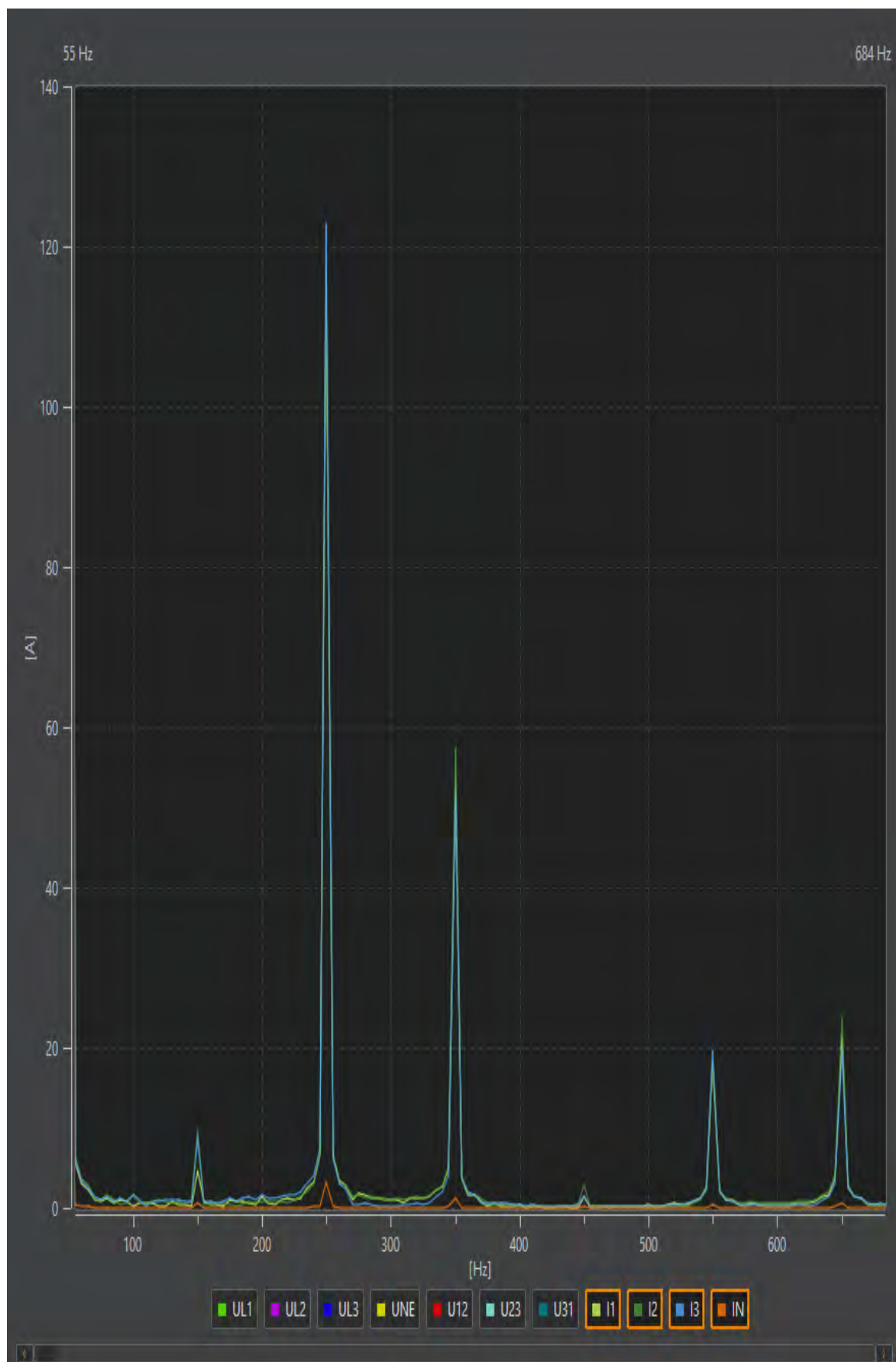
Προχωρώντας στα ρεύματα, στην εικόνα 95 παρουσιάζεται η ανάλυση Fourier για τις αρμονικές των ρευμάτων σε ποσοστό της θεμελιώδους. Αρμονική που κυριαρχεί είναι η 5^η τόσο στις φάσεις όσο και στον ουδέτερο. Στις παρακάτω εικόνες αποτυπώνεται τυχαίο στιγμιότυπο κυματομορφής των ρευμάτων και η αντίστοιχη φασματική ανάλυση αλγορίθμου FFT. Από το σχήμα των κυμάτων παρατηρούμε έντονη παραμόρφωση με απότομες πτώσεις και κορυφώσεις.



Εικόνα 96: Ανάλυση Fourier αρμονικών ρευμάτων σε κάθε φάση και στον ουδέτερο.



Εικόνα 97: Κυματομορφές ρευμάτων φάσεων και ουδετέρου (πορτοκαλί) σε τυχαία χρονική στιγμή.



Εικόνα 98: Fast Fourier Transform εντάσεων τυχαίας χρονικής στιγμής..

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται οι τιμές των αρμονικών των ρευμάτων των φάσεων των κυρίαρχων αρμονικών, δηλαδή της 5^{ης} και 7^{ης}, αλλά και της 3^{ης} καθώς και ως προς ποσοστό της θεμελιώδους και στον πίνακα 22 οι συνολικές παραμορφώσεις ρεύματος στο μέγιστο φορτίο.

ΑΡΜΟΝΙΚΗ	Φάση 1 ^η - Μέγιστο	Φάση 2 ^η - Μέγιστο	Φάση 3 ^η - Μέγιστο	Ουδέτερος - Μέγιστο
3 ^η	2,44% 13.24 A	2,95% 16.87 A	2,54% 13.61 A	2,78 % 0.896 A
5 ^η	26,6 % 145.1 A	25,67 % 147.4 A	27,31 % 150.8 A	13,25 % 4.593 A
7 ^η	12,89 % 54.9 A	13,65 % 60 A	13,36 % 66.76 A	5,31 % 1.691 A

Πίνακας 21: Κυρίαρχες αρμονικές ρεύματος ως προς το ποσοστό της θεμελιώδους και αυτούσιας έντασης.

MAX DEMAND (666.6 A)	Min	Mean	Max
THD 1 %	15.922	19.419	24.269
THD 2 %	16.509	19.567	25.012
THD 3 %	16.649	19.888	25.167

Πίνακας 22: Συνολικές παραμορφώσεις ρεύματος στο μέγιστο φορτίο.

Τέλος, η συνολική άεργος, πραγματική και φαινόμενη ισχύς καθώς ο συνολικός συντελεστής ισχύος και οι εντάσεις των φάσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

Total measurements	Min	Mean	Max
P [KW]	278.111	326.596	395.492
S [KVA]	344.513	392.434	456.373
Q [KVar]	194.784	217.297	253.606
PF	0.765	0.832	0.873
Άεργος ισχύς αρμονικών(kVar)	88.014	106.293	127.743
I1 [A]	469.596	538.311	636.015
I2 [A]	509.261	572.536	666.656
I3 [A]	473.896	543.047	635.77
IN [A]	29.748	32.775	36.096

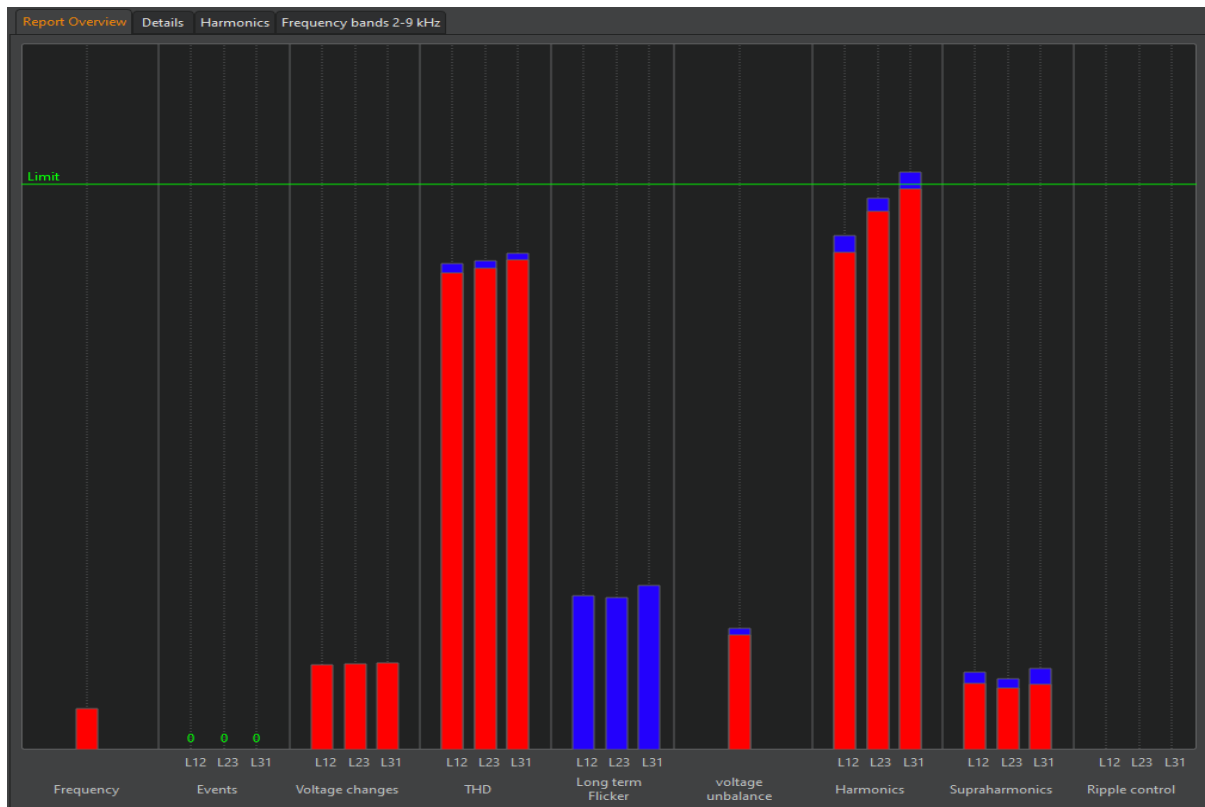
3.1.2 Ηλεκτροκινητήρας πρέσας

Οι μετρήσεις στον οδηγό του ηλεκτροκινητήρα διήρκεσαν 2 ώρες και 55 λεπτά με intervals του ενός λεπτού. Τα χαρακτηριστικά του drive είναι:

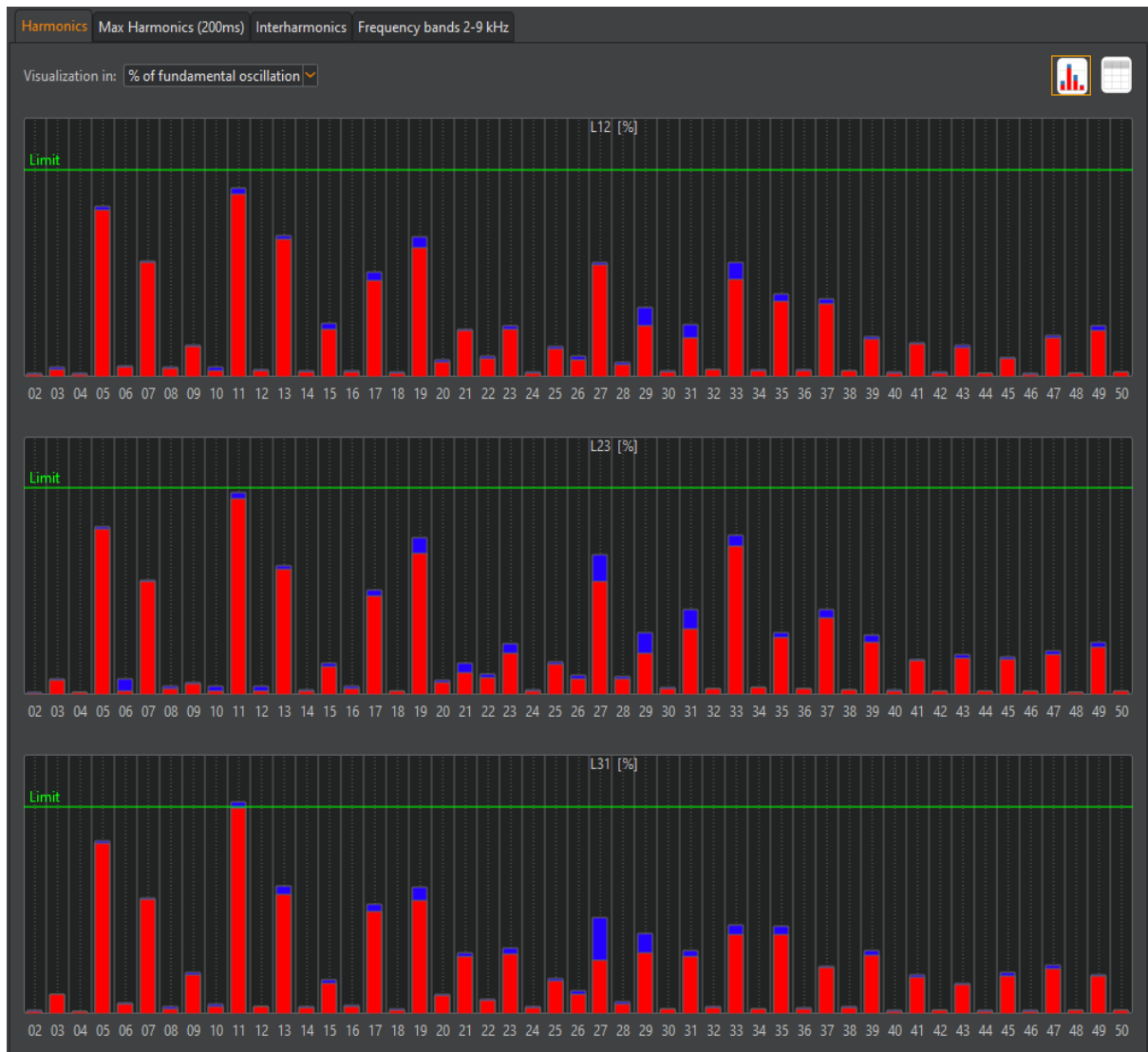
Κατασκευαστής Drive	Siemens
Μοντέλο	Sinamics G150
Τάση εισόδου [V]	380-480
Ρεύμα εισόδου [A]	883
Τάση εξόδου [V]	0-480
Ρεύμα εξόδου [A]	840
Ισχύς [KW]	400



Εικόνα 99: Συνδεσμολογία μετρητικού οργάνου στις 3 φάσεις του drive.



Εικόνα 100: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων κινητήρα πρέσας.



Εικόνα 101: Εύρος και ένταση αρμονικών τάσης σε ποσοστό της θεμελιώδους για κάθε φάση.

Στον πίνακα 24 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις των τάσεων

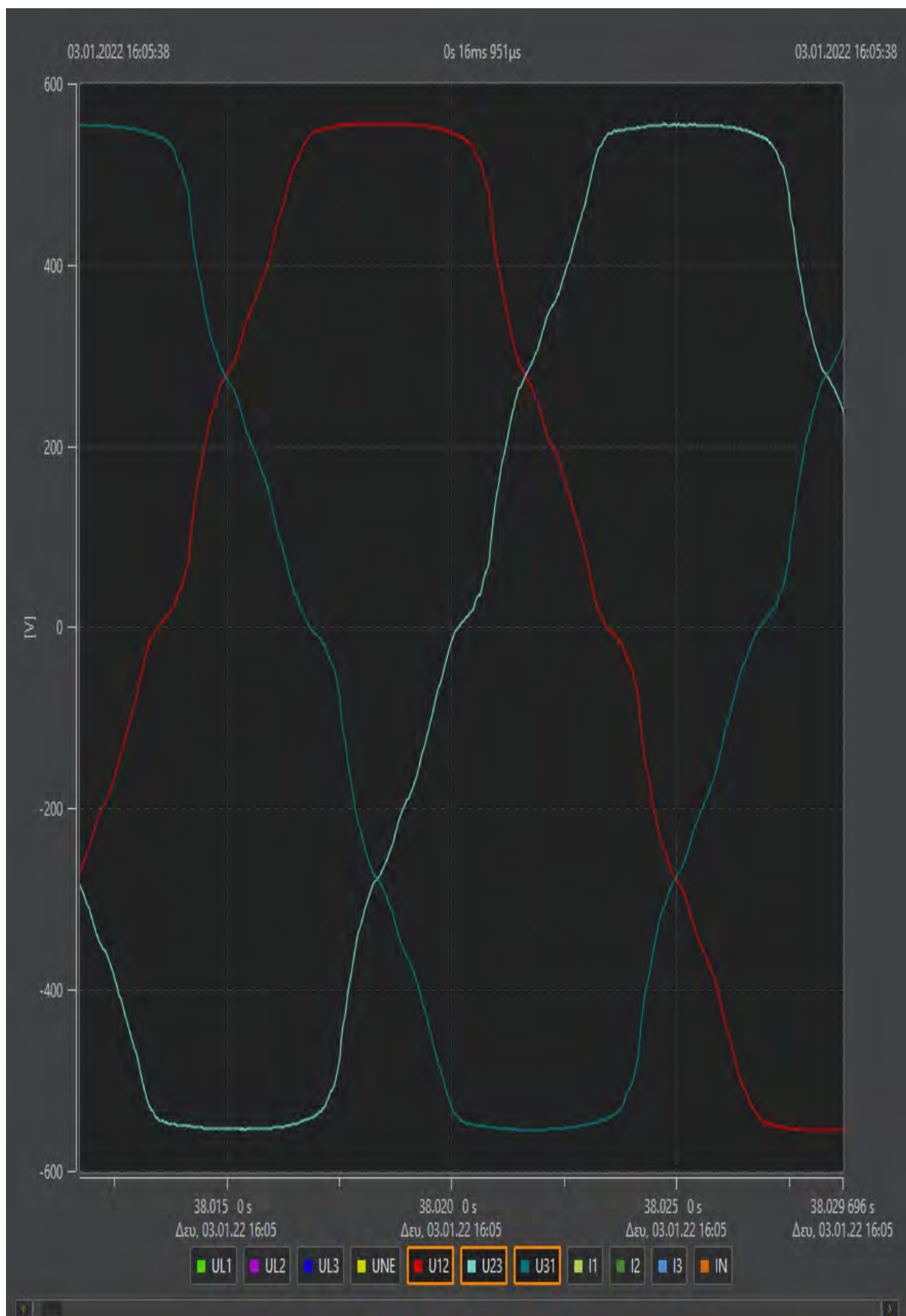
%	Min	Mean	Max
THD 12	4.13	6.133	6.878
THD 23	4.287	6.231	6.928
THD 31	4.196	6.293	7.031

Πίνακας 23: Συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης στις τρεις φάσεις.

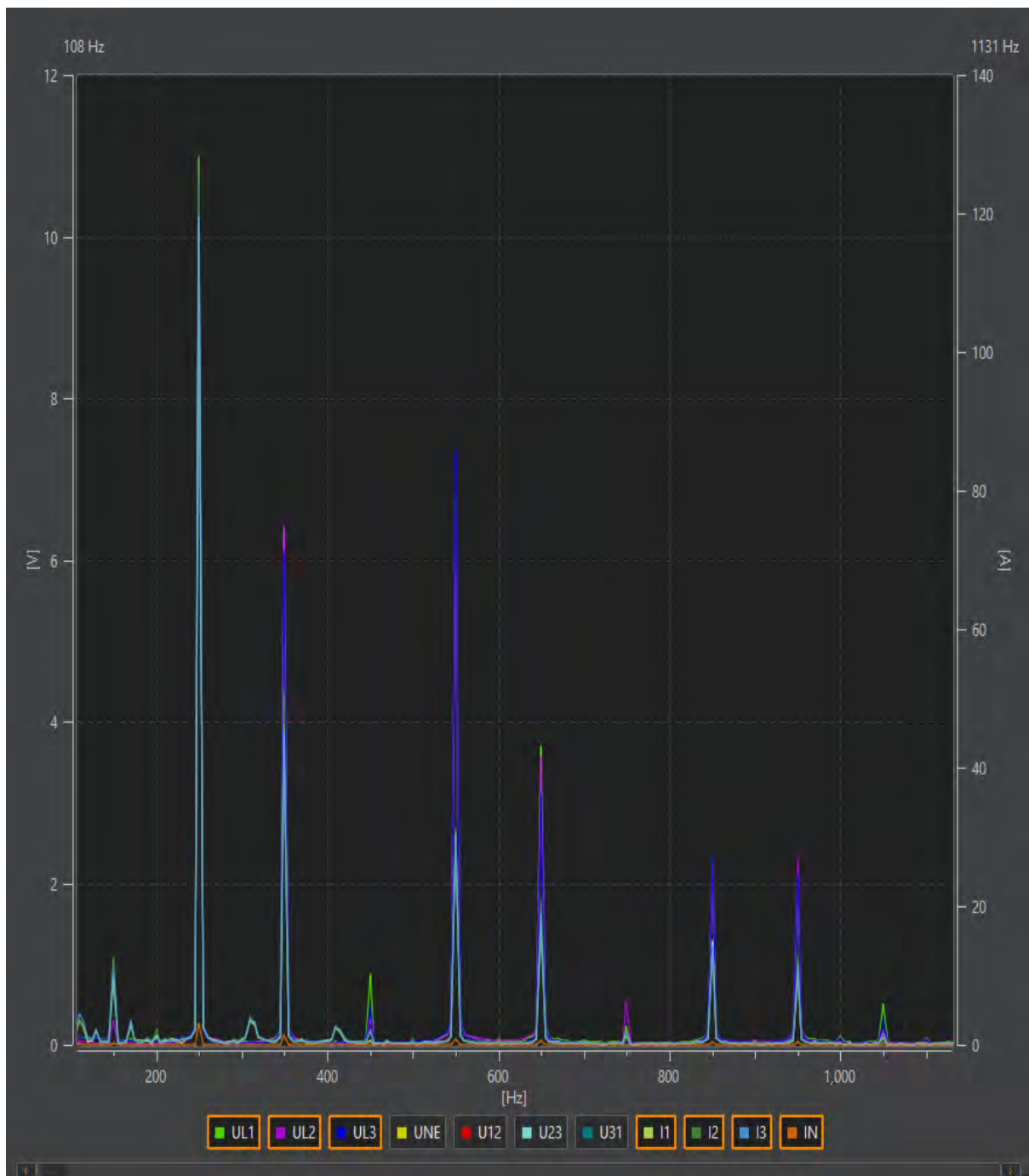
Αρμονική	Φάση-1 Μέγιστο	Φάση-2 Μέγιστο	Φάση-3 Μέγιστο	Όριο
5 ^η	4,93	4,9	4,99	6
7 ^η	2,78	2,77	2,8	5
11 ^η	3,18	3,42	3,57	3,5
13 ^η	2,05	1,88	1,84	3

Πίνακας 24: Τιμές κυρίαρχων αρμονικών τάσεων σε ποσοστό θεμελιώδους. Με κόκκινο τιμές εκτός ορίων.

Στην εικόνα 102 παρουσιάζεται τυχαίο στιγμιότυπο κυματομορφής τάσεων ενώ στην 103 η φασματική ανάλυση.



Εικόνα 102: Κυματομορφή τάσεων φάσεων drive κινητήρα σε τυχαία χρονική στιγμή..



Εικόνα 103: Στιγμιαία φασματική ανάλυση FFT τάσεων.

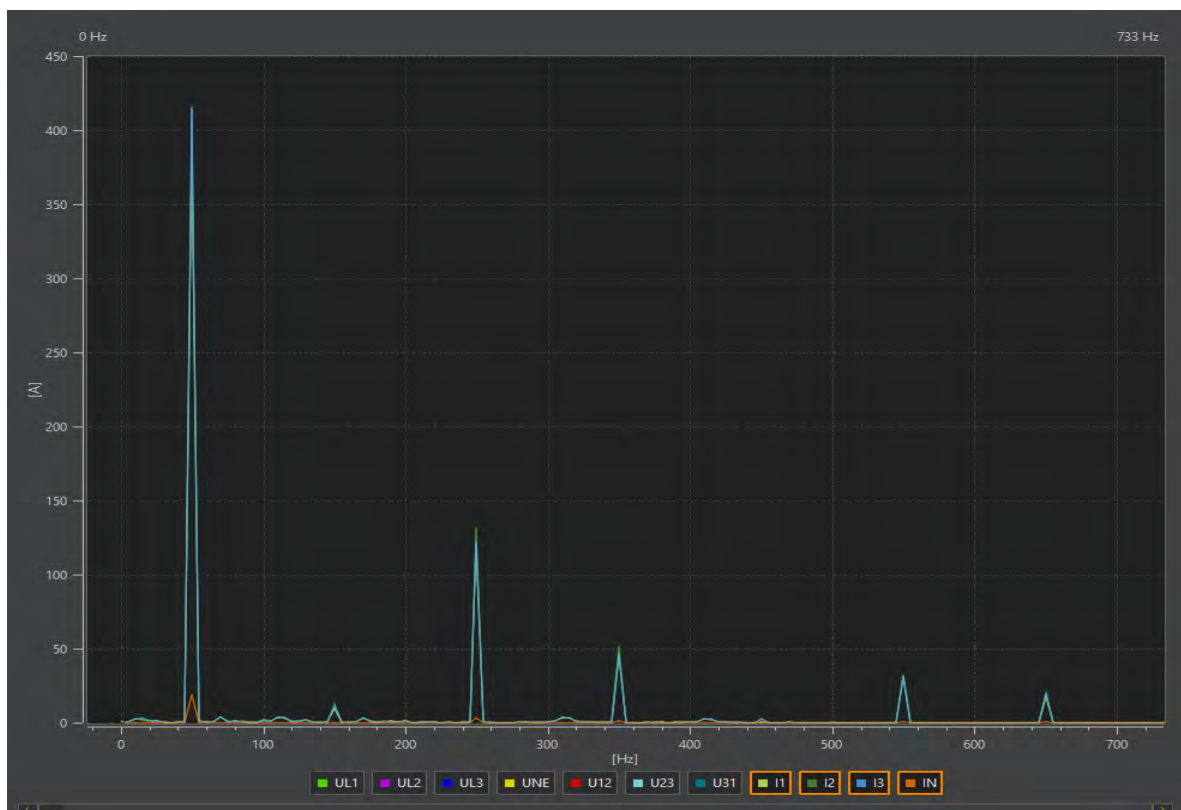
Στη συνέχεια αναλύονται οι αρμονικές ρευμάτων. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το τελικό φάσμα αρμονικών των φάσεων και του ουδετέρου. Εντοπίζονται σημαντικά μεγάλες αρμονικές· συγκεκριμένα η 5^η η οποία φτάνει έως 70%, 60% και 77% της θεμελιώδους σε κάθε φάση αντίστοιχα ενώ στον ουδέτερο έως το 20%. Επιπλέον, η 7^η έχει επίσης σημαντική επιρροή με την 11^η, 13^η και 3^η να ακολουθούν σε φθίνουσα σειρά. Στην εικόνα 105 παρουσιάζεται στιγμιαία κυματομορφή των ρευμάτων των φάσεων και του ουδετέρου. Το σχήμα των κυμάτων υποδεικνύει το Drive-PWM του κινητήρα όπως δείχθηκε στη παράγραφο 2.5.7. Στην εικόνα 106 απεικονίζεται η αντίστοιχη φασματική ανάλυση FFT.



Εικόνα 104: Φάσμα αρμονικών ρεύματος των τριών φάσεων και ουδετέρου.



Εικόνα 105: Στιγμιαία κυματομορφή ρευμάτων φάσεων και ουδετέρου.



Εικόνα 106: Στιγμιαία φασματική ανάλυση FFT ρευμάτων.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των κυρίαρχων αρμονικών ρεύματος σε ποσοστό θεμελιώδους. Στον πίνακα 26 η αρμονική παραμόρφωση εντάσεων σε μέγιστο φορτίο.

Αρμονική	Φάση-1 Μέγιστο	Φάση-2 Μέγιστο	Φάση-3 Μέγιστο	Ουδέτερος Μέγιστο
3 ^η	30,17	11,96	19,69	1,89
5 ^η	69,08	59,29	76,97	19,57
7 ^η	62,02	48,39	59,49	9,51
11 ^η	32,68	27,9	37,89	4,91
13 ^η	26,73	18,32	22,05	3,57

Πίνακας 25: Μέγεθος κυρίαρχων αρμονικών ρευμάτων (ποσοστό θεμελιώδους) των φάσεων και ουδετέρου.

MAX DEMAND (459.8 A)	Min	Mean	Max
THD1	2.129	26.708	34.007
THD2	2.293	28.818	36.407
THD3	1.868	26.675	33.71

Πίνακας 26: Συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος στο μέγιστο φορτίο.

Τέλος, στον πίνακα 27 οι μετρήσεις άεργης και πραγματικής ισχύος καθώς και οι εντάσεις των ρευμάτων:

	Min	Mean	Max
P [KW]	6.678	243.796	296.85
S [KVA]	10.628	268.011	323.562
Q [KVAr]	8.268	109.273	167.473
PF	0.391	0.877	0.921
Άεργος ισχύς αρμονικών [kVar]	6.905	88.102	113.358
I1 [A]	13.999	362.784	437.41
I2 [A]	17.159	378.774	455.907
I3 [A]	12.002	380.805	459.802
IN [A]	5.201	16.751	19.725

Πίνακας 27: Μεγέθη ισχύων και εντάσεων.

3.2 ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Τα φίλτρα απόσβεσης για το κάθε φορτίο εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των παραμορφώσεων που δόθηκαν από τις μετρήσεις στη προηγούμενη παράγραφο. Αρχικό μέλημα είναι η επιλογή τύπου, δηλαδή παθητικού ή ενεργού. Στη συνέχεια ο προσδιορισμός των παραμέτρων βάσει της απόσβεσης που καλείται αντιμετωπίσει, που θα καθορίσει τις χωρητικότητες και τις αυτεπαγωγές των πηνίων/πυκνωτών και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Τέλος, επιλέγεται η τοποθεσία και η προστασία IP της εγκατάστασης ανάλογα με το περιβάλλον τοποθέτησης.

3.2.1 Φίλτρο Φούρνο

Για το φορτίο του φούρνου θα επιλεγεί παθητικό φίλτρο. Το φορτίο του φούρνου χαρακτηρίζεται από την κυρίαρχη 5^η αρμονική ρεύματος. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος (THD-I) καθώς και της τάσης (THD-V) είναι μεγαλύτερη του 10% και 3% αντίστοιχα σε κάθε φάση. Τα επίπεδα και των δύο επιβάλλουν τον συνδυασμό πυκνωτή με στραγγαλιστικό πηνίο (choke reactor).

3.2.1.1 Πηνία στραγγαλισμού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές σχετικής εμπέδησης του στραγγαλιστικού πηνίου. Λόγω του γεγονότος πως η τιμή της 3^{ης} αρμονικής δεν ξεπερνά το 20% της 5^{ης}, καθώς επίσης THDV>7% επιλέγεται κατά κανόνα σχετική εμπέδηση 5.67%.

Σχετική εμπέδηση (ρ) %	Tuning Order	Tuning Frequency @50Hz
5.67	4.3	210
7	3.8	190
14	2.7	135

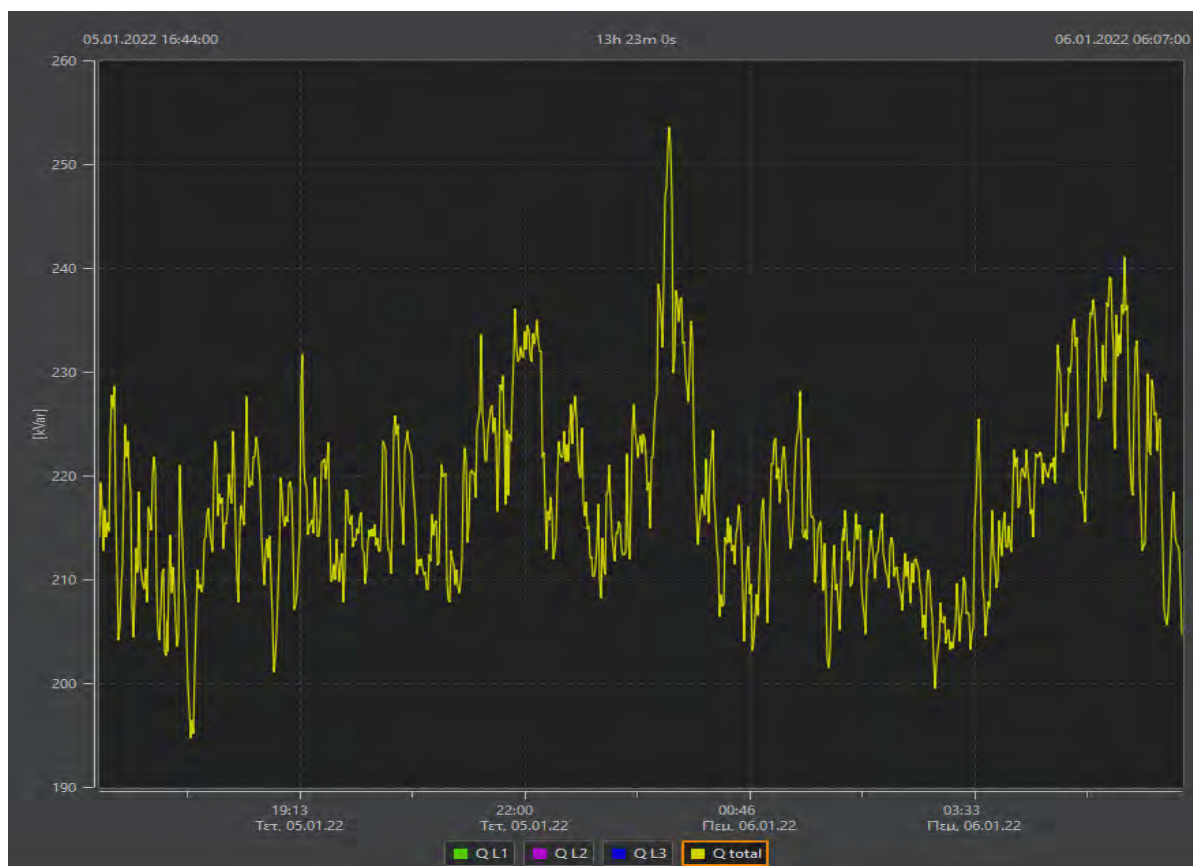
Πίνακας 28: Τυπικές τιμές σχετικής εμπέδησης στραγγαλιστικού πηνίου.

Συνεπάγεται:

$$X_L = 0.0567 X_C$$

3.2.1.2 Πυκνωτές

Ο φούρνος καταναλώνει κατά μέσο όρο 217.297 kVAr άεργης ισχύος. Στη παρακάτω εικόνα το γράφημα των τιμών κατά τη διάρκεια της μέτρησης.



Εικόνα 107: Κατανάλωση άεργης ισχύος φορτίου φούρνου.

$\cos \varphi$	0.86
$\tan \varphi$	0.574
$P(kW)$	326

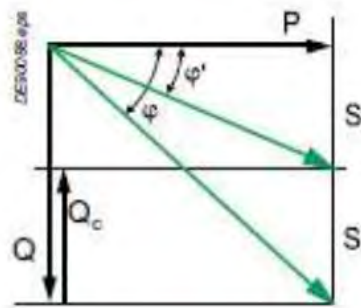
Πίνακας 29: Μέσες τιμές.

Τα απαιτούμενα kVAr των πυκνωτών υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q_c = P (\tan \varphi - \tan \varphi')$$

Όπου

- P : η πραγματική ισχύς του φορτίου
- $\tan \varphi'$: η επιθυμητή τιμή εφαιτομένης μετά την διόρθωση



Θέτοντας στόχο κοντά στο μηδέν:

$$\tan \varphi' = 0.04$$

Το μέγιστο ποσό άεργης ισχύος που θα παρέχουν οι πυκνωτές είναι:

$$Q_c = 326596 (0.574 - 0.04) \Rightarrow$$

$$Q_c = 174.084 \cong 175 \text{ kVAr}$$

Η απαιτούμενη πυκνωτική βαθμίδα είναι μεγαλύτερη των 120 kVAr και ως εκ τούτου ο ενδεδειγμένος τρόπος σύνδεσης είναι με χρήση ενός ρελέ τύπου AC3 που θα τροφοδοτεί 4 βαθμίδες. Ιδανική επιλογή αποτελεί η ακολουθία 1:2:2:2 έτσι ώστε να είναι:

$$1 \times 25 \text{ kVAr} + 3 \times 50 \text{ kVAr}$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα επίπεδα ισχύος που επιτυγχάνονται ανάλογα με το ενεργοποιημένο φυσικό βήμα:

kVAr	25	50	50	50
25	•			
50		•		
75	•	•		
100		•	•	
125	•	•	•	
150		•	•	•
175	•	•	•	•

Πίνακας 30: Επίπεδα ισχύος για κάθε συνδυασμό βημάτων.

Όσο αφορά την τάση στους πυκνωτές, ο συνδυασμός τους με στραγγαλιστικά πηνία σε σειρά, απαιτεί την ονομαστική τους τάση να είναι μεγαλύτερη από την τάση δικτύου. Οι παρακάτω τυποποιημένες τιμές (πιν.31) εξασφαλίζουν ασφαλή λειτουργία.

	Δίκτυο 50Hz	400V, 50Hz	Δίκτυο 50Hz	690V, 50Hz	Δίκτυο 400V, 60Hz
Σχετική εμπέδηση πηνίου	Capacitor Rated Voltage	Capacitor Rated Voltage	Capacitor Rated Voltage	Capacitor Rated Voltage	Capacitor Rated Voltage
5.67%	480	830	480	830	480
7%	480	830	480	830	480
14%	480	830	480	830	480

Πίνακας 31: Ονομαστική τάση πυκνωτή για τάση δικτύου και συχνότητας.

Η τάση του πυκνωτή, με πηνίο στραγγαλισμού σχετικής εμπέδησης 5.67% είναι ίση με:

$$U_C = \frac{U_s}{1 - p} \Rightarrow$$

$$U_C = \frac{400}{1 - 0.0567}$$

$$U_C = 424.043 \text{ V}$$

Η ονομαστική τάση που επιλέγεται είναι 480V. Η άεργος ισχύς του σε σύνδεση με το πηνίο θα είναι (εφαρμόζοντας U_C):

$$Q_C = \frac{Q_s}{1 - p} \Rightarrow$$

$$Q_C = \frac{175}{1 - 0.0567} \Rightarrow$$

$$Q_C = 185.519 \text{ kVAr}$$

Η άεργη ισχύς στην ονομαστική τάση U_N είναι:

$$Q_N = Q_C \times \left(\frac{U_N}{U_C} \right)^2 \Rightarrow$$

$$Q_N = 185.519 \times \left(\frac{480}{424.043} \right)^2 \Rightarrow$$

$$Q_N = 237.712 \text{ kVAr}$$

Συνεπώς ο πυκνωτής στα 480V θα πρέπει να δίνει 237.712 kVAr ώστε συνδυασμένος με στραγγαλιστικό πηνίο σχετικής εμπέδησης 5.67% να δώσει 175 kVAr σε δίκτυο 400V.

Η εμπέδηση του πυκνωτή είναι

$$X_c = \frac{U_c^2}{Q_c} \Rightarrow$$

$$X_c = 0,97 \text{ Ohm}$$

Γνωρίζοντας την εμπέδηση εξάγουμε την χωρητικότητα:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = 3.29 \text{ mF}$$

Άρα για η εμπέδηση του πηνίου είναι

$$X_L = 0.057 \times 0.97$$

$$X_L = 0.0552 \text{ Ohm}$$

Και προκύπτει αυτεπαγωγή:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = 175 \text{ } \mu\text{H}$$

3.2.1.3 Συντονισμός φίλτρου

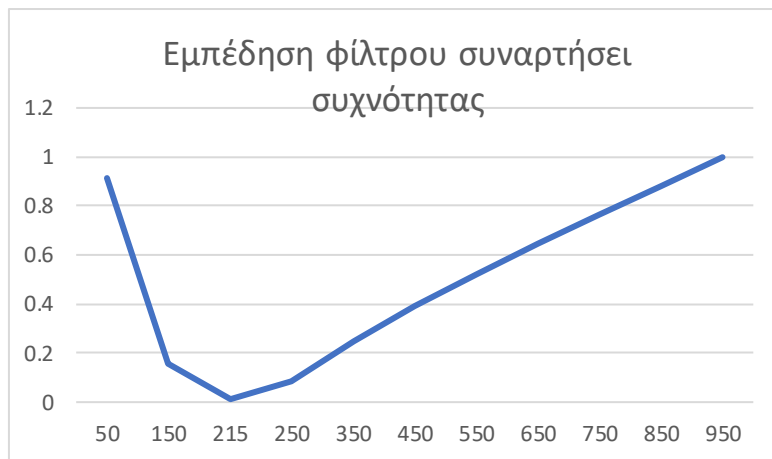
Η σειρά συντονισμού είναι $n=4.3$ (πιν. 28) καθώς η αρμονική προς απόσβεση είναι η 5^η.

$$n = 4.3$$

$$n = \frac{f_r}{50 \text{ Hz}} \Rightarrow$$

$$f_r = 215 \text{ Hz}$$

Συνεπώς η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου θα είναι περίπου 215Hz.



3.2.1.3 Επιτρεπτά όρια

Ο δείκτης $\frac{I_{mp}}{I_N}$ ορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα σε σχέση με το ονομαστικό ρεύμα του πυκνωτή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα προτεινόμενα όρια:

Όρια λειτουργίας	THDu max%	Τάση αρμονικής 3ης	Τάση αρμονικής 5ης	Τάση αρμονικής 7ης	Τάση αρμονικής 11ης	Τάση αρμονικής 13ης	$\frac{I_{mp}}{I_N} \text{ max}$
		3	5	7	11	13	
p=14%	10	3	8	7	3.5	3	1.12
p=7%	8	0.5	6	5	3.5	3	1.19
p=5.7%	6	0.5	5	4	3.5	3	1.31

Πίνακας 32: Όρια λειτουργίας

Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα για τον πυκνωτή είναι 1.31 φορές το ονομαστικό άρα περίπου:

$$1.31 \times \frac{480}{0.97} = 648 \text{ A}$$

3.2.1.4 Ρύθμιση Θερμικής & Μαγνητικής προστασίας αυτόματου διακόπτη

Το ονομαστικό μέγεθος του διακόπτη επιλέγεται ώστε να επιτρέπει τη ρύθμιση της θερμικής προστασίας για ρεύμα 1.31 φορές του ονομαστικού, τυπική τιμή για τον συγκεκριμένο συνδυασμό πυκνωτή-πηνίου (5.67%).

$$I_n = \frac{Q_n}{U_n \sqrt{3}} = \frac{237.712 \text{ kVAr}}{480 \sqrt{3}} \Rightarrow$$

$$I_n = 285.923 \text{ A}$$

Άρα το μέγεθος του αυτόματου διακόπτη ισχύος είναι:

$$285.923 \times 1.31 = 374.559 \text{ A}$$

Επιλέγεται αυτόματος διακόπτης ισχύος ονομαστικής έντασης 400 A.

3.2.2 Φίλτρο Ηλεκτροκινητήρα Πρέσας

Στον κινητήρα συνυπάρχουν πολλαπλές έντονες αρμονικές και η επιλογή ενεργού φίλτρου αποδίδει οικονομικότερη απόσβεση από την τοποθέτηση πολλαπλών παθητικών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μετρήσεις των αρμονικών από την 2^η έως την 50^η για τις τρεις φάσεις σε τιμές κορυφής:

Harmonic Order	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)	Harmonic Order	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
2	3,045	2,497	2,841	26	0,129	0,152	0,144
3	11,124	13,656	12,223	27	0,915	0,745	1,591
4	1,494	2,308	1,839	28	0,137	0,162	0,149
5	138,652	148,362	137,584	29	6,393	5,618	6,111
6	1,718	1,759	1,768	30	0,209	0,162	0,143
7	56,305	60,673	55,171	31	5,045	6,4	5,593
8	1,031	1,141	1,162	32	0,105	0,128	0,126
9	1,277	2,428	2,719	33	0,621	0,682	1,255
10	0,357	0,471	0,406	34	0,095	0,118	0,123
11	34,356	34,766	33,565	35	4,577	3,897	4,387
12	0,38	0,309	0,281	36	0,067	0,117	0,109
13	19,76	23,313	21,077	37	3,312	4,359	3,707
14	0,226	0,312	0,234	38	0,091	0,112	0,106
15	1,553	1,274	2,36	39	0,615	0,552	1,056
16	0,22	0,305	0,224	40	0,083	0,101	0,115
17	16,598	15,824	15,872	41	3,3	2,773	3,146
18	0,283	0,225	0,185	42	0,142	0,097	0,094
19	11,437	13,895	12,742	43	2,254	3,126	2,598
20	0,152	0,191	0,162	44	0,082	0,1	0,085
21	1,319	0,746	1,922	45	0,602	0,415	0,938
22	0,164	0,213	0,157	46	0,076	0,095	0,104
23	9,822	8,911	9,237	47	2,516	2,051	2,314
24	0,235	0,185	0,152	48	0,127	0,084	0,087
25	7,545	9,371	8,373	49	1,722	2,526	2,033
				50	0,068	0,097	0,082

Πίνακας 33: Αρμονικές Drive ηλεκτροκινητήρα σε κάθε φάση.

Το συνολικό ρεύμα αρμονικών (Total Harmonic Current) είναι:

$$THC = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots I_{50}^2}$$

Συνεπώς έχουμε:

	L1	L2	L3
THC	157,4686	168,5319	156,3017

Η παραμόρφωση υπολογίζεται για ρεύμα μέγιστου φορτίου (max demand current) όπου η συνολική αρμονική παραμόρφωση ισοδυναμεί με την συνολική παραμόρφωση φορτίου (Total Harmonic Distortion = Total Demand Distortion).

	L1	L2	L3
Ρεύμα μέγιστου φορτίου (A)	459,8	459,8	459,8

Η παραμόρφωση στη μέγιστο φορτίο (Total Demand Distortion):

$$TDD \% = \frac{THC}{I_{demand}} \times 100$$

	L1	L2	L3
TDD	34,24 %	36,65 %	33,99 %

Το συνολικό ρεύμα για τη μέγιστη παραμόρφωση (L2) είναι:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + TDD^2}$$

$$I_{rms} = 489.708 \text{ A}$$

Συνεπώς η (ιδανική) συνολική ένταση ρεύματος τροφοδοσίας του φίλτρου θα είναι:

$$I_{Hrms} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{1 + \frac{1}{THD^2}}} = 202.22 \text{ A}$$

Θέτοντας στόχο 5% τελική παραμόρφωση

$$I_{Hrms} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{1 + \frac{1}{(THD - THD_{target})^2}}} = \sqrt{\frac{489.708^2}{1 + \frac{1}{(0.3665 - 0.05)^2}}} \Rightarrow$$

$$I_{Hrms} = 177.32 \text{ A}$$

Τέλος, επιλέγοντας παράγοντα αντιστάθμισης 1.1 έχουμε τελικό ονομαστικό ρεύμα φίλτρου

$$I_{AHF} = 177.32 \times 1.1 \Rightarrow$$

$$I_{AHF} = 195 \text{ A}$$

Το ενεργό φίλτρο είναι επίσης ικανό να διορθώνει και τον συντελεστή ισχύος θεμελιώδους ($\cos\phi$), ωστόσο για το συγκεκριμένο φορτίο ο δείκτης PF_D είναι ικανοποιητικά μεγάλος. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται η τιμή του συνημίτονου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 108: Τιμές συνημίτονου θεμελιώδους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Η ελάχιστη τιμή του συνημίτονου είναι 0.958 συνεπώς δεν υπάρχει λόγος διόρθωσης και επιλέγεται ενεργό φίλτρο με ονομαστική τιμή έντασης τα 200 A.

3.3 Προσομοίωση παθητικού φίλτρου

Πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας των φίλτρων για επαλήθευση των βελτιστοποιήσεων (απόσβεση αρμονικών, παροχή KVAR) με τη χρήση του λογισμικού *LTspice*. Το μοντέλο στήνεται αρχικά έτσι ώστε αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν περισσότερο το πραγματικό φορτίο. Στη συνέχεια προστίθεται το φίλτρο.

Ο φούρνος προσομοιώνεται σαν τριφασικό φορτίο σε σύνδεση με τριφασική πηγή Δ-Δ (Δέλτα-Δέλτα) για το οποίο ισχύει:

$$V_{phase} = V_{line}$$

$$I_{phase} = \frac{I_{line}}{\sqrt{3}}$$

Από της μετρήσεις έχουμε:

Τάσεις (γραμμή-γραμμή, Volt):

V12	411,328	V23	411,994	V31	409,219
THD12%	6.026	THD23%	6.198	THD31%	6.269

Ένταση rms γραμμών, ένταση rms αρμονικών, αρμονική παραμόρφωση και πραγματικός PF:

Il1 (A)	538,311	Il2 (A)	572,536	Il3 (A)	543,047
THD1 (%)	24,792	THD2 (%)	23,4	THD3 (%)	25,194
THD1(A)	129,457	THD2(A)	130,446	THD3(A)	132,581
TPF1	0.83	TPF2	0.853	TPF3	0.811

Ως προς την συνολική ποιότητα ισχύος της θεμελιώδους:

Πραγματική Ισχύς (kW) **329.7**

Άεργος Ισχύς (kVAr) **188.6**

Φαινόμενη Ισχύς (kVA) **380**

Displacement PF **0.867**

Για την προσομοίωση θα σχεδιάσουμε ισορροπημένο τριφασικό σύστημα με τις μέσες τιμές.

Τάση εισόδου θεμελιώδους	$\cong 410 V_{rms}$
Ένταση ρεύματος θεμελιώδους γραμμής	$\cong 535 I_{rms}$
Ένταση ρεύματος θεμελιώδους φάσης (Δ)	$\cong 309 I_{rms}$
Displacement PF	0.867
ϕ	$\cong 29,888^\circ$
Πραγματική ισχύς ανά φάση	$\cong 109900 Watt$

Όσο αφορά το φορτίο, η εμπέδηση του ανά φάση προκειμένου να προσεγγιστούν τα παραπάνω, με μια απλή ανάλυση στη θεμελιώδη συχνότητα:

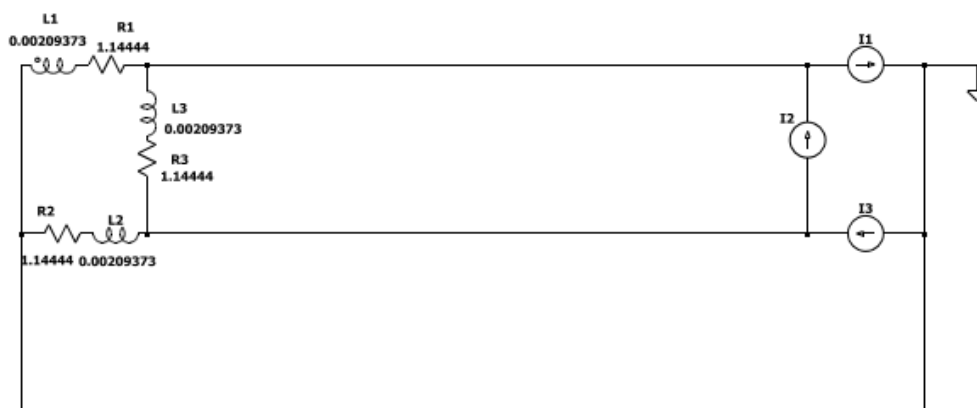
$$Z = 1.144 + j 0.6577$$

Όπου

$$L = 2.093 mH$$

επαγωγικό.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το σύστημα φορτίου-πηγής σε σύνδεση Δ-Δ και στον πίνακα τα χαρακτηριστικά.

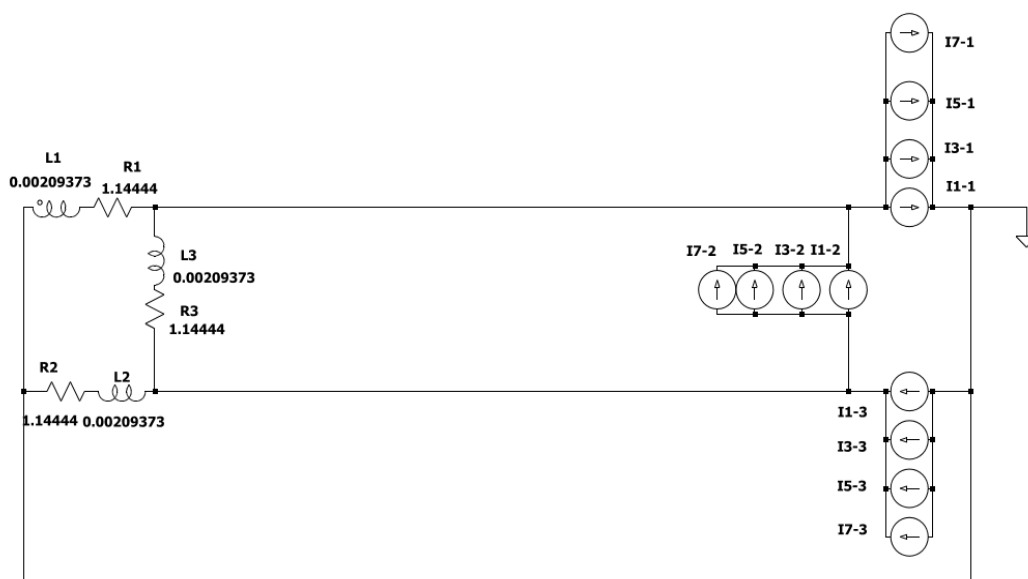


Εικόνα 109: Τριφασική πηγή θεμελιώδους ρεύματος και φορτίο σε σύνδεση δέλτα.

Τάση γραμμής	407,3 V
Ένταση γραμμής	536.84 A
Ένταση φάσης	309,93 A
Μέση πραγματική κατανάλωση ισχύος	329.73 kW
Φαινόμενη Ισχύς	380 kVA
PF	0,86

Πίνακας 34: Βασικά χαρακτηριστικά συστήματος θεμελιώδους.

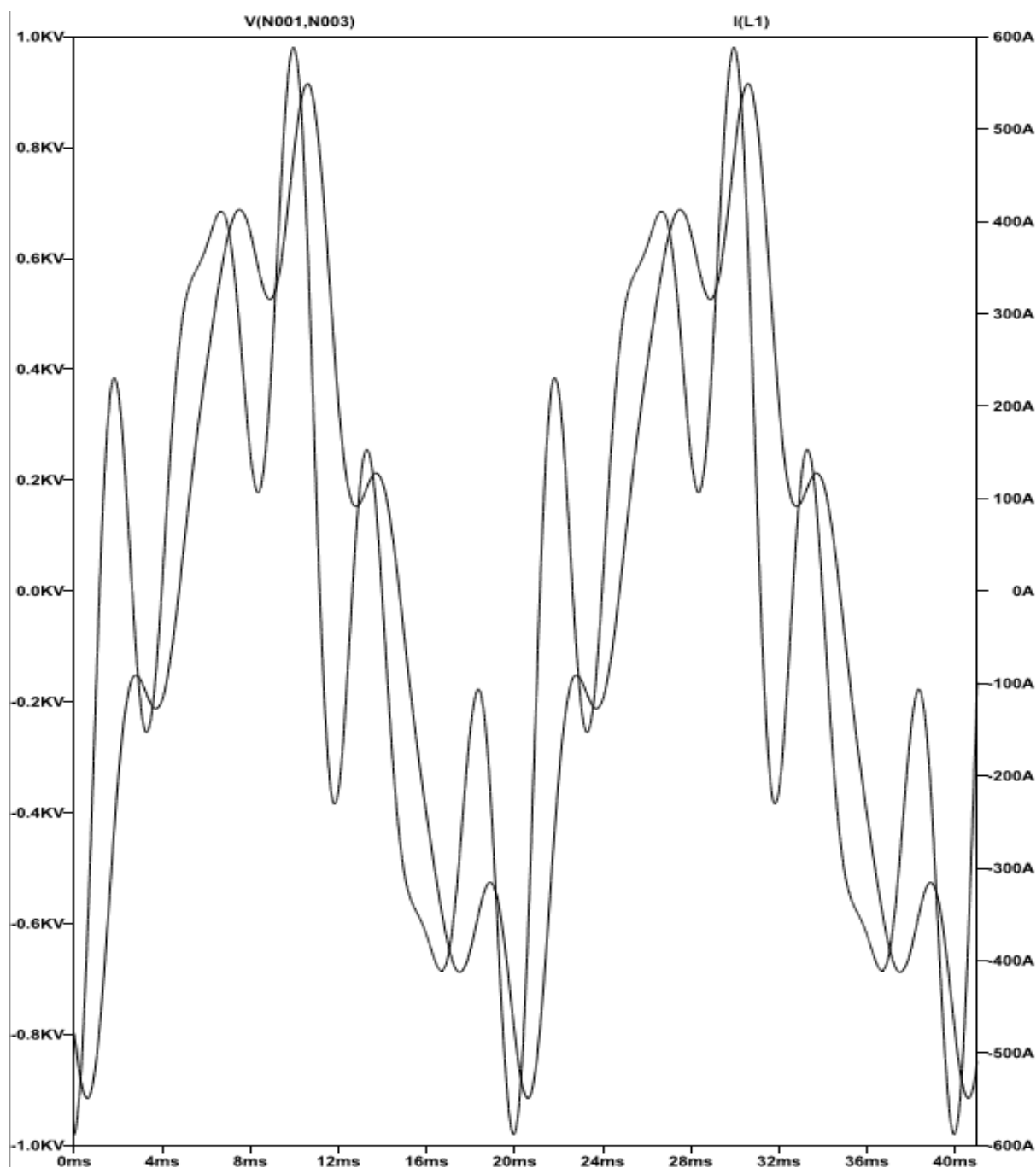
Στη συνέχεια εισάγονται οι αρμονικές από την 3^η έως την 7^η ως πηγές ρευμάτων παράλληλα με την θεμελιώδη.



Εικόνα 110: Εισαγωγική αρμονικών ρευμάτων παράλληλα στα θεμελιώδη.

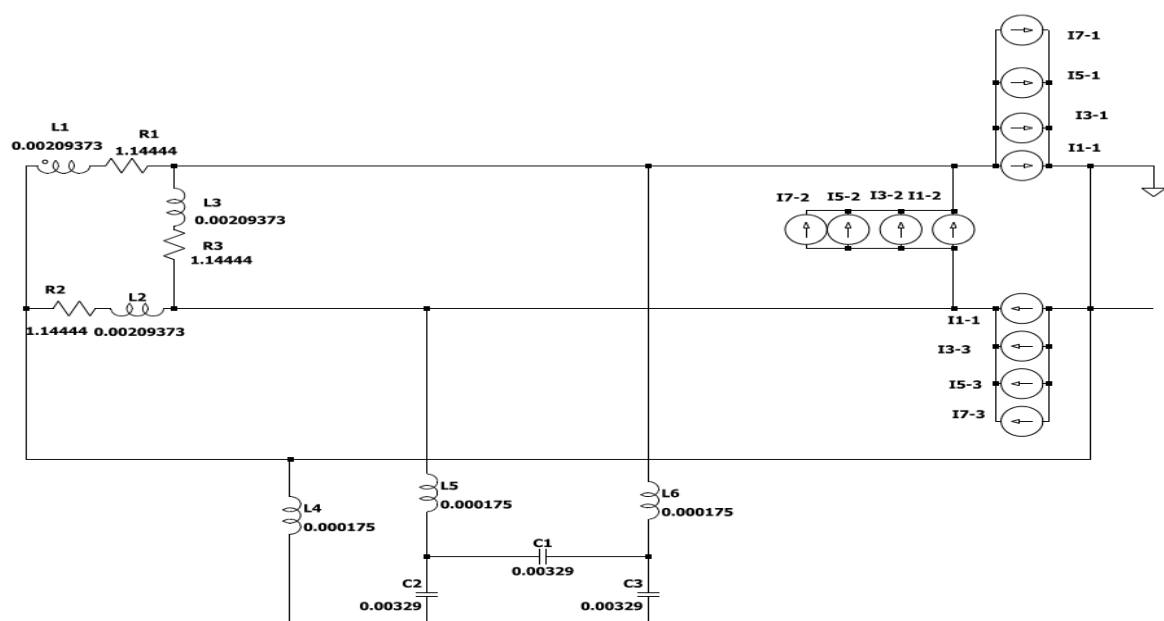
Τάση γραμμής	498,69 V
Ένταση γραμμής	551,3 A
Ένταση φάσης	318,3 A
Πραγματική κατανάλωση ισχύος	347.85 KW
Φαινόμενη ισχύς	417.086 kVA
TPF	0,834
THDI	25%

Πίνακας 35: Βασικά χαρακτηριστικά συστήματος με αρμονικές.

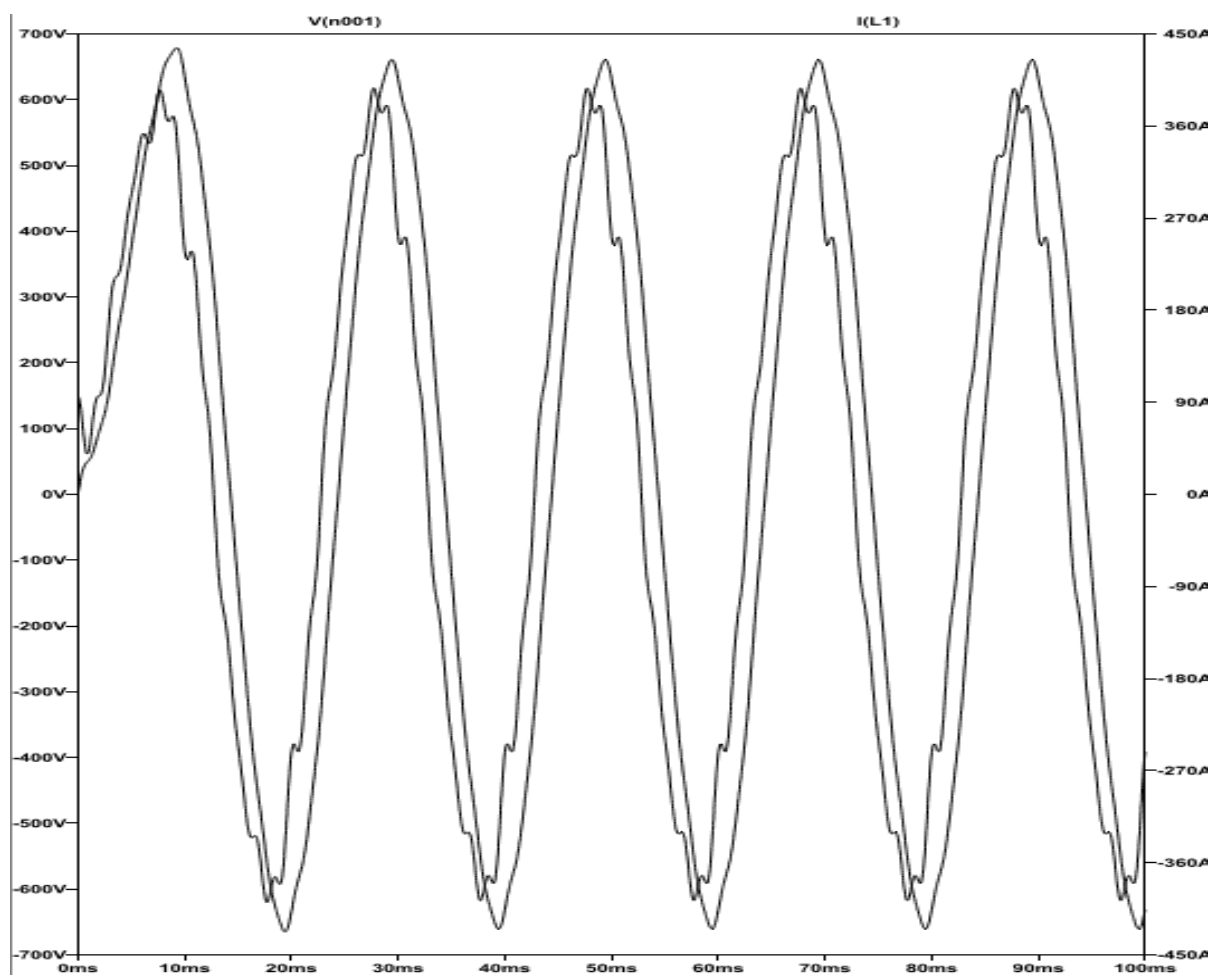


Εικόνα 111: Παραμορφωμένες κυματομορφές τάσης και έντασης μιας φάσης χωρίς φίλτρο.

Στο τελευταίο στάδιο προστίθεται το τριφασικό φίλτρο πυκνών-στραγγαλιστικών πηνίων σε σύνδεση δέλτα παράλληλα στο φορτίο.



Εικόνα 112: Κύκλωμα φορτίου-πηγής-φίλτρου.



Εικόνα 113: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης φάσης με την εισαγωγή του φίλτρου.

Τάση γραμμής

418,83 V

Ένταση γραμμής

506,6 A

Ένταση φάσης	292,48 A
Πραγματική κατανάλωση ισχύος	320 KW
Φαινόμενη ισχύς	347.82 kVA
TPF	0,92
THDI	1.3%
THDU	4%

Συνοπτικά από την προσομοίωση παρατηρούμε μείωση στην ένταση του ρεύματος γραμμής κατά 8,1% και μείωση στην κατανάλωση πραγματική ενέργειας 7.7%. Ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται από 0.834 σε 0.92 με μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος κατά 23,7 %.

Η πραγματική μείωση ανέρχεται στο 10,6% από τα περίπου 565 A RMS στα 504 A RMS ενώ η πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας στα 10,8% από 326 kW στα 291 kW.

3.4 Αποτελέσματα ενεργού φίλτρου

Το ενεργό φίλτρο διαθέτει οθόνη με περιβάλλον στο οποίο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιεί (Παράρτημα Γ). Τα αποτελέσματα της παρέμβασης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Το φίλτρο παρέχει κατά μέσο όρο περίπου 185 A ρεύματος αντιστάθμισης στις τρεις φάσεις.

	ΦΟΡΤΙΟ	ΔΙΚΤΥΟ
Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση ρεύματος	44.4%	6%
Συνολικό αρμονικό ρεύμα RMS	170	22
Ένταση RMS φάσης 1	380	348
Ένταση RMS φάσης 2	387	345
Ένταση RMS φάσης 3	392	343
PF	0.99	1
Φαινόμενη ισχύς (Kva)	248	253
Συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης	6,2%	2,9%

Πίνακας 36: Παράμετροι συστήματος πριν και μετά τη παρέμβαση.

	Μείωση
RMS φάση 1	8,42 %
RMS φάση 2	10,8 %
RMS φάση 3	12,5 %
THDI	38,4 %
THDU	3,3 %
Συνολικό αρμονικό ρεύμα	87 %

Πίνακας 37: Ποσοστιαίες μειώσεις.

Η κατανάλωση ισχύος μειώνεται από 249 Watt στα 223, μείωση 10,4%.

3.5 Οικονομική βελτιστοποίηση

Πριν την παρέμβαση

Ο φούρνος και ο κινητήρας λειτουργούν με μέση μηνιαία ισχύ 305 και 249 Kw αντίστοιχα. Οι ημερήσιες ώρες λειτουργίας ανέρχονται σε 20. Θεωρούμε αριθμό 30 ημερών ανά μήνα. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα στοιχεία κατανάλωσης, ωρών λειτουργίας και τα κόστη πριν την παρέμβαση.

Συνολική μέση μηνιαία ισχύς φορτίων (kW)	554
Ώρες λειτουργίας ανά μήνα	600
Μέση μηνιαία κατανάλωση ενέργειας (kWh/μήνα)	332,400
Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh/έτος)	3.988.800
Μέση τιμή χρέωσης ηλεκτρικής ενέργειας (€)	0,16
Μέσο μηνιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/μήνα)	53.184
Μέσο ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)	638.208

Μετά την παρέμβαση

Με την λειτουργία των φίλτρων η μέση μηνιαία ισχύς των φορτίων κυμαίνεται στα 272 και 222,6 kW για τον φούρνο και τον ηλεκτροκινητήρα αντίστοιχα. Παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα της παρέμβασης.

Συνολική μέση μηνιαία ισχύς φορτίων	494,6 KW
Ώρες λειτουργίας ανά μήνα	600
Μέση μηνιαία κατανάλωση ενέργειας (kWh/μήνα)	296.760
Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh/έτος)	3.561.120
Μέση τιμή χρέωσης ηλεκτρικής ενέργειας (€)	0,16
Μέσο μηνιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/μήνα)	47.481,6
Μέσο ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)	569.779,2

Συνοψίζοντας, επιτυγχάνεται 10,7% (68.429 €) μείωση των ετήσιων εξόδων ηλεκτρικής ενέργειας με μείωση 10,7% (427.680 kWh) ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας. Το κόστος των παρεμβάσεων ανέρχεται στα 19.600 €. Συνεπώς αναμένεται απόσβεση του έργου σε περίπου τρισίμησι μήνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος και βελτιστοποίηση της σε φορτία σε εργοστάσιο κεραμικών και συγκεκριμένα στην γραμμή του τούβλου. Τα δύο φορτία αφορούσαν τον φούρνο και τον οδηγό ηλεκτροκινητήρα της πρέσας.

Για την κατανόηση της ποιότητας ισχύος, πραγματοποιήθηκε λεπτομερή βιβλιογραφική αναφορά στις δύο κύριες αιτίες που αποτελούν τους παράγοντες υποβάθμισης ηλεκτρικής ενέργειας και στους μεγαλύτερους κινδύνους που παρουσιάζονται με την ύπαρξη τους στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό καθώς και στην οικονομική επιβάρυνση:

1. **Επαγωγικά και χωρητικά φορτία**, πηγή άεργων ρευμάτων.
2. **Μη γραμμικά φορτία**, πηγή αρμονικών ρευμάτων.

Στην συνέχεια αναλύθηκε εκτενώς ο τρόπος απόσβεσης των εν λόγω ρευμάτων με χρήση κατάλληλων διατάξεων. Για την ανάγκη αυτή, επικαλέστηκαν μαθηματικά μοντέλα όπως ο μετασχηματισμός Laplace για την μελέτη των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος στο πεδίο της συχνότητας και οι σειρές και ο μετασχηματισμός Fourier για την ανάλυση των αρμονικών κυμάτων.

Ύστερα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, ακολούθησε η καταγραφή τάσεων και εντάσεων των φορτίων με το σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν την ποιότητα της ηλεκτρικής τους ισχύος. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν και βάσει αυτών επιλέχθηκαν τα κατάλληλα φίλτρα για το εκάστοτε φορτίο για διόρθωση των κυματομορφών και κατ' επέκταση μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος.

Πραγματοποιήθηκε μια εκτίμηση της βελτιστοποίησης μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό LT-SPIICE, ενώ στο τέλος πραγματοποιήθηκαν οι πραγματικές μετρήσεις και πάρθηκαν τα τελικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση των παρεμβάσεων. Το συμπέρασμα της εργασίας αποτελεί το γεγονός πως, αν και μια μικρή βελτιστοποίηση στον συντελεστή ισχύος δείχνει φαινομενικά μικρή, στην πραγματικότητα τα ποσά που εξοικονομούνται από την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι άκρως σημαντικά για κάθε επιχείρηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. R. Kuphaldt, “Lessons In Electric Circuits, Volume II -- AC.”
- [2] J. M. Fiore, “AC Electrical Circuit Analysis AC Electrical Circuit Analysis A Practical Approach A Practical Approach.”
- [3] M. R. Ghallab, “C I R E D DAMPING TECHNIQUES OF HARMONIC RESONANCES IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS.”
- [4] A Bhatia, “PDHonline Course E144 (4 PDH) Power Factor in Electrical Energy Management.” [Online]. Available: www.PDHcenter.com
- [5] “Generator technologies_AGN025_B_nonlinearloads”.
- [6] *IEC 60034-1 INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Rotating electrical machines-Part 1: Rating and performance Machines électriques tournantes-Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE.* 2022.
- [7] “THD CALCULATION BY FILTERING FOR POWER QUALITY MONITORING”.
- [8] “Total Harmonic Distortion and Effects in Electrical Power Systems Associated Power Technologies.”
- [9] D. Shmilovitz, “On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 526–528, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839744.
- [10] J. M. R. Baptista, M. R. Cordeiro, and A. Machado E Moura, “Voltage wave quality in low voltage power systems,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 117–122, Apr. 2003, doi: 10.24084/repqj01.317.
- [11] A. Hoevenaars and P. Eng President, “HOW HARMONICS HAVE CONTRIBUTED TO MANY POWER FACTOR MISCONCEPTIONS,” 2014. [Online]. Available: www.mirusinternational.com
- [12] P. Ferracci, “Cahier technique no. 199 Power Quality.” [Online]. Available: <http://www.schneider-electric.com>
- [13] V. Venkatasubramanian and Y. Li, “Analysis of 1996 Western American Electric Blackouts.”
- [14] E. www.eaton.com, “Power factor correction: a guide for the plant engineer,” 2014. [Online]. Available: www.eaton.com
- [15] “Savings and Application Guide for Power Factor Correction and Harmonic Solutions Application Notes Savings and Application Guide for Power Factor Correction and Harmonic Solutions.” [Online]. Available: www.CDE.com
- [16] B. Brown and E. Services, “Section 1: Introduction and Basic Principles.”
- [17] Π. Φράγκος, Κ. Ε. Μ. Πολυτεχνείου, Ά. Μαλάμου, Η. Μηχανικός, and Μ. Υπολογιστών, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.”
- [18] A. de Almeida and S. Greenberg, “Electric Motors.”

- [19] P. Dusane, M.-Q. Dang, and G. Fandi, "Analysis of the Synchronous Machine in its Operational Modes: Motor, Generator and Compensator," 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319598168>
- [20] M. Kay and T. Khaing, "Power Factor Correction with Synchronous Condenser for Power Quality Improvement in Industrial Load," Online, 2014. [Online]. Available: www.ijsea.com
- [21] IEEE Industry Applications Society. Static Power Converter Committee. and IEEE Power Engineering Society. Transmission and Distribution Committee., *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [22] P. Sivaraman and C. Sharmeela, "Power quality and its characteristics."
- [23] R. Pinyol, "HARMONICS: CAUSES, EFFECTS AND MINIMIZATION."
- [24] E. H. Mayoral *et al.*, "Fourier Analysis for Harmonic Signals in Electrical Power Systems," 2016, doi: 10.5772/66730.
- [25] A. Singh, R. K. Singh, and A. K. Singh, "Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 4, pp. 22–41, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.4.4.
- [26] A. Srivastava and A. Singh, "Harmonics generated by Electric Arc Furnace in Electric Power System-A Review," vol. 11, pp. 2454–5767, doi: 10.18090/samriddhi.v11i01.8/samriddhi.v10i02.1.
- [27] Y.-S. Cho and H. Cha, "Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Jan. 2011, doi: 10.5370/jicee.2011.1.1.007.
- [28] S. M. Halpin and A. Card, "Power Quality," in *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2011, pp. 1179–1192. doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00040-9.
- [29] C. R. Bayliss and B. J. Hardy, "Power Quality – Harmonics in Power Systems," in *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Elsevier, 2012, pp. 987–1012. doi: 10.1016/B978-0-08-096912-1.00024-1.
- [30] A. H. Budhrani, K. J. Bhayani, and A. R. Pathak, "DESIGN PARAMETERS OF SHUNT ACTIVE FILTER FOR HARMONICS CURRENT MITIGATION 5."
- [31] Electrotek Concepts., "Industrial Power Factor Analysis Guidebook.," Portland, OR, Mar. 1995. doi: 10.2172/654078.
- [32] B. Industry Association, "9 TECHNICAL NOTES on Brick Construction Manufacturing of Brick," 2006. [Online]. Available: www.gobrick.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α)Υπολογισμοί LTSPICE.

Waveform: I(L1) X

Interval Start: 0s

Interval End: 91ms

Average: 10.458A

RMS: 321.21A

Waveform: I(L3) X

Interval Start: 0s

Interval End: 91ms

Average: 18.991A

RMS: 309.14A

Waveform: V(n002) X

Interval Start: 0s

Interval End: 90ms

Average: 39.921V

RMS: 407.78V

Waveform: I(L1) X

Interval Start: 0s

Interval End: 100ms

Average: 17.665A

RMS: 291.83A

Circuit: * C:\Users\paok4\Desktop\fournos0\singlephase_fournos.asc

.OP point found by inspection.

N-Period=1

Fourier components of I(r1)

DC component:-0.000146713

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.153e+02	1.000e+00	-79.22°	0.00°
2	1.000e+02	2.929e-04	7.053e-07	-88.71°	-9.49°
3	1.500e+02	1.115e+00	2.685e-03	-145.62°	-66.41°
4	2.000e+02	2.911e-04	7.009e-07	-87.43°	-8.21°
5	2.500e+02	4.123e+00	9.928e-03	19.23°	98.45°
6	3.000e+02	2.878e-04	6.930e-07	-86.11°	-6.89°
7	3.500e+02	3.829e+00	9.221e-03	13.88°	93.10°
8	4.000e+02	2.831e-04	6.818e-07	-84.66°	-5.44°
9	4.500e+02	1.402e-02	3.375e-05	27.12°	106.33°

Total Harmonic Distortion: 1.381296%(1.564195%)

vpeak: MAX(v(n001))=617.863 FROM 0 TO 0.1

ipeak: MAX(i(r1))=436.27 FROM 0 TO 0.1

t1: time=0.027711 at 0.027711

t2: time=0.00925988 at 0.00925988

dt: t1-t2=0.0184511

f: mod(360*dt*50+180,360)-180=-27.8799

pf: cos(f)=0.88393

Circuit: * C:\Users\paok4\Desktop\fournos0\fournos_nofilter.asc

Direct Newton iteration for .op point succeeded.

N-Period=1

Fourier components of I(r3)

DC component:-0.000425916

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.367e+02	1.000e+00	120.00°	0.00°
2	1.000e+02	8.444e-04	1.933e-06	-88.65°	-208.65°
3	1.500e+02	7.222e+00	1.654e-02	119.98°	-0.02°
4	2.000e+02	8.241e-04	1.887e-06	-86.86°	-206.86°
5	2.500e+02	9.951e+01	2.279e-01	120.00°	0.00°
6	3.000e+02	7.988e-04	1.829e-06	-84.31°	-204.31°
7	3.500e+02	4.435e+01	1.016e-01	120.00°	-0.00°
8	4.000e+02	7.793e-04	1.785e-06	-81.28°	-201.28°
9	4.500e+02	3.099e-03	7.096e-06	80.73°	-39.27°

Total Harmonic Distortion: 25.000678%(25.000487%)

N-Period=1

Fourier components of I(r2)

DC component:0.000380038

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.367e+02	1.000e+00	-120.00°	0.00°
2	1.000e+02	7.620e-04	1.745e-06	91.69°	211.69°
3	1.500e+02	7.223e+00	1.654e-02	-120.00°	0.00°
4	2.000e+02	7.570e-04	1.733e-06	92.55°	212.55°
5	2.500e+02	9.951e+01	2.279e-01	-120.00°	0.00°
6	3.000e+02	7.321e-04	1.676e-06	93.37°	213.37°
7	3.500e+02	4.435e+01	1.016e-01	-120.00°	-0.00°
8	4.000e+02	6.980e-04	1.598e-06	95.59°	215.59°
9	4.500e+02	2.454e-03	5.619e-06	-90.41°	29.59°

Total Harmonic Distortion: 25.000867%(25.000517%)

N-Period=1

Fourier components of I(r1)

DC component:-4.57268e-005

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.367e+02	1.000e+00	180.00°	0.00°
2	1.000e+02	8.234e-05	1.886e-07	-91.67°	-271.67°
3	1.500e+02	7.220e+00	1.653e-02	180.00°	-0.00°
4	2.000e+02	6.763e-05	1.549e-07	-80.10°	-260.10°
5	2.500e+02	9.950e+01	2.279e-01	-180.00°	-360.00°
6	3.000e+02	7.363e-05	1.686e-07	-60.58°	-240.58°
7	3.500e+02	4.435e+01	1.016e-01	-180.00°	-360.00°
8	4.000e+02	9.057e-05	2.074e-07	-56.54°	-236.54°
9	4.500e+02	7.738e-04	1.772e-06	51.58°	-128.42°

Total Harmonic Distortion: 25.000602%(25.000638%)

Circuit: * C:\Users\paok4\Desktop\fournos 2\Draft2.asc

Direct Newton iteration for .op point succeeded.

N-Period=1

Fourier components of I(r3)

DC component:0.000152194

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.366e+02	1.000e+00	-78.00°	0.00°
2	1.000e+02	2.950e-04	6.758e-07	54.95°	132.95°
3	1.500e+02	2.532e-02	5.800e-05	154.40°	232.41°
4	2.000e+02	2.671e-04	6.118e-07	19.90°	97.90°
5	2.500e+02	3.368e-02	7.714e-05	-101.01°	-23.01°
6	3.000e+02	2.207e-04	5.057e-07	-15.14°	62.87°
7	3.500e+02	1.207e-02	2.764e-05	132.94°	210.94°
8	4.000e+02	1.564e-04	3.583e-07	-50.13°	27.87°
9	4.500e+02	1.637e-02	3.750e-05	124.18°	202.18°

Total Harmonic Distortion: 0.010718% (0.035969%)

N-Period=1

Fourier components of I(r2)

DC component:-7.80635e-005

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.366e+02	1.000e+00	42.00°	0.00°
2	1.000e+02	1.476e-04	3.380e-07	-130.48°	-172.48°
3	1.500e+02	1.345e-02	3.081e-05	-48.19°	-90.19°
4	2.000e+02	1.226e-04	2.808e-07	-173.21°	-215.20°
5	2.500e+02	1.504e-02	3.444e-05	9.92°	-32.08°
6	3.000e+02	8.461e-05	1.938e-07	135.56°	93.56°
7	3.500e+02	1.544e-02	3.538e-05	-26.85°	-68.84°
8	4.000e+02	5.563e-05	1.274e-07	50.64°	8.64°
9	4.500e+02	1.323e-02	3.030e-05	16.47°	-25.53°

Total Harmonic Distortion: 0.006561% (0.016883%)

N-Period=1

Fourier components of I(r1)

DC component:7.4094e-005

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+01	4.366e+02	1.000e+00	-18.00°	0.00°
2	1.000e+02	1.487e-04	3.406e-07	60.33°	78.33°
3	1.500e+02	1.390e-02	3.184e-05	176.24°	194.24°
4	2.000e+02	1.502e-04	3.440e-07	30.56°	48.56°
5	2.500e+02	3.160e-02	7.238e-05	-74.63°	-56.64°
6	3.000e+02	1.526e-04	3.496e-07	0.61°	18.61°
7	3.500e+02	5.866e-03	1.344e-05	18.49°	36.48°
8	4.000e+02	1.558e-04	3.570e-07	-29.60°	-11.61°
9	4.500e+02	1.764e-02	4.040e-05	78.59°	96.59°

Total Harmonic Distortion: 0.008981% (0.029199%)

vpeak: MAX(v(n002,n004))=576.689 FROM 0 TO 0.091

ipeak: MAX(i(r3))=436.596 FROM 0 TO 0.091

t1: time=0.00765 at 0.00765

t2: time=0.00935 at 0.00935

dt: t1-t2=-0.0017

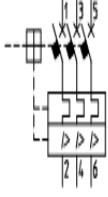
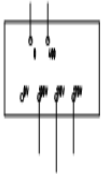
ph: mod(360*dt*50+180,360)-180=-30.6

pf: cos(ph)=0.860742

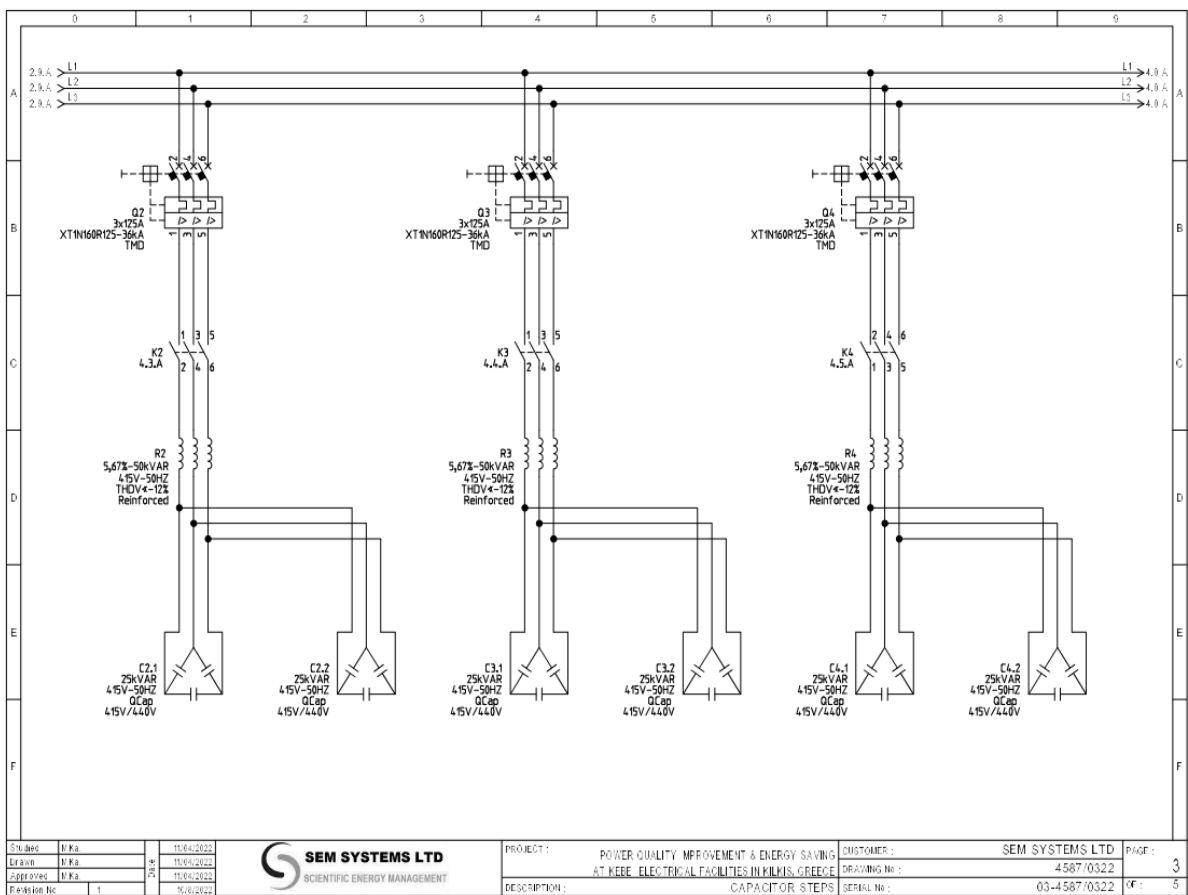
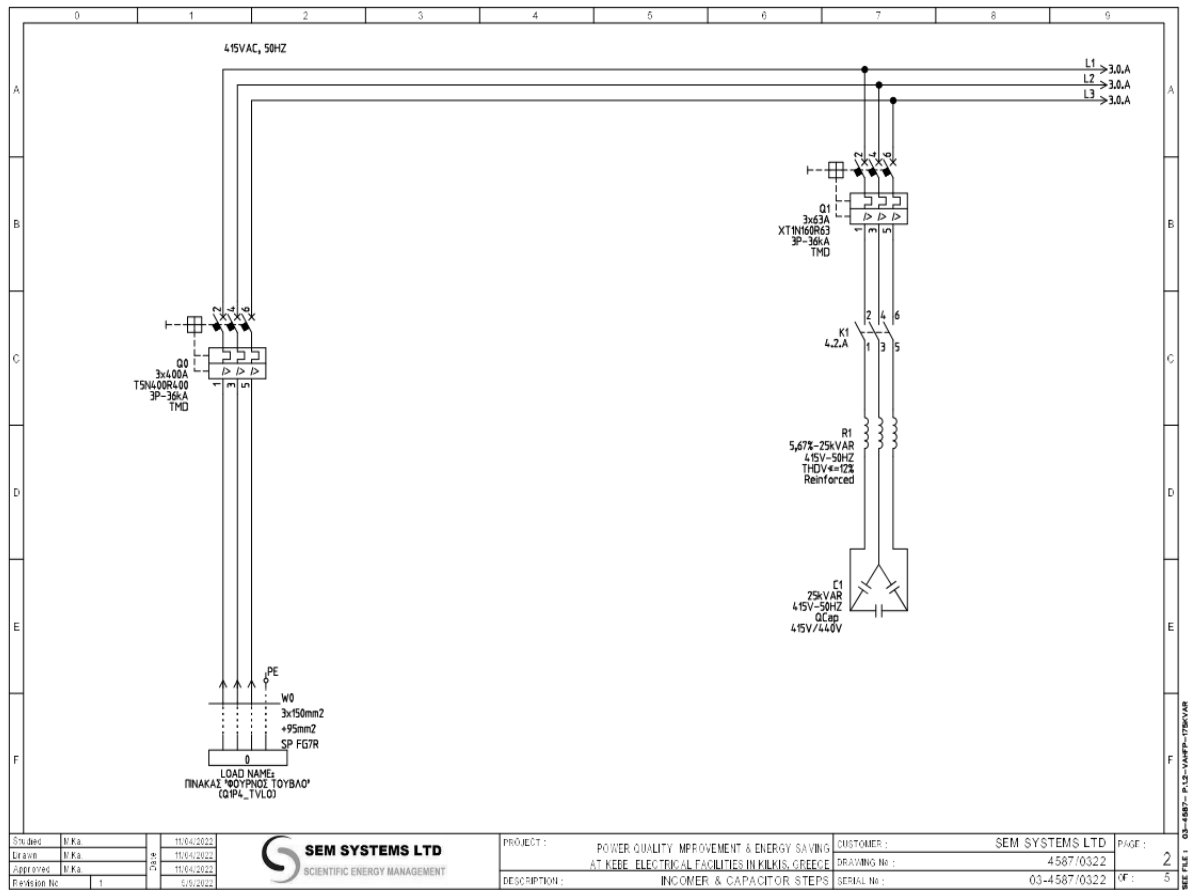
B) Στοιχεία παθητικού φίλτρου



Customer : SEM SYSTEMS LTD		PANEL : P.1.2																																																																									
PROJECT : POWER QUALITY IMPROVEMENT & ENERGY SAVING AT KEBE ELECTRICAL FACILITIES IN KILKIS, GREECE		Type: VAHFP-175KVAR (25+50+50+50)																																																																									
		Drawing No : 4587/0322																																																																									
		Serial No : 03-4587/0322																																																																									
ENCLOSURE	ELECTRICAL CHARACTERISTICS	Comments																																																																									
Type RITTAL: VX	Current Rating 400A																																																																										
Color RAL 7035	Supply Voltage/Frequency 415V / 50Hz																																																																										
Mounting INDOOR	S.C. Capacity 36kA																																																																										
Dimensions 1000X1800X400 (WxHxD)mm	Neutral System -																																																																										
Protection Degree IP54	Control Voltage 230V AC																																																																										
Form Type -	Signaling Voltage -																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev.</th> <th>Date</th> <th>Modification</th> <th>Drawn</th> <th>Date</th> <th>Checked</th> <th>Date</th> <th>Approved</th> <th>Date</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>11/04/2022</td> <td>FOR APPROVAL</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>30/05/2022</td> <td>FOR CONSTRUCTION</td> <td>M.Ka.</td> <td>30/05/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>30/05/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>30/05/2022</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10/08/2022</td> <td>AS BUILT</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>				Rev.	Date	Modification	Drawn	Date	Checked	Date	Approved	Date	0	11/04/2022	FOR APPROVAL	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	1	30/05/2022	FOR CONSTRUCTION	M.Ka.	30/05/2022	M.Ka.	30/05/2022	M.Ka.	30/05/2022	2	10/08/2022	AS BUILT	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022																																				
Rev.	Date	Modification	Drawn	Date	Checked	Date	Approved	Date																																																																			
0	11/04/2022	FOR APPROVAL	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022																																																																			
1	30/05/2022	FOR CONSTRUCTION	M.Ka.	30/05/2022	M.Ka.	30/05/2022	M.Ka.	30/05/2022																																																																			
2	10/08/2022	AS BUILT	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022																																																																			

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A		 3P Moulded case circuit breaker			 Power factor controller							A
B		 1P miniature circuit breaker			 Voltage Transformer							B
C		 2P Fuse disconnecter			 Thermostat							C
D		 Contactor			 Fan							D
E		 Capacitors										E
F		 Reactors										F
Studied M Ka Drawn M Ka Approved M Ka P-Revision No 1		11/04/2022 11/04/2022 11/04/2022 12/17/2022	 SEM SYSTEMS LTD SCIENTIFIC ENERGY MANAGEMENT			PROJECT : POWER QUALITY IMPROVEMENT & ENERGY SAVING AT KEEB ELECTRICAL FACILITIES IN KILKIS, GREECE			CUSTOMER : SEM SYSTEMS LTD DRAWING No : 4587/0322 SERIAL No : 03-4587/0322			PAGE : 1 OF : 5

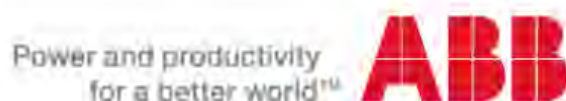
03-4587- P.L3-VARFP-175KVAR
SEE FILE 1



Technical specifications

QCap

Network voltage range	From 220 to 690 V
Frequency	50 and 60 Hz
Connection	Three-phase
Net output power	From 2.5 to 30 kvar
Tolerance on capacitance	2.5-12.5 kvar: -5 % / +10 % 15-30 kvar: 0 % / +10 %
Losses	< 0.2 Watt/kvar (dielectric only) < 0.35 Watt/kvar (typical without discharge resistor). < 0.5 Watt/kvar (including discharge resistor)
Discharge resistor	Included. Discharge to 50 V in 1 minute
Maximum permissible current	1.3 x I _n for continuous operation
Tolerance on voltage	1.1 x U _n for maximum 8 hours in every 24 hours (according to IEC 60831)
Case material	Recyclable aluminum
Color	Raw aluminum
Fixing	1 stud (M12). Recommended torque: 10 Nm
Dimensions (DxH)	90x417 mm
Weight	3 kg
Terminals	Cage screws. Recommended torque: 2 Nm
Minimum distance above unit	20 mm
Minimum distance between capacitors	30 mm
Earth	Earth connection on the enclosure fixation
Execution	Indoor use only
Installation	Horizontal or vertical
Temperature range	-25°C / +55°C (class D according to IEC 60831)
Altitude	Up to 2000 m without derating. For higher altitudes consult ABB.
Protection degree	IP20
Standards	IEC 60831-1 (2014), IEC 60831-2 (2014), UL 810, CSA C22.2 No 190



Specification and Supply conditions

Standard range of reactors for de-tuned PFC applications

PART I: DEFINITIONS AND GENERAL REQUIREMENTS

Definitions

U_n	(V)	Nominal network voltage phase to phase
f_1	(Hz)	Nominal network frequency
Q_{net}	(kvar)	Net output reactive power of (three-phase) capacitor-reactor combination at U_n
C_y	(μF)	Equivalent capacitance of one phase of the capacitor in Y-connection
p	(%)	Ratio of reactor impedance to capacitor impedance at f_1
L_n	(mH)	Nominal inductance of one phase of the (Y-connected) reactor
f_R	(Hz)	Resonance frequency of capacitor-reactor combination
$U_1, U_3, U_5, \dots$	(V)	Fundamental and harmonic voltage components of order 1, 3, 5, ...
I_n	(A)	Nominal fundamental current through one phase of the (Y-connected) capacitor-reactor combination
I_1	(A)	Maximum expected fundamental current through one phase of the (Y-connected) capacitor-reactor combination
$I_3, I_5, \dots$ (A)		Harmonic current (of order 3, 5, ...) through one equivalent (Y-connected) phase of the capacitor
I_{th}	(A)	Rated maximum thermal current of one (Y-connected) phase of the reactor
I_{lin}	(A)	Rated maximum current (in one phase of the Y-connected reactor) to maintain linearity.
P	(W)	Total losses at max ambient temperature and I_{th} at given load
P_{max}	(W)	Maximum losses
M	(kg)	Total mass of the reactor
$A \times B \times C$	(mm ³)	Minimum dimensions of parallelepiped completely surrounding the reactor
T_{max}	(°C)	Maximum ambient temperature
T_{min}	(°C)	Minimum ambient temperature

General

The reactor shall be of good workmanship and be free of signs of external damage and corrosion. Insulation materials shall not be damaged and any resin well hardened. The reactor shall not emit volatile compounds when used or stored within specified limits and conditions.

The core material shall be laminated iron.

The winding material shall be copper or aluminium.

Electrical terminals shall be of copper, brass or tin-plated copper/brass.

Cadmium plating is not admitted.

The reactor shall be vacuum impregnated with a suitable thermo-setting resin.

Fixation holes shall permit simultaneous effective earthing.

The marking label shall be clearly legible and made to withstand 15 years of typical service in an indoor environment. The marking shall contain at least the following information:

U_n , f_1 , Q_{net} , I_n , p , I_{th} , weight, applicable standard, serial number, year of manufacturing and manufacturer's type/article number.

Electrical requirements

The inductance of each individual phase of the reactor shall be within $\pm 3\%$ when measured at 20 degr C (± 5 degr C) at f_1 and I_n .

The inductance of each individual phase of the reactor shall be within $\pm 3\%$ when measured at 20 degr C (± 5 degr C) at f_1 and I_{lin} .

The reactor shall be designed to operate continuously at a network voltage equal to U_n with a current load of I_{th} at T_{max} and maintain sufficient safety margins to hotspot temperatures of its insulation while dissipating losses not in excess of P_{max} .

The reactor shall be designed to withstand the harmonic voltages associated with the specified harmonic currents.

The reactor shall be designed with sufficient electrical insulation and withstand an insulation test between windings and core of 3kV at 1 min according to IEC 76. The design and execution shall in particular be made to withstand not only steady-state voltages, but also such transient voltages that may occur for example between turns when the reactor is switched.

Mechanical requirements

Fixation: As per Part IV.

Other requirements

Protection degree is IP 00.

Applicable standards

IEC 289, VDE 0532

Power and productivity
for a better world™



Qnet	Pmax (for any value of p)
12.5kvar	110 W
25 kvar	175 W
50 kvar	275 W
100 kvar	500 W

Parameters for re-inforced execution

Network voltage spectrum:

- U3/U1=1%
- U5/U1=9%
- U7/U1=6.5%
- U11/U1=4.5%
- U13/U1=4%

But not exceeding a total THDU of 12%

Assuming the network voltage of 1.15xUn for I1 and the maximum harmonic voltage spectrum as per above (at 1.0xUn) for the other components a current spectrum is calculated (at fR and with Ln considering p):

I1
I3
I5
I7
I11
I13

Ith is defined as the root mean square of (I1, I3, I5, I7, I11, I13).

$$I_{th} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}$$

Ilin is defined in relation to In and as a function of p.

$$I_{lin} = K \times I_n$$

Where K is a function of p such that:

p(%):	5.67	6	7	12.5	14
K:	3.48	3.0	2.5	1.92	1.7

Temperatures are defined as:

- Operational Tmin = -25 °C
- Operational Tmax = 50 °C
- Storage Tmin = -40 °C
- Storage Tmax = 75 °C

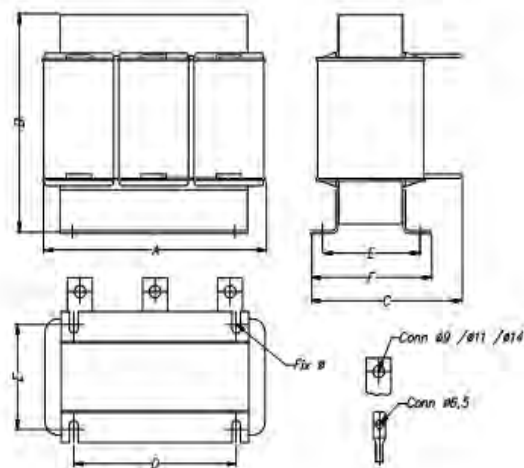
Maximum losses, P_{max} are defined as:

Q_{net}	P_{max} (for any value of p)
12.5kvar	175 W
25 kvar	275 W
50 kvar	420 W
100 kvar	800 W

PART IV: DEFINITION OF THE STANDARD RANGE OF REACTORS

The following specifies the standard range of capacitors.

All most relevant data are specified in the tables. Dimensions, fixation and connections refer to this drawing here below.



PART II: SPECIFIC PARAMETERS FOR STANDARD AND RE-INFORCED EXECUTIONS

Parameters for standard execution

Network voltage spectrum:

- U3/U1=0.5%
- U5/U1=6%
- U7/U1=5%
- U11/U1=3.5%
- U13/U1=3%

But not exceeding a total THDU of 8%

Assuming the network voltage of $1.1 \times U_n$ for I1 and the maximum harmonic voltage spectrum as per above (at $1.0 \times U_n$) for the other components a current spectrum is calculated (at f1 and with I_n considering p):

I1
I3
I5
I7
I11
I13

Ith is defined as the root mean square of (I1, I3, I5, I7, I11, I13).

$$I_{th} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}$$

Ilin is defined in relation to I_n and as a function of p.

$$I_{lin} = K \times I_n$$

Where K is a function of p such that:

p(%)	5.67	6	7	12.5	14
K	2.45	2.2 3	1.9	1.49	1.39

Temperatures are defined as:

- Operational Tmin = -25 °C
- Operational Tmax = 50 °C
- Storage Tmin = -40 °C
- Storage Tmax = 75 °C

Maximum losses, Pmax are defined as:

Γ)Στοιχεία ενεργού φίλτρου

11 Technical specification



Table 14: Technical data for core products

Rating of individual units	50A	100A	150A	200A
Nominal voltage	200 V – 480 V (Auto voltage sensing)			
Harmonic performance	up to 50th harmonic – compliance with IEEE 519 and G5/4			
Rated frequency	50 Hz or 60 Hz (Auto frequency sensing)			
Operation modes	All harmonics/All harmonics but not fundamental/Selectable harmonics			
Response time	<100 μs / 1 network cycle (selectable mode)			
Parallel units	Unlimited scalability, parallel operation of any rating combinations up to 7 units per one HMI is possible			
Switching frequency	20 kHz			
Controller	Real time digital control with FFT			
Load balancing capacity	100 % * I _N of active harmonic filter			
Neutral wire current	150 A	300 A	450 A	600 A
3-Wire/4-Wire	3W & 4W	3W & 4W	3W & 4W	3W & 4W
I/O	Inputs: 15-48 VDC or up to 277 VAC, potential free. Outputs: AC/DC, potential free			
Human-machine interface (HMI) Details				
Human-machine interface (HMI)	7" easy to use touch screen interface			
HMI languages	Multilingual interface			
Monitoring	On-site and remote monitoring possibilities			
Reporting	Reports data of power quality events up to 30 days			
Communication	Ethernet, ModBus TCP			
Installation and Mechanical details				
Cooling media	Air			
Protection degree	IP 20 (for the module) Pollution degree 2			
Needed airflow for the A2-module	350 m³/h	450 m³/h	750 m³/h	1000 m³/h
Ambient temperature	5-40 °C, without derating (See chapter 3.5)			
Altitude	<1000 m, without derating (See chapter 3.5)			
Humidity during operation	Maximum 85 % RH; non-condensing			
Humidity during storage/transportation	Maximum 95 % RH; non-condensing			
Power losses	<2.3 %			
Dimension* (WxDxH)	225x500x850 mm³	225x500x850 mm³	225x500x1150 mm³	225x500x1150 mm³
Weight	70 kg	70 kg	110 kg	110 kg
Cable connections	Standard bottom, main power on top available on request			
Main circuit fuses	NH 00 gL/gG 63A	NH 00 gL/gG 125A	NH 00 gL/gG 200A	NH 00 gL/gG 250A
Noise	60 dB	64 dB	67 dB	68 dB
Accuracy of signals - Current transformers	3 pieces, secondary 5A or 1A, class 1 or better preferred secondary 5A			
*300 mm free space below and above required for air ventilation.				

*300 mm free space below and above required for air ventilation.

Customer : SEM SYSTEMS LTD		PANEL : P.1.4 & P.1.5 Type: CB300A+RIK & TRANSFER																																																																																											
PROJECT : POWER QUALITY IMPROVEMENT FOR ENERGY SAVING AT KEBE ELECTRICAL FACILITIES IN KILKIS, GREECE		Drawing No : 4587/0322																																																																																											
		Serial No : 09-4587/0322																																																																																											
ENCLOSURE Type RITTAL: AX Color RAL 7035 Mounting INDOOR Dimensions 800X1200X300 (WxHxD)mm Protection Degree IP54 Form Type -		ELECTRICAL CHARACTERISTICS Current Rating 400A Supply Voltage/Frequency 415V / 50Hz S.C. Capacity 36kA Neutral System - Control Voltage 400VAC/230V AC/24VDC Signaling Voltage -																																																																																											
		Comments																																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev.</th> <th>Date</th> <th>Modification</th> <th>Drawn</th> <th>Date</th> <th>Checked</th> <th>Date</th> <th>Approved</th> <th>Date</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>11/04/2022</td> <td>FOR APPROVAL</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>11/04/2022</td> <td>FOR CONSTRUCTION</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> <td>M.Ka.</td> <td>11/04/2022</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10/08/2022</td> <td>AS BUILT</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> <td>A.Ch.</td> <td>10/08/2022</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>				Rev.	Date	Modification	Drawn	Date	Checked	Date	Approved	Date	0	11/04/2022	FOR APPROVAL	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	1	11/04/2022	FOR CONSTRUCTION	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	2	10/08/2022	AS BUILT	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022																																																						
Rev.	Date	Modification	Drawn	Date	Checked	Date	Approved	Date																																																																																					
0	11/04/2022	FOR APPROVAL	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022																																																																																					
1	11/04/2022	FOR CONSTRUCTION	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022	M.Ka.	11/04/2022																																																																																					
2	10/08/2022	AS BUILT	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022	A.Ch.	10/08/2022																																																																																					

