ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διερεύνηση εφαρμογών ενεργών φίλτρων στη ναυτιλία για επίλυση προβλημάτων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριστοτέλης Αλεξάνδρου

Επιβλέπων: Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ιωάννη Μ. Προυσαλίδη ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και ο οποίος καθ' όλη την διάρκεια της παρούσας μελέτης, παρά το βεβαρυμμένο πρόγραμμα του δεν παρέλειπε να επικοινωνεί μαζί μου και να με συμβουλεύει για ότι χρειαζόμουν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και όλους τους φίλους και συμφοιτητές που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω των νέων κανονισμών που επιβάλλονται στα πλοία για πιο πράσινες μεταφορές από την Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και τον IMO είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών αναγκών στα πλοία λόγω των νέων εγκαταστάσεων π.χ. scrubbers, water ballast treatment κλπ.

Αυτές οι νέες ενεργειακές ανάγκες είχαν ως συνέπεια να προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα ισχύος με σημαντικότερη την αρμονική ποιότητα ισχύος και στην αρμονική παραμόρφωση προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις του πλοίου.

Έτσι έπρεπε να βρεθούν τρόποι επίλυσης του προβλήματος αυτού. Ένας παλαιότερος τρόπος αντιμετώπισης της αρμονικής παραμόρφωση είναι η χρήση των παθητικών φίλτρων άλλα λόγω αυτών των υψηλότερων ενεργειακών αναγκών ήρθαν τα ενεργά φίλτρα στο προσκήνιο τα όποια είναι ακριβέστερα με πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τα παθητικά με την σχεδόν εξάλειψη του όλου προβλήματος.

Εν κατακλείδι, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα συζητηθούν η αρμονική ποιότητα ισχύος και η αρμονική παραμόρφωση, αλλά και τρόποι επίλυσης τους με περισσότερη έμφαση στα ενεργά φίλτρα. Τέλος γίνεται μια ανάλυση στα ενεργειακά συστήματα του πλοίου και μια περιπτωσιακή μελέτη στην αρμονική παραμόρφωση σε ένα κρουαζιερόπλοιο.

ABSTRACT

In recent years, due to the new regulations imposed on ships for green transport from the European Union and the IMO, they have resulted in an increase in the energy needs of ships due to the new facilities, e.g. scrubbers, water ballast treatment etc.

These new energy needs have had the effect of causing problems in the quality of power, with the most important being the harmonic quality of power and the harmonic distortion, causing serious effects on the ship's electrical installations.

So we had to find ways to solve this problem. An older way of dealing with harmonic distortion is to use passive filters but because of these higher energy needs active filters have come to the fore which are more accurate with much better results than passive ones by almost eliminating the whole problem.

In conclusion, in this diploma thesis we will discuss the harmonic quality of power and harmonic distortion, but also ways to solve them with more emphasis on active filters. Finally, an analysis is made of the ship's energy systems and a case study on the harmonic distortion of a cruise ship.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

1.1 Ηλεκτρική Ισχύς

Στιγμιαία Ισχύς

Η έννοια της στιγμιαίας ισχύος που ένας κλάδος, αποτελούμενος από μια συνθέτη αντίσταση Z και v(t), i(t) τα μεγέθη τάσης και ρεύματος αντίστοιχα, απορρόφα από τις στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος ορίζεται ως:

$$p(t) = v(t)i(t) \qquad (1.1)$$

Με μονάδες μέτρησης της ισχύος να είναι το Watt(W).

Μέση Ισχύς

Η μέση ισχύς προκύπτει από το ολοκλήρωμα της στιγμιαίας ισχύος σε μία περίοδο:

$$P = \frac{1}{T}\int v(t)i(t)dt \qquad (1.2)$$

Η μέση ισχύς σε μία μονοφασική ημιτονοειδής κατάσταση ορίζεται από τα μεγέθη:

$$v(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t) \qquad (1.3)$$

$$i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi) \qquad (1.4)$$

Άρα τελικά:

$$p(t) = v(t)i(t) \qquad (1.5)$$

$$p(t) = VI\cos\varphi(1 + \cos(2\omega t)) + VI\sin\varphi\sin(2\omega t)$$

Όπου η γωνία φ παρουσιάζει την χρονική διαφορά μεταξύ ενός σημείου μηδενισμού της τάσης και του ρεύματος.

Ενεργός ισχύς

Η ενεργός ισχύς P αντιπροσωπεύει την ωφέλιμη ισχύ που παράγεται και καταναλώνεται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε άλλη μορφή ενέργειας όπως κινητική, χημική κλπ.

Με βάση την παραπάνω σχέση η ενεργός ισχύς ορίζεται ως:

$$P = VI\cos\varphi \qquad (1.6)$$

Και στο πεδίο του χρόνου ως:

$$p(t) = P\cos\varphi(1 + \cos(2\omega t)) + VI\sin\varphi\sin(2\omega t) \qquad (1.7)$$

Με μονάδες μέτρησης της ισχύος αυτής να είναι το Watt(W).

Άεργος Ισχύς

Η άεργος ισχύς κυκλοφορεί κυρίως για να καλύψει τις ανάγκες παραγωγής κίνησης και παράγεται από πυκνωτές και καταναλώνεται από πηνία.

Με τον ίδιο τρόπο η άεργος ισχύς ορίζεται ως:

$$Q = VI\sin\varphi \tag{1.8}$$

Και στο πεδίο του χρόνου ως:

$$q(t) = VI\sin\varphi\sin(2\omega t) \tag{1.9}$$

Οι μονάδες μέτρησης της άεργου ισχύος είναι το VoltAmpere reactive(VAr)

Μιγαδική και Φαινόμενη Ισχύς

Η μιγαδική ισχύς ορίζεται ως:

$$\tilde{S} = \tilde{V}\tilde{I} = VI(cos\varphi + jsin\varphi) = P + jQ \tag{1.10}$$

Η φαινόμενη ισχύς είναι το μέτρο της μιγαδικής ισχύος άρα:

$$|\tilde{S}| = S = \sqrt{P^2+Q^2} = |\tilde{V}||\tilde{I}| \tag{1.11}$$

Οι μονάδες μέτρησης της φαινόμενης ισχύος είναι το VoltAmpere(VA)

Συντελεστής Ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ενεργού προς την φαινόμενη ισχύ:

$$PF = \frac{P}{S} \tag{1.12}$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι αδιάστατο μέγεθος με τιμές $-1 \leq PF \leq 1$.

1.2 Ποιότητα Ηλεκτρικής Ισχύος

Ποιότητα ισχύος ορίζεται το σύνολο των φυσικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής παροχής κάτω υπό κανονικές συνθήκες τροφοδότησης, που δεν διαταράσσουν ή διακόπτουν τις διαδικασίες παραγωγής και λειτουργίας.

Το πρόβλημα στην ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος υπάρχει όταν διαταραχθεί η κυματομορφή της τάσης, η κυματομορφή της έντασης ή η συχνότητα της τάσης. Λόγω της αυξανόμενης χρήσης μη γραμμικών φορτίων και της παραγωγής πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας (ηλιακή και αιολική ενέργεια),είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη για την μέτρηση της ποιότητας ισχύος. Ως μη γραμμικό ορίζεται το φορτίο, που ενώ τροφοδοτείται με τάση ημιτονοειδούς μορφής, άγει ρεύμα μη ημιτονοειδούς μορφής. Τα μη γραμμικά φορτία έχουν συνήθως στην διάταξή τους ηλεκτρονικά ισχύος. Τα πιο γνωστά είναι οι ρυθμιστές στροφών και τα τροφοδοτικά αδιάλειπτου λειτουργίας (UPS). Η κακή ποιότητα ισχύος δημιουργεί προβλήματα στα συστήματα μεταφοράς και διανομής, όπως επίσης και βλάβες στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό του καταναλωτή. Για παράδειγμα, είναι γνωστό πως οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στις διατάξεις πυκνωτών, όπως επίσης και φθορές στα μέσα

ζεύξης. Επίσης, η πτώση τάσης μπορεί να σταματήσει την λειτουργία ολόκληρων σταθμών ελέγχου που εξαρτώνται από ηλεκτρονικά συστήματα. Τα προβλήματα στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, που προκαλούνται από την κακή ποιότητα ισχύος, είναι κοινά για τον προμηθευτή και το τελικό χρήστη. Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί εάν η αιτία της κακής ποιότητας ισχύος είναι το σύστημα του προμηθευτή ή του καταναλωτή.
Η ποιότητα ισχύος είναι ένας όρος που συμπεριλαμβάνει τις μέχρι τώρα γνωστές απαιτήσεις, αλλά προσθέτει και άλλες, που αφορούν τα ειδικά χαρακτηριστικά των φορτίων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ποιότητα ισχύος είναι μια θεώρηση των πραγμάτων με επίκεντρο τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα που καλύπτει είναι σημαντικά είτε γιατί συνδέονται με αυξημένο κόστος (για βιομηχανικούς καταναλωτές) είτε ακόμα και με ανθρώπινες ζωές όταν για παράδειγμα οι καταναλωτές είναι νοσοκομεία, αεροδρόμια κ.α. Συνεπώς, η αποτελεσματική μέτρηση της ποιότητας ισχύος ,με αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα, είναι απαραίτητη για την κατανόηση της πραγματικής αιτίας των προβλημάτων, καθώς και για τον καθορισμό αποτελεσματικών αντίμετρων.

Έτσι σύμφωνα με την συντονιστική επιτροπή των προδιαγραφών του Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) της International Electrotechnical Commission (IEC) προτείνουν τα παρακάτω φαινόμενα σχετικά με τις διαταραχές της ποιότητας ισχύος.

- Βυθίσεις τάσης(Sags)
- Διακοπές(Interruptions)
- Διακυμάνσεις-Μη επαναλαμβανόμενες(Swells)
- Μεταβατικές (Transients)
- Υπέρταση(Overvoltage)
- Υπόταση(Under voltage)
- Εγκοπές(Notches)
- Επαναλαμβανόμενες διακυμάνσεις τάσης (Voltage Fluctuations)
- Αρμονικές (Harmonics)
- Δια-αρμονικές (Interharmonics)

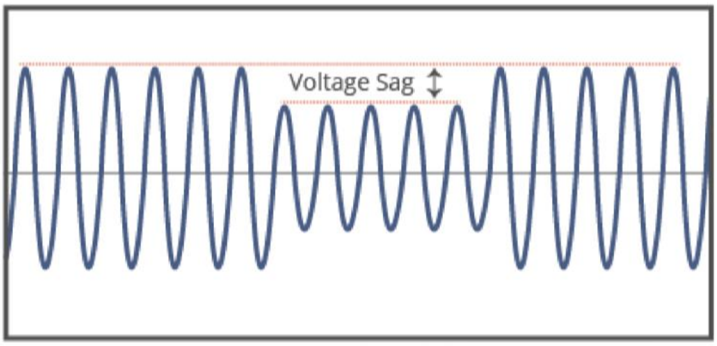
1.3 Βυθίσεις Τάσης (Sags)

Βύθιση τάσης είναι η μικρής διάρκειας μείωση της ενεργού τιμής της τάσης κυρίως λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο ή λόγω της σύνδεσης μεγάλων κινητήρων. Βύθιση της τάσης παρατηρείται επίσης και κατά την προσωρινή λειτουργία ενός μετασχηματιστή στην περιοχή κορεσμού της καμπύλης λειτουργίας του, λόγω των μεγάλων ασύμμετρων ρευμάτων που προκαλούνται (π.χ. κατά την ενεργοποίηση του).
Τα κύρια χαρακτηριστικά του φαινομένου της βύθισης τάσης είναι η διάρκεια του και το μέγεθος της τάσης. Για βυθίσεις τάσης που προκαλούνται από σφάλματα, το μέγεθος της τάσης εξαρτάται από την απόσταση του σφάλματος από το φορτίο, τις διασυνδέσεις του δικτύου καθώς και το πόσο δυνατό ή ασθενές είναι το δίκτυο (ισχύς βραχυκύκλωσης) στο PCC (point of common coupling - το σημείο όπου ενώνονται ηλεκτρικά το φορτίο, το σφάλμα και η παροχή ισχύος του δικτύου). Ο τύπος του σφάλματος και οι συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου είναι επίσης καθοριστικοί παράγοντες του μεγέθους της τάσης.
Η διάρκεια εξαρτάται κυρίως από το πόσο γρήγορα θα λειτουργήσει το σύστημα

προστασίας του δικτύου προκειμένου να απομονωθεί το τμήμα του δικτύου όπου εμφανίστηκε το σφάλμα. Οι χρόνοι που υπεισέρχονται εδώ είναι τόσο ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος (δηλαδή ο τύπος προστασίας που χρησιμοποιείται: ηλεκτρονόμοι αποστάσεως, διαφορική προστασία, ηλεκτρονόμοι υπερεύματος, ασφάλειες κτλ) καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών διακοπής του ρεύματος (διακόπτες ισχύος, ασφάλειες κτλ).

.Η χρήση υπόγειων καλωδίων αντί για εναέριες γραμμές μειώνει την συχνότητα σφαλμάτων λόγω κεραυνών. Επίσης, βελτίωση των χρόνων λειτουργίας του συστήματος προστασίας μειώνει την διάρκεια των βυθίσεων τάσης. Αλλαγές στην τρόπο με τον οποίο συνδέεται το φορτίο με το δίκτυο μπορούν επίσης να μειώσουν την πτώση τάσης κατά την διάρκεια ενός σφάλματος (για παράδειγμα η σύνδεση από διαφορετικά σημεία του δικτύου).

Από την πλευρά των καταναλωτών, βοήθεια μπορεί να αναζητηθεί σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (για παράδειγμα οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας - UPS) ή υποστήριξης της τάσης (DVR). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι για τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές - PLC η χρήση συσκευών αδιάλειπτης παροχής ενέργειας είναι τις περισσότερες φορές απαραίτητη και οικονομικά τεκμηριωμένη. Για τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας είναι πλέον κοινή πρακτική.



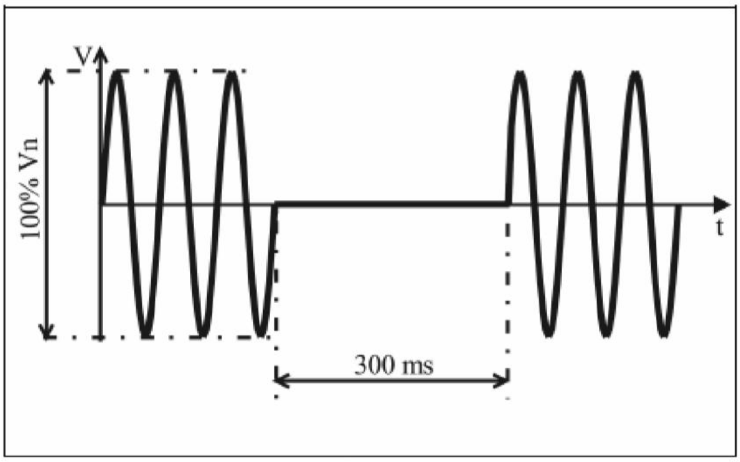
Σχήμα 1.1: Βυθίσεις Τάσης

1.4 Διακοπές (Interruptions)

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές οι διακοπές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: μικρής διάρκειας (μικρότερης από 3 λεπτά) και μεγάλης διάρκειας (μεγαλύτερης από 3 λεπτά).

Οι διακοπές μεγάλης διάρκειας οφείλονται είτε σε κάποιο σοβαρό σφάλμα, το οποίο δεν καθάρισε με την λειτουργία του συστήματος προστασίας και χρειάζεται αποκατάσταση επιτόπου, είτε λόγο προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης στο δίκτυο.
Οι διακοπές μικρής διάρκειας προέρχονται από την λειτουργία διακοπτών αυτόματης επαναφοράς (reclosers) και επαναφορά του δικτύου μετά από σφάλμα. Η διαδικασία αυτή είναι συνηθισμένη σε δίκτυα διανομής και εφαρμόζεται διότι μεγάλο ποσοστό των σφαλμάτων δεν είναι μόνιμα και εξαφανίζονται μετά την λειτουργία του συστήματος προστασίας. Οι διακοπές μπορούν να θεωρηθούν ειδική περίπτωση βυθίσεων τάσης (όπου η τάση γίνεται μηδέν) και όσο αφορά την επίδραση τους στα φορτία ισχύει ότι και για την επίδραση των βυθίσεων τάσης.
Σε εργοστασιακό περιβάλλον μία διακοπή μπορεί να προκαλέσει καταστροφική διακοπή της παραγωγικής αλυσίδας αυξάνοντας τον αριθμό των προϊόντων που απορρίπτονται ή των υλικών που απομακρύνονται. Σε μερικές περιπτώσεις, οι διακοπές μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο να καταστραφούν οι συσκευές ή ακόμα και τον τραυματισμό του προσωπικού.

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



του σφάλματος, επιταχύνουν τους χρόνους προστασίας αλλά και μειώνουν τον χρόνο αποκατάστασης σφαλμάτων.

Σχήμα 1.2: Διακοπές Τάσης

1.5 Διακυμάνσεις-Μη επαναλαμβανόμενες (Swells)

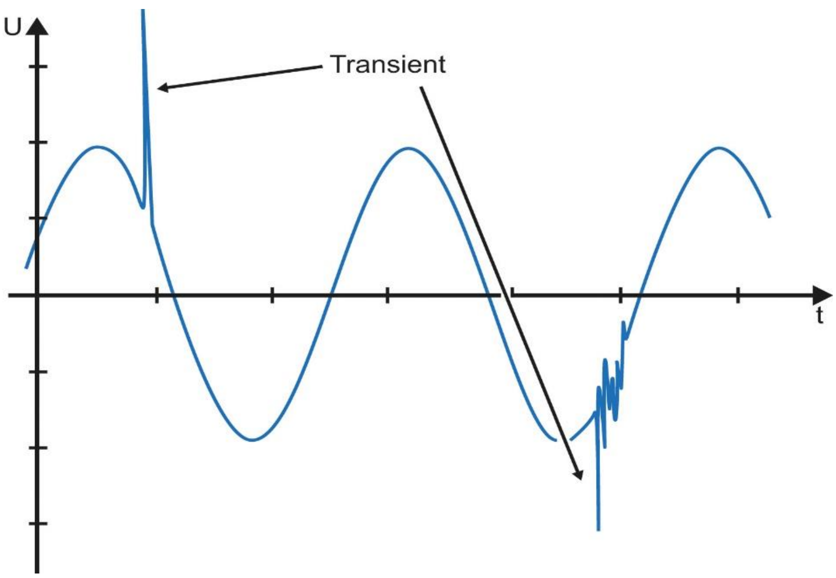
Μια υπέρταση μικρής διάρκειας ή στιγμιαία υπέρταση ορίζεται ως μία αύξηση μεταξύ 1,1 και 1,8 pu στην rms τιμή της τάσης ή του ρεύματος στη συχνότητα ισχύος για διάρκειες από 0,5 κύκλους μέχρι 1 λεπτό. Όπως και με τις βυθίσεις τάσης, οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας συνήθως συνδέονται με συνθήκες σφάλματος του συστήματος, αλλά δεν είναι τόσο κοινή διαταραχή όσο η βύθιση τάσης. Μια αιτία υπέρτασης είναι η προσωρινή αύξηση τάσης στις υγιείς φάσεις κατά τη διάρκεια ενός μονοφασικού με τη γη βραχυκυκλώματος. Υπέρταση μπορεί επίσης να προκληθεί από την απενεργοποίηση ενός μεγάλου φορτίου ή την ενεργοποίηση μιας μεγάλης συστοιχίας πυκνωτών. Οι υπερτάσεις χαρακτηρίζονται από το μέγεθός τους (ενεργός τιμή) και τη διάρκειά τους. Η σοβαρότητα της διαταραχής της υπέρτασης κατά τη διάρκεια σφάλματος είναι μία συνάρτηση της θέσης του σφάλματος, της αντίστασης του συστήματος και της γείωσης. Οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίζονται και οι βυθίσεις τάσης, δηλ. με UPS και διατηρητές ισχύος.

1.6 Μεταβατικές (Transients)

Οι μεταβατικές υπερτάσεις είναι γρήγορες και σύντομης διάρκειας διαταραχές που προκαλούν παραμορφώσεις στην τάση ή το ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά και οι κυματομορφές των μεταβατικών υπερτάσεων εξαρτώνται από το σύστημα παραγωγής ενέργειας και τις παραμέτρους του ηλεκτρικού δικτύου (π.χ., αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα) στο σημείο ενδιαφέροντος. Οι μεταβατικές υπερτάσεις μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα χαρακτηριστικά τους όπως πλάτος, διάρκεια, χρόνος ανόδου, πλάτος φασματικής πυκνότητας ή συχνότητα εμφάνισης. Οι μεταβατικές υπερτάσεις συνήθως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: κρουστικές υπερτάσεις (impulsive transients) και υπερτάσεις με αποσβενόμενη ταλάντωση (oscillatory transient).

Οι κρουστικές υπερτάσεις (impulsive transients) είναι απότομες μεταβολές στη μόνιμη κατάσταση της τάσης ή του ρεύματος. Η πιο κοινή αιτία των κρουστικών υπερτάσεων είναι οι κεραυνοί. Οι κρουστικές υπερτάσεις είναι πολύ γρήγορες, μικρότερες από 50 μsec. Οι κρουστικές υπερτάσεις μπορούν να διεγείρουν τα κυκλώματα συντονισμού ισχύος του συστήματος και να παράγουν υπερτάσεις με αποσβενόμενη ταλάντωση. Οι υπερτάσεις με αποσβενόμενη ταλάντωση (oscillatory transients) αποτελούν ξαφνική αλλαγή της σταθερής κατάστασης της τάσης, του ρεύματος ή και των δύο, χωρίς να μεταβάλλεται η συχνότητα του συστήματος, τόσο προς τη θετική όσο και προς την αρνητική κατεύθυνση στην πολικότητα. Μια υπέρταση με αποσβενόμενη ταλάντωση είναι μια τάση ή ένα ρεύμα των οποίων η στιγμιαία τιμή αλλάζει πολικότητα ταχύτατα. Οι υπερτάσεις με αποσβενόμενη ταλάντωση κατηγοριοποιούνται με βάση το φασματικό τους περιεχόμενο σε χαμηλής, μεσαίας και υψηλής συχνότητας. Αυτή η κατηγορία διαταραχών συναντάται συχνά σε συστήματα διανομής κυρίως λόγω ζεύξης και απόζευξης συσκευών, συστοιχιών πυκνωτών κ.ά.

Οι επιπτώσεις των μεταβατικών υπερτάσεων σε ένα σύστημα ισχύος εξαρτάται από το πλάτος τους και τη συχνότητά τους. Στην περίπτωση των κρουστικών υπερτάσεων, το πλάτος τους είναι η κύρια αιτία των προβλημάτων. Η ζημιά που μπορεί να προκληθεί στον εξοπλισμό λόγω κρουστικής υπέρτασης μπορεί να είναι άμεση (π.χ. κεραυνός). Μπορεί επίσης να είναι σταδιακή, όπως στην περίπτωση των χαμηλού πλάτους μεταβατικών υπερτάσεων, οι οποίες διασπούν με αργό ρυθμό τη μόνωση του εξοπλισμού.



Σχήμα 1.3: Μεταβατική υπέρταση

1.7 Υπέρταση(Overvoltage)

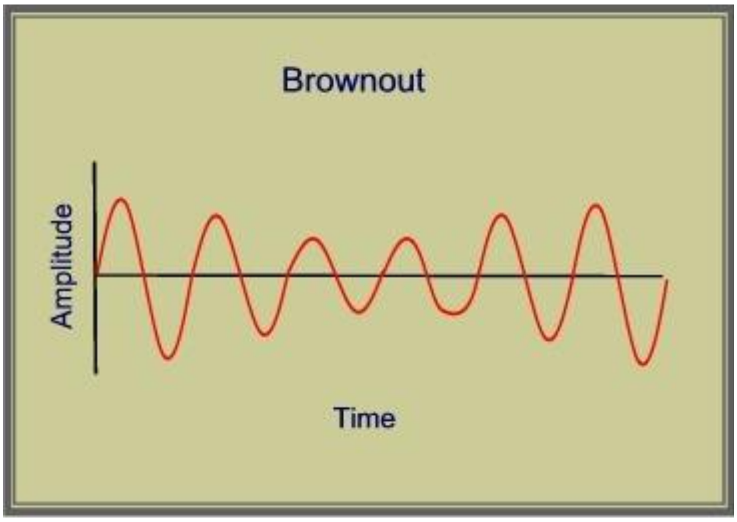
Οι παροδικές υπερτάσεις είναι στιγμιαίες ανυψώσεις της τάσης (το αντίθετο των βυθίσεων). Οι ίδιοι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για κατηγοριοποίηση των βυθίσεων χρησιμοποιούνται και για την κατηγοριοποίηση των παροδικών ανυψώσεων. Οι υπερτάσεις που εμφανίζονται κατά την διάρκεια λειτουργίας ενός δικτύου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

Υπερτάσεις μεγαλύτερης διάρκειας εμφανίζονται κατά την διάρκεια μονοφασικών σφαλμάτων σε μη γειωμένα δίκτυα ή δίκτυα γειωμένα μέσω σύνθετης αντίστασης (voltage swells). Οι υπερτάσεις στην χειρότερη περίπτωση ισούνται με την πολική τάση του δικτύου, εμφανίζονται στις υγιείς φάσεις και διαρκούν όσο διαρκεί το σφάλμα.
Οι τρόποι επίλυσης θα μπορούσαν να είναι οι ίδιοι με αυτούς για τις βυθίσεις. Όμως λόγω της μικρής συχνότητας και έκτασης του φαινομένου στην πράξη δεν λαμβάνονται

κάποια μέτρα αποκλειστικά για αυτό το πρόβλημα. Ενέργειες που γίνονται και για άλλες διαταραχές εξομαλύνουν και τα αποτελέσματα αυτών των διαταραχών.

1.8 Υπόταση(Undervoltage)

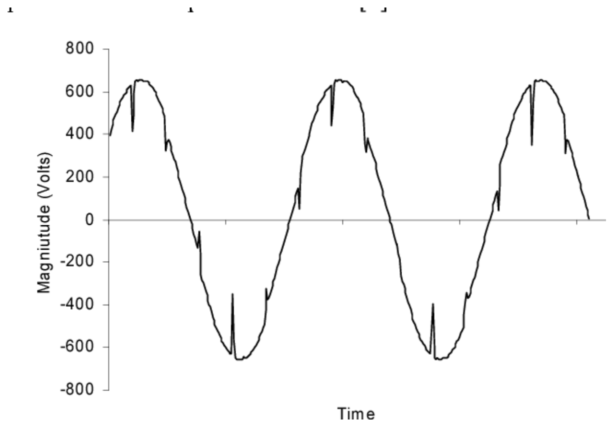
Οι υποτάσεις είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής συμβάντων που είναι το αντίθετο από τα συμβάντα που προκαλούν οι υπερτάσεις. Η ενεργοποίηση κατά την φόρτωση ή η απενεργοποίηση μιας ομάδας πυκνωτών μπορεί να προκαλέσει υπόταση έως ότου ο εξοπλισμός ρύθμισης τάσης στο σύστημα μπορεί να επαναφέρει την τάση εντός των ανοχών. Υπερφορτωμένα κυκλώματα μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε υποτάσεις.
Ο όρος πτώση τάσης(Brownout) χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει παρατεταμένες περιόδους χαμηλής τάσης που ξεκίνησαν ως μια συγκεκριμένη στρατηγική αποστολής χρησιμότητας για τη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.4: Πτώση Τάσης(Brownout)

1.9 Εγκοπές (Notches)

Οι εγκοπές είναι μια περιοδική διαταραχή της τάσης που προκαλείται από την κανονική λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος, όταν γίνεται μεταγωγή του ρεύματος από τη μία φάση στην άλλη. Αφού οι εγκοπές συμβαίνουν περιοδικά και άρα εμφανίζονται συνεχώς, μπορούν να περιγράφουν μέσω του φάσματος αρμονικών της τάσης που επηρεάζουν. Ωστόσο, η διαταραχή αυτή αντιμετωπίζεται γενικά ως μια ειδική περίπτωση. Οι συχνότητες των εγκοπών μπορεί να είναι αρκετά υψηλές και έτσι το φαινόμενο δεν μπορεί εύκολα να περιγράφει με εξοπλισμό μετρήσεων που χρησιμοποιείται κανονικά για την ανάλυση αρμονικών. Οι εγκοπές μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στη μόνωση μετασχηματιστών και γεννητριών και σε αυξημένης ευαισθησίας εξοπλισμό μετρήσεων.



Σχήμα 1.5: Εγκοπές τάσης

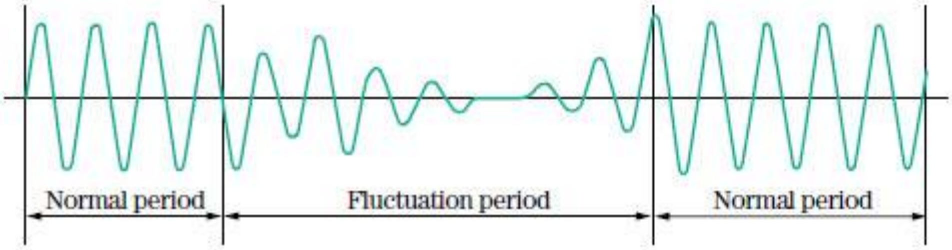
1.10 Επαναλαμβανόμενες διακυμάνσεις τάσης (Voltage Fluctuations-Flicker)

Το φλίκερ, ή αλλιώς γρήγορη διακύμανση της τάσης που οδηγεί σε μεταβατικές διαταραχές στο φως, είναι μία οπτική ενόχληση λόγω αστάθειας της έντασης του φωτός. Η διακύμανση του πλάτους της τάσης είναι συνήθως σε επίπεδο χαμηλότερο του 3% της παρεχόμενης τάσης και δεν έχει κάποια αξιοπρόσεκτη επίδραση στον εξοπλισμό. Αυτή η διακύμανση ωστόσο μπορεί να προκαλέσει ενόχληση στα μάτια. Το επίπεδο της ενόχλησης εξαρτάται από την συχνότητα και το πλάτος της αλλαγής της έντασης του φωτός και από τον παρατηρητή (δεν αντιλαμβάνονται όλοι την ίδια ενόχληση στην ίδια διακύμανση της τάσης).

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

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

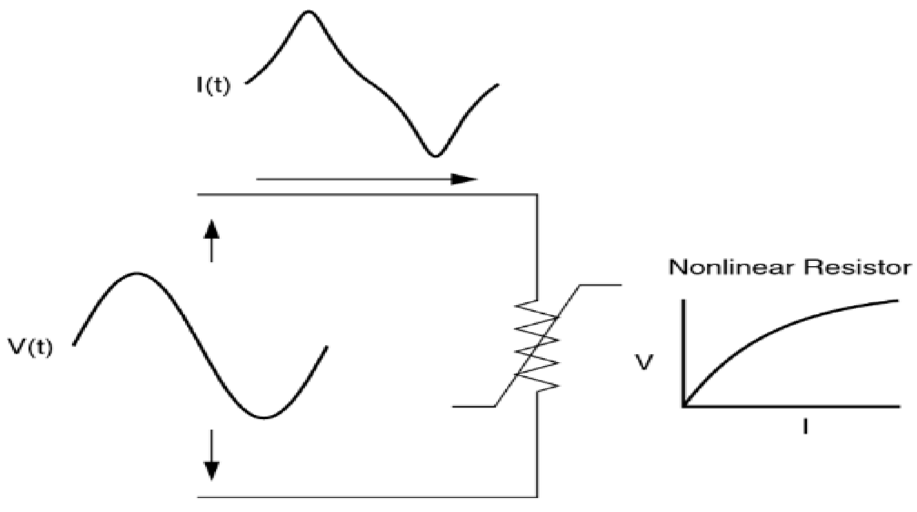
Οι συχνές, γρήγορες διακυμάνσεις σε ρεύματα φορτίου αποδίδονται στις λειτουργίες εκκίνησης κινητήρων, όπου το ρεύμα του κινητήρα συνήθως είναι 3-5 φορές το ονομαστικό ρεύμα για μία σύντομη χρονική περίοδο. Εάν ένας αριθμός κινητήρων τίθεται σε λειτουργία την ίδια ώρα, ή αν ο ίδιος κινητήρας ξεκινά και σταματά επανειλημμένα, η συχνότητα των αλλαγών της τάσεως μπορεί να προκαλέσει μαρμαρυγή στις εγκαταστάσεις φωτισμού, που θα είναι ορατή με γυμνό μάτι.



Σχήμα 1.6: Διακυμάνσεις Τάσης

1.12 Αρμονικές (Harmonics)

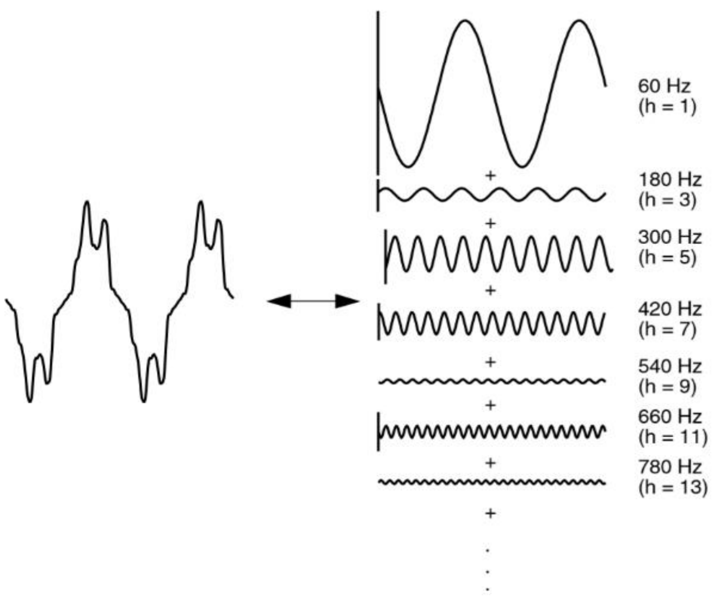
Οι αρμονικές είναι ημιτονοειδείς τάσεις ή ρεύματα που έχουν συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας με την οποία έχει σχεδιαστεί το σύστημα τροφοδοσίας (ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα, συνήθως 50 ή 60 Hz). Περιοδικά παραμορφωμένες κυματομορφές μπορούν να αποσυντεθούν σε ένα άθροισμα των θεμελιωδών συχνοτήτων και αρμονικών.
Η αρμονική παραμόρφωση προκαλείται από μη γραμμικές συσκευές στο σύστημα ισχύος. Η μη γραμμική συσκευή είναι μια συσκευή στην οποία το ρεύμα δεν είναι ανάλογο με την εφαρμοζόμενη τάση. Το Σχήμα 1.7 απεικονίζει αυτήν την ιδέα για την περίπτωση μιας ημιτονοειδούς τάσης που εφαρμόζεται σε μια απλή μη γραμμική αντίσταση στην οποία η τάση και το ρεύμα ποικίλλουν ανάλογα με την καμπύλη που φαίνεται. Ενώ η εφαρμοζόμενη τάση είναι απόλυτα ημιτονοειδής, το προκύπτον ρεύμα παραμορφώνεται. Η αύξηση της τάσης κατά μερικά τοις εκατό μπορεί να προκαλέσει



διπλασιασμό του ρεύματος και λήψη διαφορετικής κυματομορφής. Αυτή είναι η πηγή της πιο αρμονικής παραμόρφωσης σε ένα σύστημα ισχύος.

Σχήμα 1.7: Τρέχουσα παραμόρφωση που προκαλείται από μη γραμμική αντίσταση

Το σχήμα 1.8 δείχνει ότι οποιαδήποτε περιοδική, παραμορφωμένη κυματομορφή μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα ημιτονοειδών. Όταν μια κυματομορφή είναι πανομοιότυπη από τον ένα κύκλο στον άλλο, μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα καθαρών ημιτονοειδών κυμάτων στα οποία η συχνότητα κάθε ημιτονοειδούς είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας του παραμορφωμένου κύματος. Αυτό το πολλαπλό ονομάζεται αρμονική του θεμελιώδους, εξ ου και το όνομα αυτού του αντικειμένου. Το άθροισμα των ημιτονοειδών αναφέρεται ως μια σειρά Fourier, που πήρε το όνομά του από τον μεγάλο μαθηματικό που ανακάλυψε την ιδέα. Λόγω της παραπάνω ιδιότητας, η έννοια της σειράς Fourier εφαρμόζεται καθολικά στην ανάλυση αρμονικών προβλημάτων. Το σύστημα μπορεί τώρα να αναλυθεί ξεχωριστά σε κάθε αρμονικό. Επιπλέον, η εύρεση της απόκρισης του συστήματος ενός ημιτονοειδούς κάθε αρμονικής είναι μεμονωμένα πολύ πιο απλή σε σύγκριση με αυτήν με όλες τις παραμορφωμένες κυματομορφές. Οι έξοδοι σε κάθε συχνότητα συνδυάζονται για να σχηματίσουν μια νέα σειρά Fourier, από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η κυματομορφή εξόδου, εάν είναι επιθυμητό. Συχνά, ενδιαφέρουν μόνο τα μεγέθη των αρμονικών. Όταν τόσο οι θετικοί όσο και οι αρνητικοί μισοί κύκλοι μιας κυματομορφής έχουν πανομοιότυπα σχήματα, η σειρά Fourier περιέχει μόνο περιττές αρμονικές. Αυτό προσφέρει μια περαιτέρω απλοποίηση για τις περισσότερες μελέτες συστημάτων ισχύος, επειδή οι περισσότερες κοινές συσκευές παραγωγής αρμονικών φαίνονται οι ίδιες και στις δύο πολικότητες. Στην πραγματικότητα, η παρουσία ομοιόμορφων αρμονικών αποτελεί συχνά ένδειξη ότι υπάρχει κάτι λάθος είτε με τον εξοπλισμό φόρτωσης είτε με τον μορφοτροπέα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση.



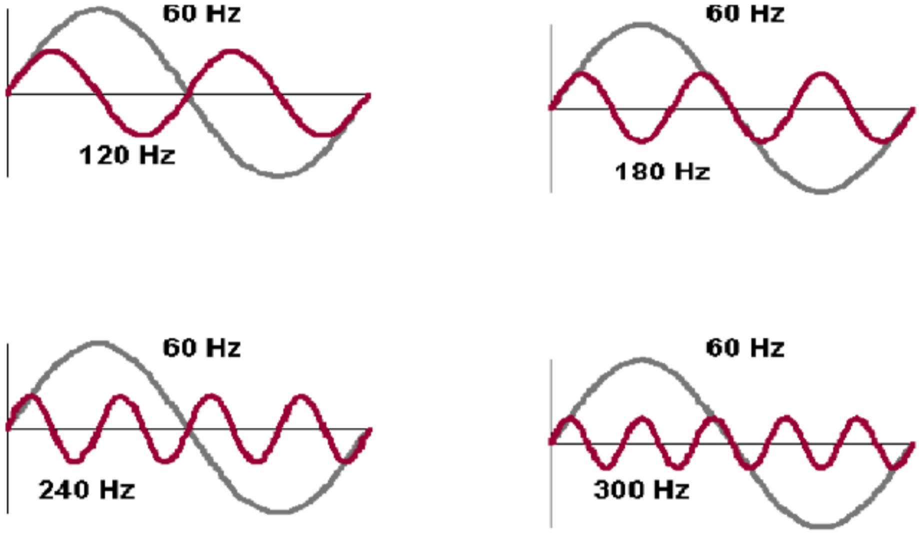
Σχήμα 1.8: Αναπαράσταση σειράς Fourier μιας παραμορφωμένης κυματομορφής

Συνήθως, οι αρμονικές υψηλότερης τάξης (πάνω από το εύρος 25 έως 50, ανάλογα με το σύστημα) είναι αμελητέες για την ανάλυση του συστήματος ισχύος. Αν και μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές σε ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος, συνήθως δεν προκαλούν βλάβη στο σύστημα τροφοδοσίας. Είναι επίσης δύσκολο να συλλεχθούν αρκετά ακριβή δεδομένα για τη μοντελοποίηση συστημάτων ισχύος σε αυτές τις συχνότητες. Η συχνή εξαίρεση σε αυτό συμβαίνει όταν υπάρχουν συντονισμοί συστήματος στο εύρος συχνοτήτων. Αυτοί οι συντονισμοί μπορούν να δημιουργηθούν με εγκοπή ή εναλλαγή μεταβατικών σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Αυτό προκαλεί κυματομορφές τάσης με πολλαπλές μηδενικές διασταυρώσεις που διαταράσσουν τα κυκλώματα χρονισμού. Αυτοί οι συντονισμοί συμβαίνουν γενικά σε συστήματα με υπόγειο καλώδιο αλλά χωρίς πυκνωτές διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Εάν το σύστημα ισχύος απεικονίζεται ως στοιχεία σειράς και διακλάδωσης, όπως είναι η συμβατική πρακτική, η συντριπτική πλειονότητα των μη γραμμικών στο σύστημα βρίσκονται σε στοιχεία διακλάδωσης (δηλαδή, φορτία). Η σύνθετη αντίσταση του συστήματος παροχής ισχύος (δηλαδή, η σύνθετη αντίσταση μεταξύ της πηγής και του φορτίου) είναι αξιοσημείωτα γραμμική. Σε μετασχηματιστές, επίσης, η πηγή αρμονικών είναι ο κλάδος διακλάδωσης (μαγνητική αντίσταση) του κοινού μοντέλου «Τ». η σύνθετη αντίσταση διαρροής είναι γραμμική. Έτσι, οι κύριες πηγές αρμονικής παραμόρφωσης θα είναι τελικά τα φορτία τελικών χρηστών. Αυτό δεν σημαίνει ότι όλοι οι τελικοί χρήστες που αντιμετωπίζουν αρμονικές παραμορφώσεις θα έχουν οι ίδιοι σημαντικές πηγές αρμονικών, αλλά ότι η αρμονική παραμόρφωση γενικά προέρχεται από κάποιο φορτίο τελικού χρήστη ή συνδυασμό φορτίων.

Η αρμονική παραμόρφωση του συστήματος ισχύος δεν είναι νέο φαινόμενο οι προσπάθειες περιορισμού της σε αποδεκτές αναλογίες αποτελούν ανησυχία των μηχανικών ισχύος από τις πρώτες μέρες των συστημάτων χρησιμότητας. Εκείνη την εποχή, η παραμόρφωση προκαλείται συνήθως από τον μαγνητικό κορεσμό των μετασχηματιστών ή από ορισμένα βιομηχανικά φορτία, όπως φούρνοι τόξου ή συγκολλητές τόξου. Οι κύριες ανησυχίες ήταν τα αποτελέσματα των αρμονικών σε σύγχρονα και επαγωγικά μηχανήματα, παρεμβολές τηλεφώνου και αστοχίες πυκνωτή ισχύος. Στο παρελθόν, αρμονικά προβλήματα μπορούσαν συχνά να γίνουν ανεκτά επειδή ο εξοπλισμός ήταν συντηρητικός σχεδιασμός και οι γειωμένες συνδέσεις μετασχηματιστών “wye-delta” χρησιμοποιήθηκαν με σύνεση.

Οι παραμορφώσεις του θεμελιώδους ημιτονοειδούς συμβαίνουν γενικά σε πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Έτσι, σε ένα σύστημα ισχύος 60 Hz, ένα αρμονικό κύμα είναι ένα ημιτονοειδές που έχει μια συχνότητα που εκφράζεται από τον ακόλουθο τύπο, όπου το n είναι ακέραιος:

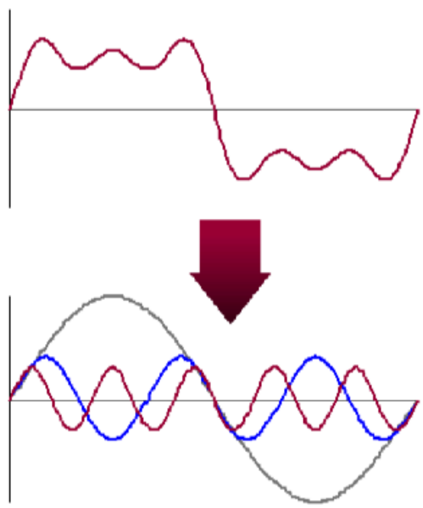
$$\mathrm{f_{harmonics}} = \mathrm{n} \times 60\ \mathrm{Hz} \tag{1.13}$$



Σχήμα 1.9: Θεμελιώδης συχνότητα και Αρμονικές($2^{η}$, $3^{η}$, $4^{η}$, $5^{η}$ αρμονική)

Οι αρμονικές συνιστώσες προσδιορίζονται μετά από ανάλυση κατά Fourier της κυματομορφής, Για τα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας η θεμελιώδης συχνότητα είναι 50 Hz (60 Hz). Οι αρμονικές συνιστώσες της ανάλυσης Fourier διακρίνονται σε:

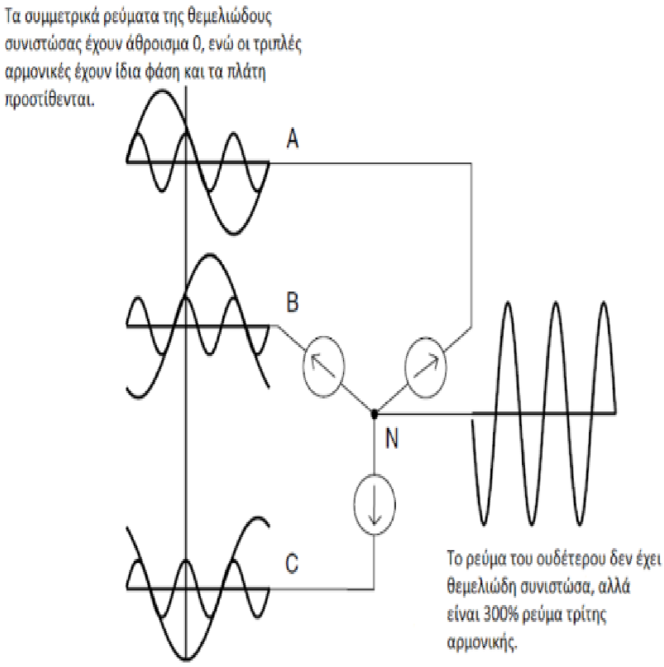
- Περιττές αρμονικές (odd harmonics) (5η, 7η, 11η,…..)
- Άρτιες αρμονικές (even harmonics (2η, 4η, 6η,…..)
- Τριπλές αρμονικές (triplen harmonics) (3η, 9η, 15η,.….) (περιττές που είναι πολλαπλάσια του 3)



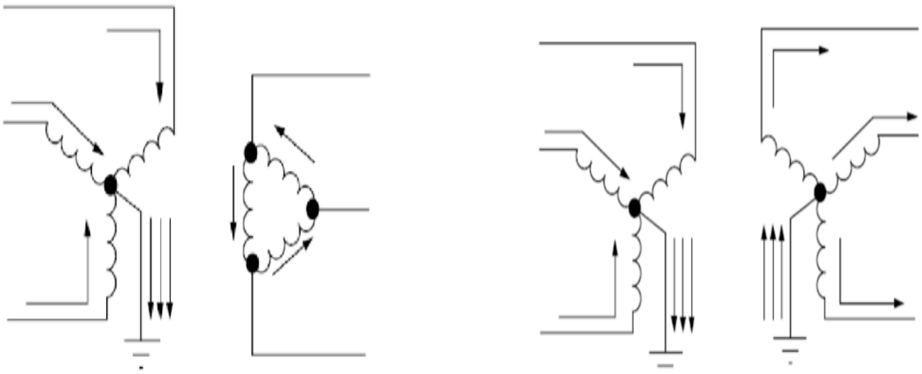
Σχήμα 1.10: Παραμορφωμένο κύμα που αποτελείται από την υπέρθεση ενός θεμελιώδους και μικρότερου τρίτου αρμονικού και πέμπτου αρμονικού 60 Hz.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τριπλές αρμονικές είναι τα περίττα πολλαπλάσια της τρίτης αρμονικής (h 3, 9, 15, 21,…). Αξίζουν ιδιαίτερη προσοχή επειδή η απόκριση του συστήματος είναι συχνά πολύ διαφορετική για τα τριπλάσια από ό, τι για τις υπόλοιπες αρμονικές. Οι τριπλές αρμονικές γίνεται ένα σημαντικό ζήτημα για συστήματα γείωσης με ρεύμα που ρέει στο ουδέτερο. Δύο τυπικά προβλήματα είναι η υπερφόρτωση της ουδέτερης και της τηλεφωνικής παρεμβολής. Ακούγεται επίσης περιστασιακά συσκευές που δεν λειτουργούν σωστά επειδή η τάση γραμμής προς ουδέτερη παραμορφώνεται άσχημα από την τριπλή πτώση της αρμονικής τάσης στον ουδέτερο αγωγό. Για το σύστημα με τέλεια ισορροπημένα μονοφασικά φορτία που απεικονίζονται στο Σχ. 1.11, γίνεται παραδοχή ότι υπάρχουν βασικά και τρίτα αρμονικά μέρη. Αθροίζοντας τα ρεύματα στον κόμβο N, τα βασικά συστατικά ρεύματος στο ουδέτερο βρέθηκαν να είναι μηδέν, αλλά τα τρίτα αρμονικά μέρη είναι 3 φορές εκείνα των ρευμάτων φάσης επειδή φυσικά συμπίπτουν σε φάση και χρόνο. Οι συνδέσεις περιέλιξης μετασχηματιστή έχουν σημαντική επίδραση στη ροή τριπλών αρμονικών ρευμάτων από μονογραμμικά μη γραμμικά φορτία. Δύο περιπτώσεις φαίνονται στο Σχ. 1.12. Στον μετασχηματιστή “wye-delta” , τα τριπλή αρμονικά ρεύματα φαίνονται να εισέρχονται στην πλευρά του “wye”. Δεδομένου ότι βρίσκονται σε φάση, προσθέτουν στο ουδέτερο. Η περιέλιξη του δέλτα παρέχει ισορροπία στροφής ώστε να μπορούν να ρέουν, αλλά παραμένουν παγιδευμένα στο δέλτα και δεν εμφανίζονται στα ρεύματα γραμμής στην πλευρά του δέλτα. Όταν τα ρεύματα είναι ισορροπημένα, τα τριπλά αρμονικά ρεύματα συμπεριφέρονται ακριβώς όπως τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, που είναι ακριβώς αυτό που είναι. Αυτός ο τύπος σύνδεσης μετασχηματιστή είναι ο πιο συνηθισμένος που χρησιμοποιείται σε υποσταθμούς διανομής χρησιμότητας με την περιέλιξη δέλτα συνδεδεμένη με την τροφοδοσία μετάδοσης. Η χρήση περιελίξεων γείωσης(wye) και στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή επιτρέπει τη ροή ισορροπημένων τριπλών από το σύστημα χαμηλής τάσης στο σύστημα υψηλής τάσης χωρίς εμπόδια. Θα είναι ίσες και στις δύο πλευρές. Ορισμένες σημαντικές επιπτώσεις αυτού σχετίζονται με την ανάλυση ποιότητας ισχύος είναι:

- Οι μετασχηματιστές, ιδίως οι ουδέτερες συνδέσεις, είναι επιρρεπείς σε υπερθέρμανση όταν εξυπηρετούν μονοφασικά φορτία στην πλευρά των ματιών που έχουν υψηλό περιεχόμενο τρίτης-αρμονικής.
- Η μέτρηση του ρεύματος στην πλευρά δέλτα ενός μετασχηματιστή δεν θα δείξει τα τριπλάσια και, ως εκ τούτου, δεν θα δώσει μια πραγματική ιδέα της θέρμανσης που υποβάλλει ο μετασχηματιστής.
- Η ροή των τριπλών αρμονικών ρευμάτων μπορεί να διακοπεί από την κατάλληλη σύνδεση μετασχηματιστή απομόνωσης.



Σχήμα 1.11: Ρεύμα ουδετέρου με μηδενική θεμελιώδη, αλλά τριπλάσια τρίτη αρμονική συνιστώσα



Σχήμα 1.12: Ροή ρεύματος τρίτης αρμονικής σε συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

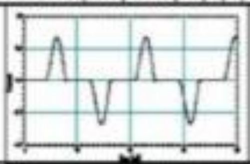
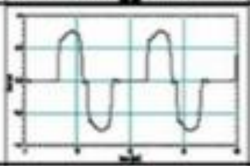
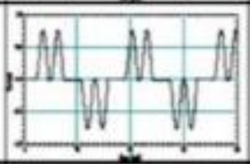
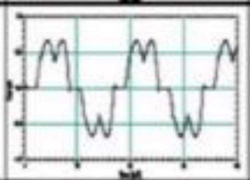
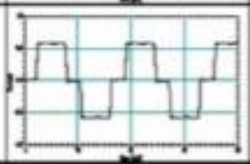
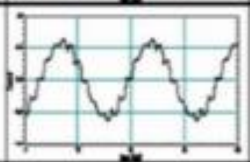
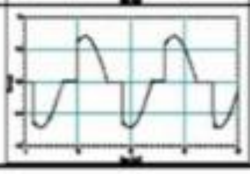
Πηγές Αρμονικών

Οι αρμονικές προκαλούνται από μη γραμμικά φορτία που συνδέονται με το σύστημα ισχύος. Τα μη γραμμικά φορτία αντλούν μη ημιτονοειδές ρεύμα. Οι αντιστάσεις, οι επαγωγείς και οι πυκνωτές είναι γραμμικές συσκευές. Όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο αντίστασης σε ένα σύστημα ισχύος AC, αντλεί ημιτονοειδές ρεύμα. Όταν εφαρμόζεται επαγωγικό ή χωρητικό φορτίο, τραβάει επίσης ημιτονοειδές ρεύμα αν και μετατοπίζεται φάση σε σύγκριση με το φορτίο αντίστασης. Υπάρχουν πολλοί τύποι μη γραμμικών φορτίων που προκαλούν αρμονικές. Οι μεγαλύτερες πηγές αρμονικών είναι μετατροπείς. Οι μετατροπείς κυμαίνονται από έναν τεράστιο σταθμό μετατροπέα 1000 MW για μια γραμμή HVDC έως έναν ανορθωτή 75 W που βρίσκεται σε μια τηλεόραση. Άλλες μη γραμμικές πηγές αρμονικών περιλαμβάνουν συσκευές τόξου όπως καμίνους τόξου, αντίσταση μαγνητισμού μετασχηματιστή, φώτα φθορισμού και υψηλής έντασης. Το αρμονικό ρεύμα που προκαλείται από τις μη γραμμικές πηγές μπορεί να προκαλέσει αρμονική παραμόρφωση στην τάση του συστήματος που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε άλλες συσκευές. Το σχήμα 1.13 παρουσιάζεται η κυματομορφή και η ενδεικτική αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.

Μερικές από τις πηγές των αρμονικών που εμφανίζονται στα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές: Οι αρμονικές οφείλονται στις οδοντώσεις του πυρήνα και στις ατέλειες των μαγνητικών κυκλωμάτων τους.
- Ρεύματα μαγνήτισης των Μ/Σ: Οι αρμονικές οφείλονται στο μαγνητικό κορεσμό των πυρήνων και στη μαγνητική υστέρηση.
- Σιδηροσυντονισμός: Οι αρμονικές οφείλονται σε ισχυρό μη γραμμικό φαινόμενο προκαλούμενο από την αλληλεπίδραση μη γραμμικής επαγωγικής αντίδρασης (για παράδειγμα ένας μετασχηματιστής) με τη χωρητικότητα του συστήματος. Συχνά υπερισχύουν οι συχνότητες του 1/3 ή 1/5 της βασικής και εμφανίζεται σαν υποαρμονικό φαινόμενο με υπερτάσεις, μεγάλα ρεύματα, παραμόρφωση κυματομορφών κλπ.
- Μη γραμμικότητα δικτύου: Προκύπτουν από φορτία όπως ανορθωτές, μετατροπείς, κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου, μηχανήματα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου, λαμπτήρες αερίου, ελεγκτές τάσης, μετατροπείς συχνότητας κ.ά.
- Τριφασικά φορτία : εισάγουν κυρίως αρμονικές περιττής τάξεως (5η, 7η, 11η, 13η, 17η αρμονική).
- Συσκευές που συνδυάζουν ημιαγωγούς και συστήματα διακοπής (για εξοικονόμηση ενέργειας).
- Συσκευές ελέγχου των κινητήρων σε εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας έλξης (π.χ. ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι).
- Συσκευές μετατροπής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος με συνεχές ρεύμα. υψηλής τάσεως.
- Ηλιακά και αιολικά συστήματα μικρής ισχύος με τους αντίστοιχους μετατροπείς ισχύος από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα για τη σύνδεση των πηγών με τα συστήματα διανομής.
- Συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Η χρήση συστοιχιών πυκνωτών προκαλεί παραγωγή αρμονικών λόγω συντονισμού, όπως επίσης και η χρήση πηνίων αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση χωρητικών φορτίσεων (π.χ. μεγάλων γραμμών μεταφοράς). Άλλος λόγος δημιουργίας αρμονικών στα ανωτέρω συστήματα είναι τα θυρίστορ, που περιλαμβάνονται στις νέες μεθόδους διόρθωσης του συντελεστή ισχύος.
- Συσκευές φόρτισης συσσωρευτών. Απαιτούν χρήση ανορθωτών και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα σε ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με συσσωρευτές.

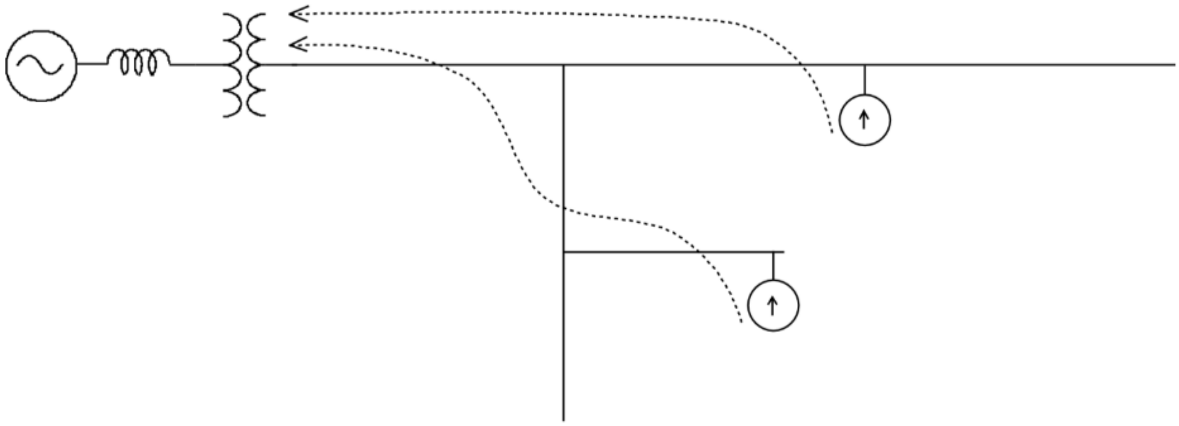
- Συσκευές άμεσης μετατροπής ενέργειας που απαιτούν μετατροπείς από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα.
- Κυκλομετατροπείς (cycloconverters) που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων και μεγάλων ροπών, κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.
- Στοιχεία θέρμανσης PBM (Pulse Burst-Modulated), που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους κλιβάνους.

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

Σχήμα 1.13: Κυματομορφή και ενδεικτική αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.

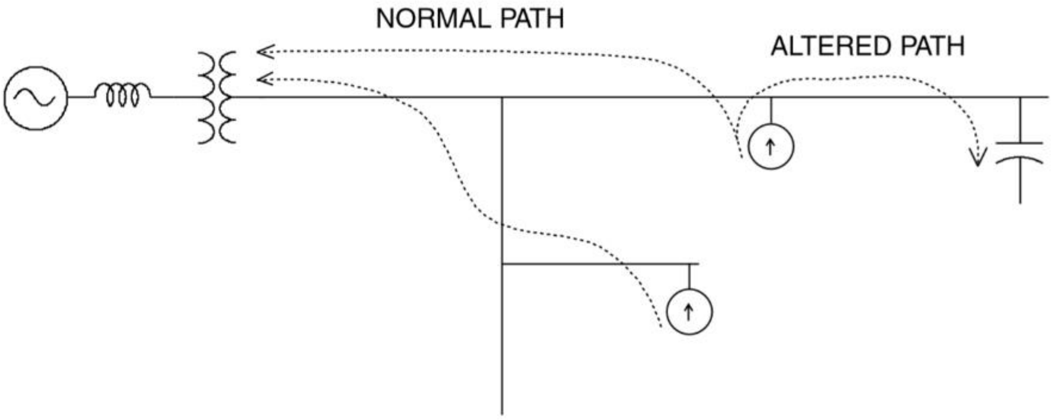
Εντοπισμός Αρμονικών

Σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βιομηχανικής εγκατάστασης, η κύρια τάση είναι τα αρμονικά ρεύματα να ρέουν από το αρμονικό φορτίο στην πηγή του συστήματος ισχύος. Αυτό απεικονίζεται στο Σχ. 1.14. Η σύνθετη αντίσταση του συστήματος ισχύος είναι συνήθως η χαμηλότερη αντίσταση που φαίνεται από τα αρμονικά ρεύματα. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος ρέει στην πηγή. Αυτή η γενική τάση αρμονικών ροών ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό πηγών αρμονικών. Χρησιμοποιώντας ένα όργανο ελέγχου ποιότητας ισχύος ικανό να αναφέρει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος, μετρώντας απλώς τα αρμονικά ρεύματα σε κάθε κλάδο ξεκινώντας από την αρχή του κυκλώματος και εντοπίζοντας τις αρμονικές στην πηγή.



Σχήμα 1.14:Γενική ροή αρμονικών ρευμάτων σε σύστημα ισχύος.

Οι πυκνωτές διόρθωσης συντελεστή ισχύος μπορούν να αλλάξουν αυτό το μοτίβο ροής για τουλάχιστον μία από τις αρμονικές. Για παράδειγμα, η προσθήκη ενός πυκνωτή στο προηγούμενο κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 1.15 μπορεί να τραβήξει μια μεγάλη ποσότητα αρμονικού ρεύματος σε αυτό το τμήμα του κυκλώματος. Σε μια τέτοια κατάσταση, ακολουθώντας το μονοπάτι του αρμονικού ρεύματος θα οδηγήσει σε ένα σύστημα πυκνωτών αντί για την πραγματική αρμονική πηγή. Επομένως, είναι γενικά απαραίτητο να αποσυνδεθούν προσωρινά όλοι οι πυκνωτές για να εντοπισθούν αξιόπιστα οι πηγές αρμονικών. Συνήθως είναι εύκολο να διαφοροποιήσουμε τα αρμονικά ρεύματα λόγω των πραγματικών πηγών από τα αρμονικά ρεύματα που οφείλονται αυστηρά στον συντονισμό που περιλαμβάνει το σύστημα πυκνωτών. Ένα ρεύμα συντονισμού έχει συνήθως μόνο μία κυρίαρχη αρμονική ακολουθεία πάνω από το θεμελιώδες ημιτονοειδές κύμα. Σημειώστε ότι καμία από τις αρμονικές πηγές που παρουσιάστηκαν νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο δεν παράγει μία μόνο αρμονική συχνότητα εκτός από τη θεμελιώδη. Όλοι παράγουν περισσότερες από μία αρμονικές συχνότητες. Οι κυματομορφές αυτών των αρμονικών πηγών έχουν κάπως αυθαίρετα κυματομορφή ανάλογα με τα παραμορφωτικά φαινόμενα, αλλά περιέχουν αρκετές αρμονικές σε σημαντικές ποσότητες. Ένα μόνο, μεγάλο, σημαντικό αρμονικό σημαίνει σχεδόν πάντα συντονισμό. Αυτό το γεγονός μπορεί να αξιοποιηθεί για να προσδιοριστεί εάν είναι πιθανό να υπάρχουν προβλήματα αρμονικών συντονισμού σε ένα σύστημα με πυκνωτές. Απλά μετρήστε το ρεύμα στους πυκνωτές. Εάν περιέχει μια πολύ μεγάλη ποσότητα ενός αρμονικού διαφορετικού από το θεμελιώδες, είναι πιθανό ο πυκνωτής να συμμετέχει σε ένα συντονιστικό κύκλωμα εντός του συστήματος ισχύος. Ελέγχετε πάντα τα ρεύματα του πυκνωτή πρώτα σε όλες τις εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν υποψίες αρμονικών προβλημάτων.



Σχήμα 1.15:Οι πυκνωτές συντελεστή ισχύος μπορούν να αλλάξουν την κατεύθυνση της ροής ενός από τα αρμονικά μέρη του ρεύματος.

Μετρήσεις Αρμονικών

Βασικός εξοπλισμός για τις μετρήσεις αρμονικών είναι :

- Παλμογράφος: Απεικονίζει την κυματομορφή στο χρόνο
- Αναλυτής Φάσματος: Αποτυπώνει την κατανομή ισχύος ενός σήματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα
- Αναλυτές Αρμονικών: Μετρά το πλάτος και την φασική γωνία μιας περιοδικής συνάρτησης παρέχοντας το φάσμα συχνοτήτων της.
- Αναλυτές Διαταραχής: Δείχνει απευθείας την Ολική Παραμόρφωση
- Ψηφιακά Όργανα Μέτρησης Αρμονικών: Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων οργάνων. Ο ένας είναι με ψηφιακό φίλτρο και ο άλλος με FFT(fast fourier transform).

Επιπτώσεις Αρμονικών

Σε συνθήκες χωρίς αρμονικές, ο ουδέτερος μεταφέρει πολύ μικρά ρεύματα, και κατά συνέπεια έχει γίνει πλέον πρακτική να τοποθετούνται αγωγοί στον ουδέτερο που να μπορούν να μεταφέρουν ολόκληρο ή πιθανά το μισό από την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Με αυξημένα επίπεδα αρμονικών ελλοχεύει ο κίνδυνος υπερφόρτισης του ουδετέρου με δύο πιθανές επιπτώσεις:

- Υπερθέρμανση του αγωγού στον ουδέτερο με μείωση του χρόνου ζωής και ενδεχόμενο εκδήλωσης πυρκαγιάς.
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι εμφάνιση μεγάλων τάσεων στον ουδέτερο επηρεάζουν τον ψηφιακό εξοπλισμό και τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών αν δεν υφίσταται καλό σύστημα γείωσης.

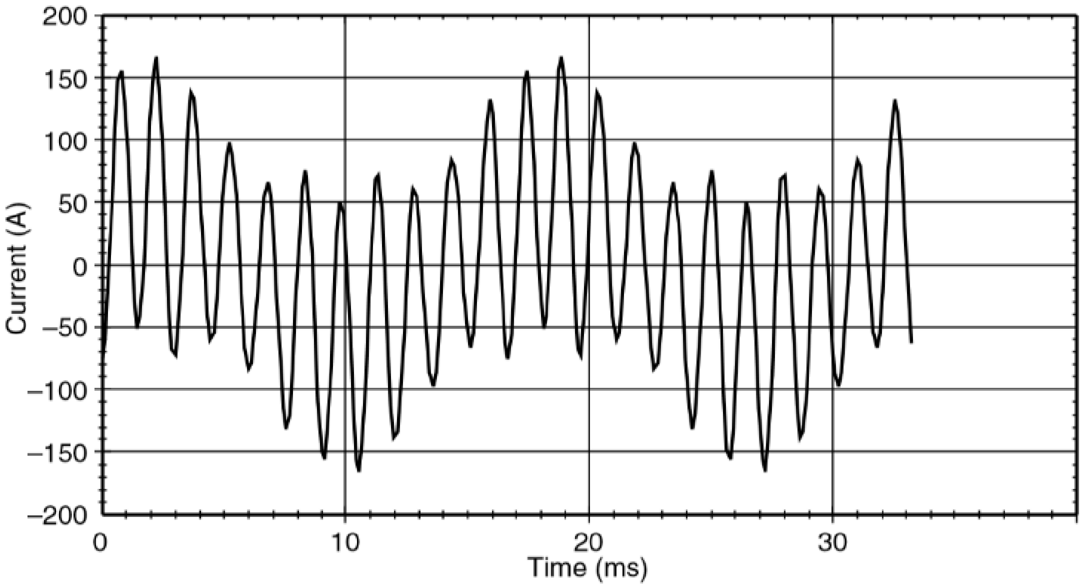
Τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από μη γραμμικά φορτία εισάγονται πίσω στα συστήματα τροφοδοσίας. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να αλληλεπιδράσουν δυσμενώς με ένα ευρύ φάσμα εξοπλισμού συστήματος ισχύος, κυρίως πυκνωτές, μετασχηματιστές και κινητήρες, προκαλώντας επιπλέον απώλειες, υπερθέρμανση και υπερφόρτωση. Αυτά τα αρμονικά ρεύματα μπορούν επίσης να προκαλέσουν παρεμβολές σε γραμμές τηλεπικοινωνιών και σφάλματα στη μέτρηση ισχύος.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα στο σύστημα, οι αρμονικές μπορούν να περνούν απαρατήρητες για αρκετά χρόνια εκτός αν τύχει να γίνει κάποια προκαθορισμένη μέτρηση στην θερμοκρασία της συσκευής ή στην κυματομορφή τάσης που τροφοδοτείται.

Επιπτώσεις στους πυκνωτές

Προβλήματα που αφορούν αρμονικές εμφανίζονται συχνά στους πυκνωτές. Οι πυκνωτές αντιμετωπίζουν παραμόρφωση υψηλής τάσης κατά τη διάρκεια του συντονισμού. Το ρεύμα που ρέει στους πυκνωτές είναι επίσης σημαντικά μεγάλο και πλούσιο σε μονοτονική αρμονική. Το Σχήμα 5.32 δείχνει μια τρέχουσα κυματομορφή στους πυκνωτές σε συντονισμό με το σύστημα στην 11η αρμονική. Το αρμονικό ρεύμα εμφανίζεται ξεκάθαρα, με αποτέλεσμα μια κυματομορφή που είναι ουσιαστικά η 11η αρμονική οδήγηση πάνω από τη θεμελιώδη συχνότητα. Αυτή η τρέχουσα κυματομορφή συνήθως υποδεικνύει ότι το σύστημα είναι συντονισμένο και εμπλέκεται μια τράπεζα πυκνωτών.
Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των πυκνωτών καθορίζονται από τα πρότυπα της IEEE. Υπάρχουν κάποια όρια λειτουργίας τα οποία δεν πρέπει να ξεπερνιούνται και αφορούν την παραγόμενη άεργη ισχύ, την εφαρμοζόμενη τάση και την ενεργό τιμή του ρεύματος που τους διαρρέει. Η μέγιστη τιμή της άεργου ισχύος των πυκνωτών καθορίζεται στο 135% της ονομαστικής. Το όριο αυτό θα πρέπει να ικανοποιεί :

- Την ονομαστική άεργο που παράγεται από την θεμελιώδη αρμονική.
- Την πρόσθετη άεργο που παράγεται από τις αρμονικές της τάσης.
- Την πρόσθετη άεργο που παράγεται από ενδεχόμενη αύξηση του μέτρου της τάσης της βασικής αρμονικής.
- Την πρόσθετη άεργο που παράγεται από την πρόσθετη χωρητικότητα λόγω κατασκευαστικής ανοχής πχ. +10% είναι μια συνηθισμένη τιμή.



Σχήμα 1.16: Τυπικό ρεύμα πυκνωτή από ένα σύστημα στο 11ο-αρμονικό συντονισμό

Επιπτώσεις στους μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ στα συνδεδεμένα φορτία με ελάχιστες απώλειες σε θεμελιώδη συχνότητα. Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος, ιδίως, καθώς και της τάσης θα συμβάλει σημαντικά στην επιπρόσθετη θέρμανση. Για να σχεδιάσουν έναν μετασχηματιστή για να δεχθεί υψηλότερες συχνότητες, οι σχεδιαστές κάνουν διαφορετικές επιλογές σχεδίασης όπως η χρήση καλωδίου συνεχούς μεταφοράς αντί για συμπαγή αγωγό και η τοποθέτηση περισσότερων αγωγών ψύξης. Κατά γενικό κανόνα, ένας μετασχηματιστής στον οποίο η τρέχουσα παραμόρφωση υπερβαίνει το 5% είναι υποψήφιος για υποβάθμιση αρμονικών. Υπάρχουν τρία εφέ που οδηγούν σε αυξημένη θέρμανση μετασχηματιστή όταν το ρεύμα φορτίου περιλαμβάνει αρμονικά εξαρτήματα:

- Ενεργό ρεύμα (RMS). Εάν ο μετασχηματιστής έχει μέγεθος μόνο για τις απαιτήσεις kilovolt(KV) του φορτίου, τα αρμονικά ρεύματα μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα το ρεύμα του μετασχηματιστή να είναι υψηλότερο από τη χωρητικότητά του. Το αυξημένο συνολικό τρέχον ενεργό ρεύμα(rms) οδηγεί σε αυξημένες απώλειες αγωγού.
- Τρέχουσες απώλειες δινορεύματος. Αυτά είναι επαγόμενα ρεύματα σε έναν μετασχηματιστή που προκαλείται από τις μαγνητικές ροές. Αυτά τα επαγόμενα ρεύματα ρέουν στις περιελίξεις, στον πυρήνα και σε άλλα αγώγιμα σώματα που υπόκεινται στο μαγνητικό πεδίο του μετασχηματιστή και προκαλούν επιπλέον θέρμανση. Αυτό το στοιχείο των απωλειών του μετασχηματιστή αυξάνεται με το τετράγωνο της συχνότητας του ρεύματος προκαλώντας τα ρεύματα. Επομένως, αυτό γίνεται ένα πολύ σημαντικό συστατικό των απωλειών μετασχηματιστή για αρμονική θέρμανση.
- Απώλειες πυρήνα Η αύξηση των απωλειών πυρήνα παρουσία αρμονικών εξαρτάται από την επίδραση των αρμονικών στην εφαρμοζόμενη τάση και τον

σχεδιασμό του πυρήνα του μετασχηματιστή. Αύξηση της παραμόρφωσης τάσης μπορεί να αυξήσει τα ρεύματα της ροής στα πυρήνα των ελασμάτων. Η καθαρή επίδραση που θα έχει αυτό εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων πυρήνα και την ποιότητα του πυρήνα χάλυβα. Η αύξηση αυτών των απωλειών λόγω αρμονικών δεν είναι γενικά τόσο κρίσιμη όσο και οι δύο προηγούμενες.

Υπάρχουν συχνά περιπτώσεις με μετασχηματιστές που δεν φαίνεται να έχουν πρόβλημα αρμονικών, αλλά λειτουργούν ζεστά ή αποτυγχάνουν λόγω αυτού που φαίνεται να είναι υπερφόρτωση. Μία κοινή περίπτωση που βρέθηκε με μετασχηματιστές γείωσης είναι ότι τα ρεύματα γραμμής περιέχουν περίπου 8% τρίτης αρμονικής, το οποίο είναι σχετικά χαμηλό, και ο μετασχηματιστής υπερθερμαίνεται σε λιγότερο από το ονομαστικό φορτίο. Εκτός από τα προβλήματα μηχανικής ψύξης, είναι πιθανό να υπάρχει κάποιο αγώγιμο στοιχείο στο μαγνητικό πεδίο που επηρεάζεται από τις αρμονικές ροές. Τρεις από τις διάφορες δυνατότητες είναι οι εξής:

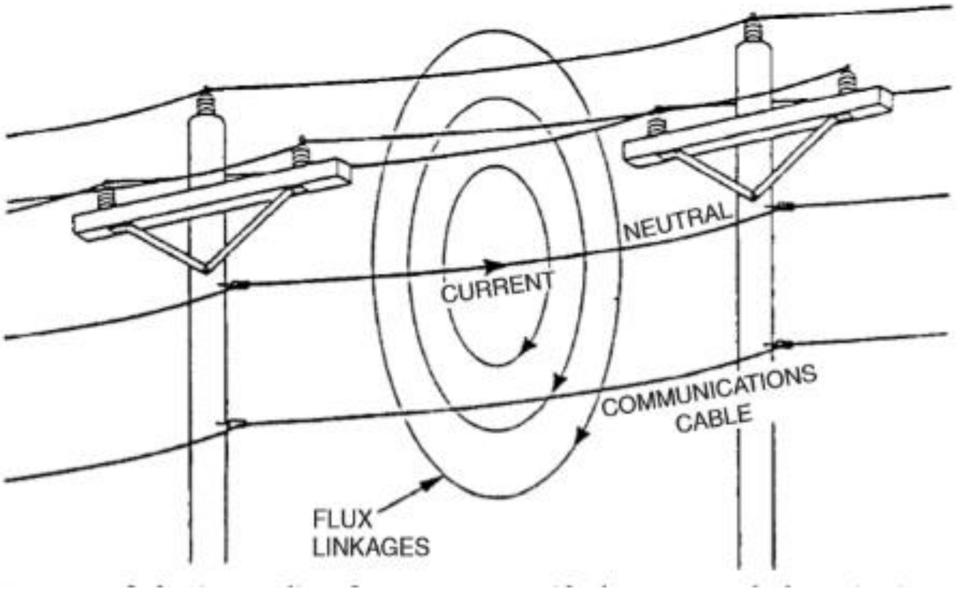
- Οι ροές μηδενικής ακολουθίας θα «ξεφύγουν» από τον πυρήνα σε σχέδια με τρία πόδια (ο πιο δημοφιλής σχεδιασμός για μετασχηματιστές υποσταθμών διανομής χρησιμότητας). Οι αρμονικές 3ης, 9ης, 15ης κ.λπ. είναι κυρίως μηδενική ακολουθία. Επομένως, εάν οι συνδέσεις περιέλιξης είναι κατάλληλες για να επιτρέψουν τη ροή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας, αυτές οι αρμονικές ροές μπορούν να προκαλέσουν επιπλέον θέρμανση στις δεξαμενές, τους σφιγκτήρες πυρήνα κ.λπ. Το ρεύμα γραμμής 8% που αναφέρθηκε προηγουμένως μεταφράζεται σε ουδέτερο τρίτο αρμονικό ρεύμα 24% του ρεύματος φάσης. Αυτό θα μπορούσε να προσθέσει σημαντικά τη ροή διαρροών στη δεξαμενή και στο χώρο λαδιού και αέρα.
- Οι αντισταθμίσεις DC στο ρεύμα μπορούν επίσης να προκαλέσουν τη διαφυγή της ροής στα όρια του πυρήνα. Ο πυρήνας θα γίνει ελαφρώς κορεσμένος, για παράδειγμα, στον θετικό μισό κύκλο ενώ παραμένει φυσιολογικός για τον αρνητικό μισό κύκλο. Υπάρχει ένας αριθμός ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που παράγουν τρέχουσες κυματομορφές που δεν είναι συμμετρικές είτε τυχαία είτε από σχεδιασμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια μικρή μετατόπιση DC στην πλευρά φόρτωσης του μετασχηματιστή (δεν μπορεί να μετρηθεί από την πλευρά της πηγής). Απαιτείται μόνο μια μικρή ποσότητα μετατόπισης DC για να προκαλέσει προβλήματα στους περισσότερους μετασχηματιστές ισχύος.
- Μπορεί να υπάρχει δομή σύσφιξης, άκρο δακτυλίου ή κάποιο άλλο αγώγιμο στοιχείο πολύ κοντά στο μαγνητικό πεδίο. Μπορεί να είναι αρκετά μικρού μεγέθους ώστε να μην υπάρχει αξιοσημείωτο αποτέλεσμα στις απώλειες αδέσποτου σε θεμελιώδη συχνότητα, αλλά μπορεί να παράγει θερμό σημείο όταν υποβάλλεται σε αρμονικές ροές.

Επιπτώσεις στους κινητήρες

Οι κινητήρες μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από την παραμόρφωση της αρμονικής τάσης. Η παραμόρφωση αρμονικής τάσης στους ακροδέκτες του κινητήρα μεταφράζεται σε αρμονικές ροές εντός του κινητήρα. Οι αρμονικές ροές δεν συμβάλλουν σημαντικά στη ροπή του κινητήρα, αλλά περιστρέφονται με συχνότητα διαφορετική από τη σύγχρονη συχνότητα του στροφείου, προκαλώντας βασικά ρεύματα υψηλής συχνότητας στο στροφείου. Η επίδραση στους κινητήρες είναι παρόμοια με εκείνη των ρευμάτων αρνητικής αλληλουχίας σε θεμελιώδη συχνότητα: Οι πρόσθετες ροές κάνουν πολύ περισσότερα από ό, τι προκαλούν πρόσθετες απώλειες. Η μειωμένη απόδοση μαζί με τη θέρμανση, τους κραδασμούς και τους υψηλούς θορύβους είναι δείκτες παραμόρφωσης της αρμονικής τάσης. Στις αρμονικές συχνότητες, οι κινητήρες μπορούν συνήθως να αντιπροσωπεύονται από την αποκλεισμένη αντίσταση του στροφείου που είναι συνδεδεμένη κατά μήκος της γραμμής. Τα εξαρτήματα αρμονικής τάσης χαμηλότερης τάξης, για τα οποία τα μεγέθη είναι μεγαλύτερα και η φαινόμενη αντίσταση κινητήρα χαμηλότερα, είναι συνήθως τα πιο σημαντικά για τους κινητήρες. Συνήθως δεν υπάρχει ανάγκη εκτροπής κινητήρων εάν η παραμόρφωση τάσης παραμένει εντός των ορίων IEEE Standard 519-1992 5% THD και 3% για κάθε μεμονωμένο αρμονικό. Τα υπερβολικά προβλήματα θέρμανσης ξεκινούν όταν η παραμόρφωση τάσης φτάσει το 8 έως 10 τοις εκατό και υψηλότερη. Αυτή η παραμόρφωση πρέπει να διορθωθεί για μεγάλη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Οι κινητήρες φαίνεται να είναι παράλληλοι με την αντίσταση του συστήματος ισχύος σε σχέση με την αρμονική ροή ρεύματος και γενικά μετατοπίζουν τον συντονισμό του συστήματος υψηλότερα προκαλώντας τη μείωση της καθαρής επαγωγής. Το εάν αυτό είναι επιζήμιο για το σύστημα εξαρτάται από τη θέση του συντονισμού του συστήματος πριν από την ενεργοποίηση του κινητήρα. Οι κινητήρες μπορούν επίσης να συμβάλουν στην απόσβεση ορισμένων από τα αρμονικά εξαρτήματα ανάλογα με την αναλογία X / R του αποκλεισμένου κυκλώματος στροφείου. Σε συστήματα με πολλούς κινητήρες μικρότερου μεγέθους, οι οποίοι έχουν χαμηλό X / R αναλογία, αυτό θα μπορούσε να συμβάλει στην εξασθένιση του αρμονικού συντονισμού. Ωστόσο, δεν μπορεί κανείς να εξαρτάται από αυτό για μεγάλους κινητήρες.

Επιπτώσεις στις τηλεπικοινωνίες

Τα αρμονικά ρεύματα που ρέουν στο σύστημα διανομής χρησιμότητας ή σε μια εγκατάσταση τελικού χρήστη μπορούν να δημιουργήσουν παρεμβολές στα κυκλώματα επικοινωνίας που μοιράζονται μια κοινή διαδρομή. Οι τάσεις που προκαλούνται σε παράλληλους αγωγούς από τα κοινά αρμονικά ρεύματα συχνά εμπίπτουν στο εύρος ζώνης των κανονικών φωνητικών επικοινωνιών. Οι αρμονικές μεταξύ 540 ((9η αρμονική) και 1200 Hz είναι ιδιαίτερα διαταραχές. Η επαγόμενη τάση ανά αμπέρ του ρεύματος αυξάνεται με τη συχνότητα. Οι τριπλές αρμονικές (3η, 9η, 15η) είναι ιδιαίτερα ενοχλητικές σε συστήματα τεσσάρων συρμάτων, επειδή βρίσκονται σε φάση σε όλους τους αγωγούς ενός τριφασικού κυκλώματος και, ως εκ τούτου, προσθέτουν απευθείας στο ουδέτερο κύκλωμα, το οποίο έχει τη μεγαλύτερη έκθεση με τις επικοινωνίες κύκλωμα. Τα αρμονικά ρεύματα στο σύστημα τροφοδοσίας συνδέονται σε κυκλώματα επικοινωνίας είτε μέσω επαγωγής είτε απευθείας αγωγιμότητας. Το Σχήμα 5.34 απεικονίζει σύζευξη από το ουδέτερο μιας επαγωγής γραμμής εναέριας κατανομής b. Αυτό ήταν ένα σοβαρό πρόβλημα στις μέρες των ανοικτών καλωδίων τηλεφωνικών κυκλωμάτων. Τώρα, με την επικρατούσα χρήση θωρακισμένων αγωγών συστροφής για τηλεφωνικά κυκλώματα, αυτός ο τρόπος ζεύξης είναι λιγότερο σημαντικός. Η άμεση επαγωγική ζεύξη είναι ίση και στους δύο αγωγούς, με αποτέλεσμα μηδενική καθαρή τάση στον βρόχο που σχηματίζεται από τους αγωγούς. Η επαγωγική σύζευξη μπορεί να εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα εάν προκαλούνται υψηλά ρεύματα στην ασπίδα που περιβάλλει τους αγωγούς τηλεφώνου. Το ρεύμα που ρέει στην ασπίδα προκαλεί πτώση ισχύος το οποίο οδηγεί σε πιθανή διαφορά στις αναφορές γείωσης στα άκρα του τηλεφωνικού καλωδίου. Τα ρεύματα ασπίδας μπορούν επίσης να προκληθούν από άμεση αγωγιμότητα.



Σχήμα 1.17: Επαγωγική ζεύξη υπολειπόμενου ρεύματος συστήματος ισχύος με τηλεφωνικό κύκλωμα.

Αρμονικοί Δείκτες

Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι δείκτες για τη μέτρηση του αρμονικού περιεχομένου μιας κυματομορφής είναι η ολική αρμονική παραμόρφωση και η ολική ζητούμενη παραμόρφωση. Και τα δύο είναι μέτρα της πραγματικής τιμής μιας κυματομορφής και μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε τάση είτε σε ρεύμα.

Ολική αρμονική παραμόρφωση(Total Harmonic Distortion-THD)

Το THD είναι ένα μέτρο της πραγματικής τιμής των αρμονικών στοιχειων μιας παραμορφωμένης κυματομορφής. Δηλαδή, είναι η πιθανή τιμή θέρμανσης των αρμονικών σε σχέση με το θεμελιώδες. Αυτός ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί είτε για τάση είτε για ρεύμα:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \qquad (1.14)$$

όπου Mh είναι η τιμή rms του αρμονικού στοιχείου h της ποσότητας M.

Το THD σχετίζεται με την τιμή rms της κυματομορφής ως εξής:

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1\sqrt{1 + THD^2} \tag{1.15}$$

Το THD είναι μια πολύ χρήσιμη ποσότητα για πολλές εφαρμογές, αλλά οι περιορισμοί του πρέπει να τηρηθούν. Μπορεί να προσφέρει μια καλή ιδέα για το πόση επιπλέον θερμότητα θα επιτευχθεί όταν εφαρμόζεται παραμορφωμένη τάση σε ένα φορτίο αντίστασης. Ομοίως, μπορεί να δώσει μια ένδειξη για τις πρόσθετες απώλειες που προκαλούνται από το ρεύμα που ρέει μέσω ενός αγωγού. Ωστόσο, δεν είναι ένας καλός δείκτης της τάσης μέσα σε έναν πυκνωτή επειδή σχετίζεται με την τιμή κορυφής της κυματομορφής τάσης και όχι με την τιμή θέρμανσης.
Ο δείκτης THD χρησιμοποιείται συχνότερα για την περιγραφή αρμονικής παραμόρφωσης τάσης. Οι αρμονικές τάσεις αναφέρονται σχεδόν πάντα στη θεμελιώδη τιμή της κυματομορφής κατά τη στιγμή του δείγματος. Επειδή η θεμελιώδης τάση κυμαίνεται μόνο κατά λίγα τοις εκατό, η τάση THD είναι σχεδόν πάντα ένας σημαντικός αριθμός.

Ολική Ζητούμενη Παραμόρφωση(Total Demand Distortion-TDD)

Τα τρέχοντα επίπεδα παραμόρφωσης μπορούν να χαρακτηριστούν από μια τιμή THD, όπως έχει περιγραφεί, αλλά αυτό μπορεί συχνά να είναι παραπλανητικό. Ένα μικρό ρεύμα μπορεί να έχει υψηλό THD αλλά να μην αποτελεί σημαντική απειλή για το σύστημα. Για παράδειγμα, πολλές μονάδες ρυθμιζόμενης ταχύτητας θα εμφανίζουν υψηλές τιμές THD για το ρεύμα εισόδου όταν λειτουργούν σε πολύ ελαφριά φορτία. Αυτό δεν αποτελεί απαραίτητα σημαντική ανησυχία επειδή το μέγεθος του αρμονικού ρεύματος είναι χαμηλό, παρόλο που η σχετική παραμόρφωση του ρεύματος είναι υψηλή. Ορισμένοι αναλυτές προσπάθησαν να αποφύγουν αυτήν τη δυσκολία παραπέμποντας το THD στο θεμελιώδες του ρεύματος φόρτωσης αιχμής παρά στο θεμελιώδες του παρόντος δείγματος. Αυτό ονομάζεται ολική ζητούμενη παραμόρφωση

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \tag{1.16}$$

Το I_L είναι το μέγιστο, ή το μέγιστο, ρεύμα φορτίου ζήτησης στο βασικό στοιχείο συχνότητας που μετράται στο σημείο της κοινής ζεύξης.

Αντιμετώπιση Αρμονικών

Η πλειονότητα του ηλεκτρικού μη γραμμικού εξοπλισμού, ειδικά τριφασικών τύπων, συνήθως συνδέεται με μεγαλύτερες δυνάμεις που συχνά θα προκαλέσουν την ανάγκη προσθήκης εξοπλισμού μετριασμού προκειμένου να μετριάσει τα αρμονικά ρεύματα και τη σχετική παραμόρφωση τάσης εντός των απαραίτητων ορίων. Ανάλογα με τον τύπο του επιθυμητού διαλύματος, ο μετριασμός μπορεί να παρέχεται ως αναπόσπαστο μέρος του μη γραμμικός εξοπλισμός (π.χ. ένας αντιδραστήρας γραμμής AC για μονάδα AC PWM) ή ως ξεχωριστό στοιχείο μετριασμού εξοπλισμός (π.χ. ένα ενεργό φίλτρο συνδεδεμένο σε έναν πίνακα διανομής).Το φιλτράρισμα των ρευμάτων δικτύου και της τάσης είναι ένα βασικό πρόβλημα για τον διανομέα και για τον πελάτη. Επειδή τα όρια των αρμονικών εκπομπών δεν εφαρμόζονται εξίσου στο χαμηλό του στις διάφορες χώρες, οι παραγωγοί των διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών προσπαθούν να κατασκευάσουν συσκευές που πληρούν τις προϋποθέσεις και τα όρια των διεθνών προτύπων. Οι ηλεκτρικές εταιρείες, από την πλευρά της, χρησιμοποιούν διαφορετικούς εξοπλισμούς φιλτραρίσματος και ενθαρρύνουν τις έρευνες προς την εξεύρεση νέων αποδοτικών λύσεων για προβλήματα ποιότητας ισχύος. Οι πελάτες εγκαθιστούν επίσης μερικές φορές άεργη ισχύς και αρμονικές μπαταρίες αντιστάθμισης για τη βελτίωση της συντελεστή ισχύος και μείωση του λογαριασμού κατανάλωσης ενέργειας. Υπάρχουν πολλές παραδοσιακές και σύγχρονες λύσεις για την αντιμετώπιση των αρμονικών και την ποιότητα ισχύος. Μερικές από αυτές τις λύσεις διερευνούνται στο φορτίο προς ελαχιστοποιήστε την αρμονική εκπομπή ενώ οι άλλοι προτείνουν τη χρήση εξωτερικού φιλτραρίσματος εξοπλισμοί που εμποδίζουν την εξάπλωση αρμονικών στο δίκτυο.

Οι παραδοσιακές λύσεις για την ελαχιστοποίηση της αρμονικής παραμόρφωσης περιλάμβαναν συχνά ένα από τα ακόλουθα
μέθοδοι:

• Υπερδιαστασιολόγηση ή υποεκτίμηση της εγκατάστασης
• Ειδικά συνδεδεμένοι μετασχηματιστές
• Επαγωγικές αντιδράσεις σειράς
• Συντονισμένο παθητικό φίλτρο

Ωστόσο, οι παραπάνω λύσεις παρουσίασαν μειονεκτήματα που σχετίζονται με την εμφάνιση μεγαλύτερης χρησιμότητας κόστος λόγω του συνεχιζόμενου κακού παράγοντα ισχύος. Σήμερα, οι πιο κοινές μορφές αρμονικής ο αντιμετώπισης περιλαμβάνει είτε:

• Παθητικό αρμονικό φίλτρο
• Ενεργό αρμονικό φίλτρο
• Υβριδικό αρμονικό φίλτρο

Παθητικό αρμονικό φιλτράρισμα

Τα παθητικά φίλτρα είναι κυκλώματα συντονισμού πυκνωτή και αντιδραστήρα «συντονισμένα» για να παρουσιάσουν υψηλή διαδρομή αντίστασης προς τη θεμελιώδη συχνότητα και διαδρομή χαμηλής αντίστασης προς υψηλότερές
συγκεκριμένες συχνότητες (δηλαδή 5th - 250Hz, 7th - 350Hz). Συνήθως συνδέονται με μεμονωμένα φορτία στο εργοστάσιο και όχι στο σημείο της κοινής σύζευξης (PCC) δεδομένου ότι η εφαρμογή απαιτεί συνεπή φόρτωση για αποτελεσματικό αρμονικό μετριασμό.

Ενεργό αρμονικό φιλτράρισμα

Το ενεργό αρμονικό φιλτράρισμα (AHF) είναι η διαδικασία με την οποία παράγεται το αρμονικό ρεύμα από φορτίο που παρακολουθείται συνεχώς και δημιουργείται μια προσαρμοστική κυματομορφή η οποία αντιστοιχεί στο ακριβές σχήμα του μη γραμμικού τμήματος του ρεύματος φορτίου. Το AHF εισάγει αυτό το προσαρμοστικό ρεύμα στο φορτίο στο σημείο σύνδεσης και στην απόκριση. Σε αντίθεση με τα παθητικά αρμονικά φίλτρα, αυτά τα φίλτρα μπορούν να παρέχουν αρμονική άμβλυνση υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φορτίου έως την ονομαστική χωρητικότητά τους.

Υβριδικό αρμονικό φιλτράρισμα

Το υβριδικό αρμονικό φιλτράρισμα είναι ο συνδυασμός παθητικού και ενεργού αρμονικού φιλτραρίσματος. Το υβριδικό αρμονικό φιλτράρισμα συνδυάζει τις δύο λύσεις σε καταστάσεις όπου η παθητική χρήση αρμονικών φίλτρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα για στατικά φορτία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης και μικρότερο ενεργό φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό των αρμονικών που δημιουργούνται από τα άλλα μεταβλητά φορτία. Αυτή η λύση μπορεί να είναι αποτελεσματική τόσο ως προς το κόστος όσο και για την εφαρμογή.

1.13. Δια-αρμονικές(Interharmonics)

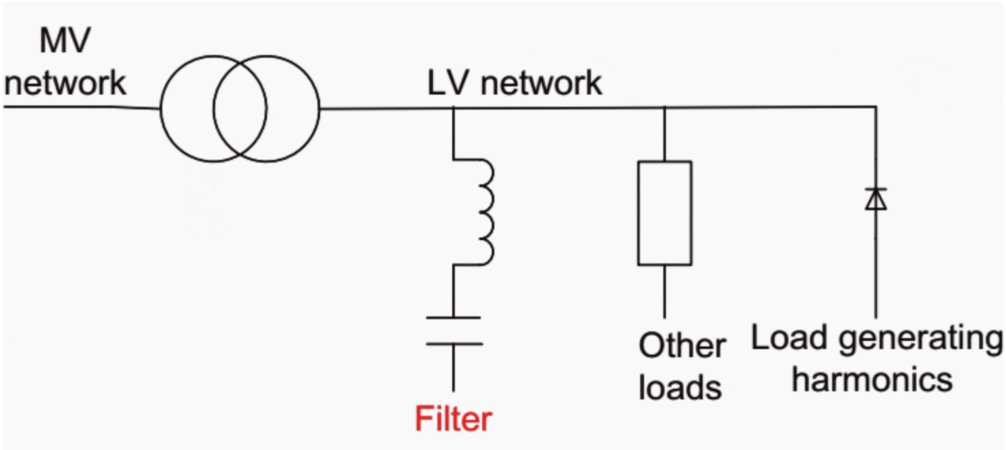
Σύμφωνα με τη θεωρία Fourier, μπορεί να εκφραστεί μια περιοδική κυματομορφή ως άθροισμα καθαρών ημιτονοειδών κυμάτων διαφορετικών πλάτους όπου η συχνότητα κάθε ημιτονοειδούς είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας της περιοδικής κυματομορφής. Μια συχνότητα που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας ονομάζεται αρμονική συχνότητα.
Από την άλλη πλευρά, το άθροισμα δύο ή περισσότερων καθαρών ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικά πλάτη όπου η συχνότητα κάθε ημιτονοειδούς δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας δεν έχει κατ' ανάγκη αποτέλεσμα σε μια περιοδική κυματομορφή. Αυτό το μη ακέραιο πολλαπλάσιο του θεμελιώδους η συχνότητα είναι συνήθως γνωστή ως μια δια-αρμονική συχνότητα. Έτσι, σε πρακτικούς όρους, οι διαρμονικές συχνότητες είναι συχνότητες μεταξύ δύο γειτονικές αρμονικές συχνότητες. Μία πρωταρχική πηγή διααρμονικών είναι η ευρεία χρήση φορτίων μετατροπέα ηλεκτρονικής ισχύος ικανών να παράγουν τρέχουσα παραμόρφωση πάνω από ένα ολόκληρο εύρος συχνοτήτων, δηλαδή, χαρακτηριστικές και μη χαρακτηριστικές συχνότητες. Παραδείγματα αυτών των φορτίων είναι οι ρυθμιζόμενες ταχύτητες σε βιομηχανικές εφαρμογές και μετατροπείς PWM σε εφαρμογές UPS, ενεργά φίλτρα και προσαρμοσμένος εξοπλισμός κλιματισμού
Μια άλλη σημαντική πηγή διααρμονικής παραμόρφωσης συνήθως προέρχεται από ταχέως μεταβαλλόμενο ρεύμα φορτίου όπως σε επαγωγικούς κλιβάνους και κυκλομετατροπείς. Η ταχεία διακύμανση του ρεύματος φορτίου αναγκάζει τις συχνότητες πλευρικής ζώνης να εμφανίζονται γύρω από τις θεμελιώδεις ή αρμονικές συχνότητες. Η δημιουργία της διααρμονικής απεικονίζεται καλύτερα χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα επαγωγικού κλιβάνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

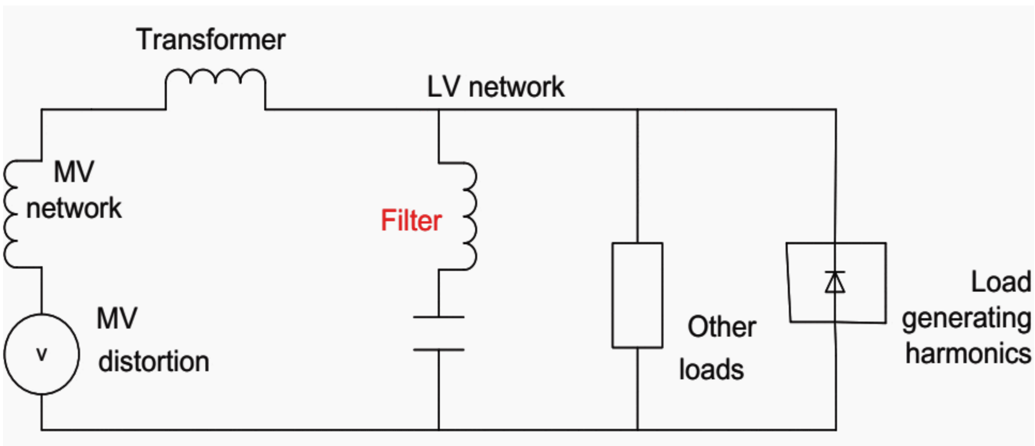
2.1. Ορισμός

Ένα παθητικό φίλτρο αποτελείται από ένα κύκλωμα σε σειρά από Επαγωγικές αντιδράσεις και πυκνωτές. Τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται, για παράδειγμα, από έναν μετατροπέα συχνότητας αποφεύγονται από αυτό το κύκλωμα σχεδιασμένο να έχει χαμηλή αντίσταση σε μια δεδομένη συχνότητα σε σύγκριση με το υπόλοιπο δίκτυο.
Η περιγραφόμενη λειτουργία με μια γεννήτρια αρμονικών, η σύνθετη αντίσταση που αντιπροσωπεύει όλα τα άλλα φορτία, ένα φίλτρο και το δίκτυο μέσης τάσης απεικονίζονται σχηματικά στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Παθητικό φιλτράρισμα αρμονικών

Το ισοδύναμο κύκλωμα που παρατηρείται με τη γεννήτρια αρμονικών που έχει διαμορφωθεί ως γεννήτρια αρμονικού ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 2.2. Περιλαμβάνει το δίκτυο μέσης τάσης (MV) και η παραμόρφωση της τάσης αντιπροσωπεύεται από μια αρμονική γεννήτρια τάσης.

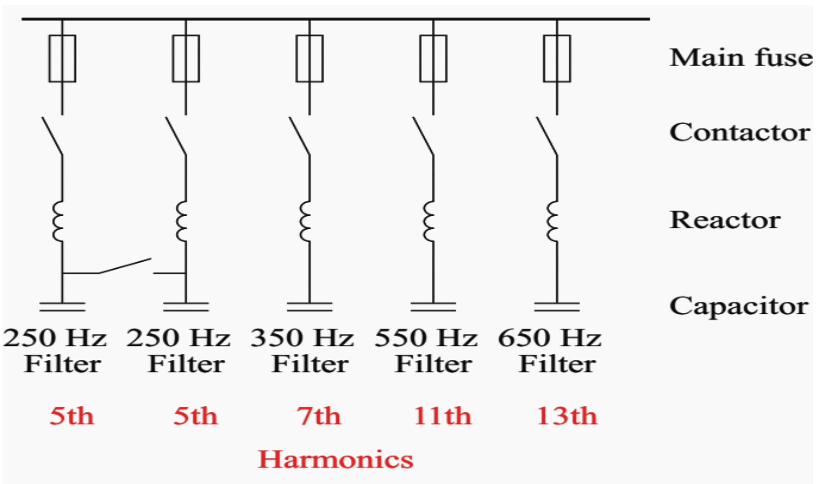


Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα για παθητικό φιλτράρισμα αρμονικών

Καθώς τα παθητικά φίλτρα προσφέρουν πολύ χαμηλή αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού, το αντίστοιχο αρμονικό ρεύμα θα ρέει στο κύκλωμα ανεξάρτητα από το μέγεθος του.

Τα παθητικά φίλτρα μπορούν να υπερφορτωθούν υπό ποια κατάσταση θα σβήσουν ή θα καταστραφούν. Η υπερφόρτιση μπορεί να προκληθεί από την παρουσία απρόβλεπτων αρμονικών στο σύστημα τροφοδοσίας ή από δομικές μετατροπές στο ίδιο εργοστάσιο (όπως η εγκατάσταση νέας μονάδας).
Ο βαθμός φιλτραρίσματος που παρέχεται από το παθητικό φίλτρο δίνεται από την αντίσταση του σε σχέση με όλες τις άλλες αντιστάσεις στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, το επίπεδο φιλτραρίσματος ενός παθητικού φίλτρου δεν μπορεί να ελεγχθεί και η συχνότητα συντονισμού του μπορεί να αλλάξει χρονικά λόγω της γήρανσης των εξαρτημάτων ή των τροποποιήσεων του δικτύου. Η ποιότητα του φιλτραρίσματος τότε θα επιδεινωθεί.
Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα παθητικό κύκλωμα φίλτρου μπορεί να φιλτράρει μόνο ένα αρμονικό στοιχείο. Ένα ξεχωριστό κύκλωμα φίλτρου απαιτείται για κάθε αρμονικό που πρέπει να φιλτραριστεί.

Το σχήμα 2.3 δείχνει την απλοποιημένη βασική αρχή ενός παθητικού φίλτρου και τις λειτουργίες του. Η πρόοδος της σύνθετης αντίστασης του φίλτρου δείχνει τη ρύθμιση σε μια συγκεκριμένη αρμονική συχνότητα και τις περιοχές στις οποίες μπορεί ενδεχομένως να εμφανιστεί ενίσχυση συντονισμού.



Σχήμα 2.3: Αρχή παθητικού φίλτρου

Ένα παθητικό φίλτρο μπορεί να αποτελείται από διάφορα βήματα που συντονίζονται σε διαφορετικές συχνότητες. Μπορεί επίσης να αποτελείται από διάφορα βήματα για μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η συχνότητα συντονισμού, η χωρητικότητα και η αντίσταση δικτύου καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του φίλτρου.
Απαιτείται ένα βήμα για κάθε αρμονική μέχρι την επιθυμητή συχνότητα.
Με τα παθητικά φίλτρα, οι συχνότητες συντονισμού των βημάτων του φίλτρου δεν συντονίζονται με ακρίβεια στα αρμονικά ρεύματα που φιλτράρονται, έτσι ώστε να αποφεύγονται εξαιρετικά υψηλά ρεύματα φίλτρου.
Επιπλέον, το παθητικό φιλτράρισμα δεν είναι δυνατό μόνο στην περιοχή από την 3η έως την 25η αρμονική, αλλά επίσης δυνατή και πέρα από αυτό. Φάσεις φίλτρου για όλες τις πιθανές αρμονικές χαμηλότερης τάξης πρέπει να υπάρχουν για κάθε κύκλωμα φίλτρου, δηλαδή για υψηλότερες αρμονικές, για να αποφευχθεί η ενίσχυση τους.

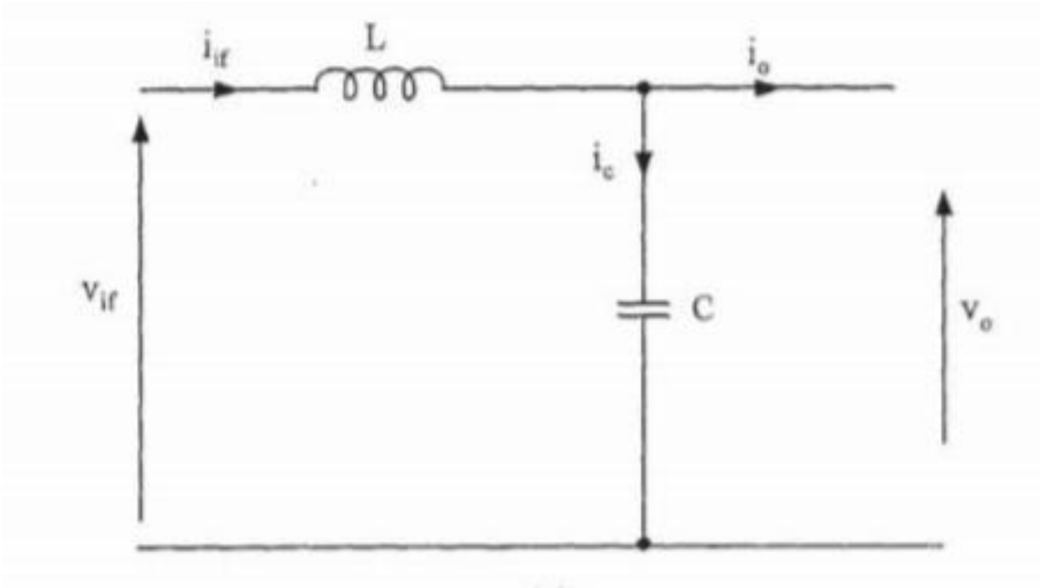
Τα παθητικά φίλτρα εφαρμόζονται συχνά ως συντονισμένα φίλτρα. Στα βιομηχανικά δίκτυα, αυτά τα φίλτρα συνήθως συντονίζονται με τις αρμονικές της τάξης ν = 5, 7, 11, 13,. . . τα οποία είναι χαρακτηριστικά για τους μετατροπείς.
Τα παθητικά φίλτρα και τα συστήματα αντιστάθμισης που προστατεύονται από Επαγωγικές αντιδράσεις - είναι κατασκευασμένα από ένα σειριακό κύκλωμα αντιδραστήρα και πυκνωτή..
Εκτός από την «βασική ισχύ εξισορρόπησης συχνότητας» (βασική αρμονική αντίδραση) που παρέχεται, η αρμονική ικανότητα φορτίου καθίσταται έτσι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για το παθητικό φιλτράρισμα.
Λόγω του συντονισμού, τα κυκλώματα φίλτρου δεν μπορούν να ελεγχθούν ως αντιστάθμιση ισχύος αντιδραστήρα. Η δημιουργία αρμονικών δεν συσχετίζεται με τις απαιτήσεις αντιστάθμισης. Αυτό σημαίνει ότι τα στάδια της ίδιας συχνότητας συντονισμού μπορούν έτσι να υπερφορτωθούν εάν ενεργοποιηθούν και απενεργοποιηθούν μόνο με βάση τις απαιτήσεις άεργου ισχύος

2.2 Τυπικές Εφαρμογές

- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις με σύνολο μη γραμμικών φορτίων που αντιπροσωπεύουν άνω των 500kVA (μεταβλητές ταχύτητες, UPS, ανορθωτές, κ.λπ.)
- Εγκαταστάσεις που απαιτούν διόρθωση συντελεστή ισχύος
- Εγκαταστάσεις όπου η παραμόρφωση τάσης πρέπει να μειωθεί για να αποφευχθεί η διατάραξη ευαίσθητων φορτίων
- Εγκαταστάσεις όπου η τρέχουσα παραμόρφωση πρέπει να μειωθεί για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση

2.3 Είδη Παθητικών Φίλτρων

Τα παθητικά φίλτρα απόσβεσης αρμονικών είναι συστήματα τα οποία παγιδεύουν τις αρμονικές και δεν τις επιτρέπουν να διεισδύσουν στο δίκτυο. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το κύκλωμα ενός χαμηλοπερατού φίλτρου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην είσοδο ή στην έξοδο μιας ηλεκτρονικής συσκευής έτσι ώστε να αποτρέψει τις αρμονικές τάσης να κατευθυνθούν προς το φορτίο. Τα φίλτρα αυτά προσφέρονται για το φιλτράρισμα πολλαπλών και διεσπαρμένων αρμονικών συχνοτήτων. Ρεύματα αρμονικών με συχνότητα μεγαλύτερης της συχνότητας αποκοπής φίλτρου αποκόπτονται και δεν εισέρχονται στο σύστημα ισχύος. Τα στοιχεία του κυκλώματος LC πρέπει να προσδιορίζονται σε συνδυασμό με την αυτεπαγωγή του συστήματος. Επειδή η συχνότητα αποκοπής είναι αρκετά χαμηλή το μέγεθος του πυκνωτή C είναι αρκετά μεγάλο και αυτό συνήθως έχει ως παρενέργεια την αύξηση της τάσης στο σημείο αυτό.



Σχήμα 2.4: βαθηπερατό φίλτρο

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη συντονιζόμενων φίλτρων τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για την εξάλειψη αρμονικών. Τα φίλτρα αυτά αποτελούνται από συνδυασμό πηνίων και ειδικών πυκνωτών κατάλληλα διαστασιολογημένων, ώστε να συντονίζουν σε επιλεγμένες συχνότητες. Ελέγχονται δε από ρυθμιστή ο οποίος ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου είτε βάζει εντός, είτε θέτει εκτός βαθμίδες πηνίων και πυκνωτών, ούτως ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπεραντιστάθμισης. Γενικώς τα φίλτρα αυτά είναι παράλληλης συνδεσμολογίας επειδή συνδέονται παράλληλα με το σύστημα ισχύος και σχηματίζουν κλάδους χαμηλής αντίστασης προς την γη για ένα η περισσότερα ρεύματα αρμονικών. Στα συστήματα ισχύος που τα φίλτρα είναι παράλληλα συνδεδεμένα είναι πιο οικονομικά και πιο πρακτικά από τα εν σειρά συνδεσμολογημένα για τους ακόλουθους λόγους:

- Στα εν σειρά συνδεσμολογημένα φίλτρα τα στοιχεία του φίλτρου διαστασολογούνται στην πλήρη ισχύ του συστήματος. Η θεμελιώδη αρμονική δηλαδή η συνιστώσα συχνότητας που φέρει σχεδόν όλη την ισχύ του συστήματος διέρχεται από τα στοιχεία του φίλτρου και αυτό έχει ως συνέπεια μεγαλύτερα σε μέγεθος και κόστος εξαρτήματα.
- Στα παράλληλα συνδεσμολογημένα φίλτρα τα στοιχεία του φίλτρου διαστασολογούνται με βάση την ισχύ των αρμονικών που θα αποκόψουν και λειτουργούν με μέρος της τάσης του συστήματος. Συνεπώς έχουμε πιο μικρά και οικονομικά στοιχεία.

Τα παθητικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εμπίπτουν σε τρείς βασικές κατηγορίες:

- Μονοσυντονιζόμενα φίλτρα
- Διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα

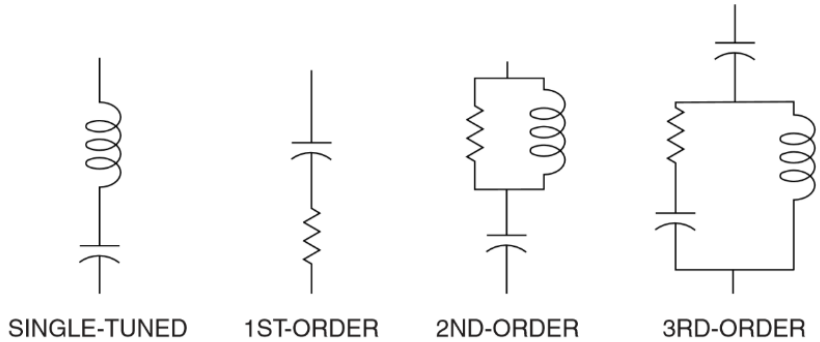
- Αποσβεσμένα Φίλτρα πρώτης, δευτέρας ή τρίτης τάξης

Τα Μονοσυντονιζόμενα φίλτρα είναι τα πιο οικονομικά αφού αποτελούνται από δύο μόλις στοιχεία έναν πυκνωτή και μια αυτεπαγωγή και συνήθως επαρκούν σε τυπικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται συνήθως για να φιλτράρουν συγκεκριμένες συχνότητες.

Τα Διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα συμπεριφέρονται βασικά ως δύο μονοσυντονιζόμενα φίλτρα, αλλά με το πλεονέκτημα των χαμηλότερων απωλειών ισχύος. Αποτελούνται από ένα εν σειρά LC κύκλωμα και ένα παράλληλα RLC κύκλωμα. Και αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα ορισμένων συχνοτήτων. Αν f_1 και f_2 είναι οι συχνότητες συντονισμού των δύο αυτών κυκλωμάτων ξεχωριστά τότε το συνδυασμένο κύκλωμα συντονίζεται στην μέση γεωμετρική συχνότητα

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

Στο διπλοσυντονιζόμενο φίλτρο οι απώλειες ισχύος στην θεμελιώδη συχνότητα είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές του μονοσυντονιζόμενου φίλτρου, ενώ το κύριο πλεονέκτημα του είναι στις εφαρμογές υψηλής τάσης εξαιτίας της μείωσης του αριθμού των πηνίων που υπόκειται σε πλήρη τάση γραμμής. Τα αποσβεσμένα φίλτρα ελέγχουν υψηλής τάξεως ομάδες αρμονικών και συνήθως συντονίζονται 11ης, 13ης και 17ης, 19ης. Επειδή τα φίλτρα αυτά παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση από τα μονοσυντονιζόμενα και τα διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για να φιλτράρουν αρμονικές που βρίσκονται κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα ισχύος, έτσι ώστε να έχουν χαμηλές απώλειες ισχύος. Το δευτέρας τάξης φίλτρο παρέχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά φιλτραρίσματος αλλά έχει υψηλότερες απώλειες στην θεμελιώδη συχνότητα εν συγκρίσει με αυτά της τρίτης τάξεως. Το κύριο πλεονέκτημα των τρίτης τάξεως φίλτρων έναντι αυτών της δευτέρας τάξης είναι ουσιαστική μείωση των απωλειών στην θεμελιώδη συχνότητα που οφείλονται στην παρουσία του δεύτερου πυκνωτή.



Σχήμα 2.5: Είδη Παθητικών Φίλτρων

Εντούτοις σε πολλές εφαρμογές ισχύος δεν υπάρχουν μόνο μερικές συγκεκριμένες αρμονικές αλλά εμφανίζεται πλήθος αυτών αρκετά διεσπαρμένες. Έτσι η απόσβεση όλων αυτών των αρμονικών με συντονιζόμενα φίλτρα είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία άρα η καλύτερη λύση ενδέχεται να είναι η εφαρμογή του χαμηλοπερατού φίλτρου(σχήμα 2.4).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ

3.1 Γενικά για τα Ενεργά Φίλτρα

Το ενεργό αρμονικό φιλτράρισμα είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία για την εξάλειψη αρμονικών παραμορφώσεων που βασίζεται σε προηγμένες ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος. Τα ενεργά φίλτρα είναι διαθέσιμα από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και τώρα είναι σχετικά συνηθισμένα σε βιομηχανικές εφαρμογές τόσο για τον αρμονικό μετριασμό όσο και για την αντιστάθμιση άεργου ισχύος (δηλαδή, διόρθωση του παράγοντα ηλεκτρονικής ισχύος). Ένα ενεργό φίλτρο ισχύος(APF) αποτελείται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούν συσκευές ημιαγωγών ισχύος που ελέγχονται από ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η χρήση ενεργών φίλτρων ισχύος για την αντιστάθμιση αρμονικών πριν εισέλθουν σε ένα σύστημα τροφοδοσίας είναι η βέλτιστη μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος των αρμονικών. Παρόλο που δεν έχουν τα μειονεκτήματα του παθητικού φίλτρου, τα ενεργά φίλτρα ισχύος έχουν κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που αναφέρονται ως εξής:

- Αντιμετωπίζουν περισσότερα από ένα αρμονικά κάθε φορά και μπορούν να αντισταθμίσουν άλλα προβλήματα ποιότητας ισχύος, όπως ανισορροπία φορτίου και μεταβατικές διαταραχές . Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για μεγάλα, παραμορφωτικά φορτία που τροφοδοτούνται από σχετικά αδύνατα σημεία στο σύστημα τροφοδοσίας.

- Είναι ικανά να μειώσουν την επίδραση παραμορφωμένων κυματομορφών ρεύματος / τάσης, όπως και αντιστάθμιση της θεμελιώδης συνιστώσας μετατόπισης του ρεύματος που αντλείται από μη γραμμικά φορτία.

- Λόγω της υψηλής δυνατότητας ελέγχου και της γρήγορης απόκρισης των συσκευών ημιαγωγών, έχουν ταχύτερη απόκριση από τα συμβατικά SVC.

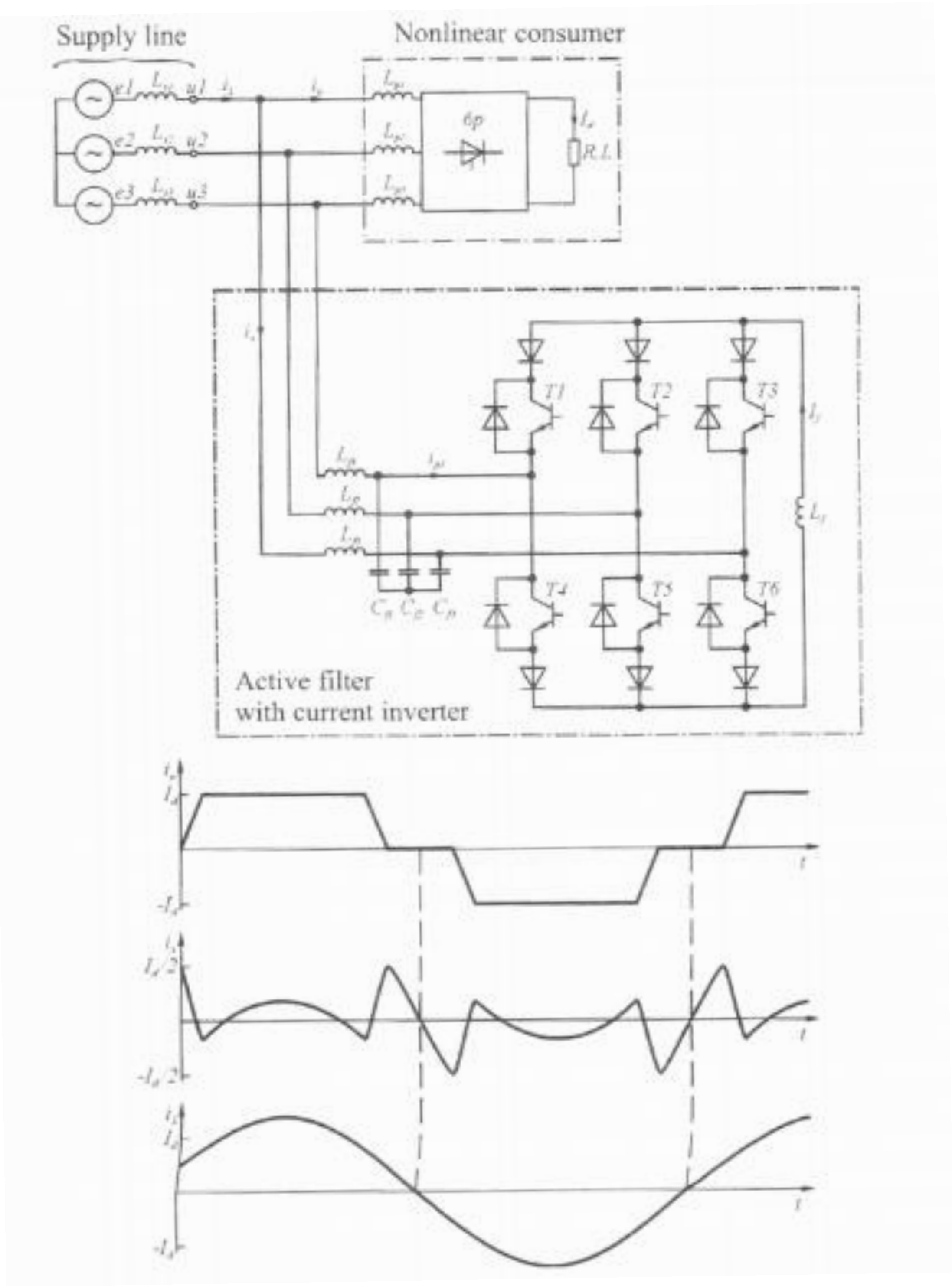
- Χρησιμοποιούν κυρίως συσκευές ημιαγωγών ισχύος παρά συμβατικά αντιδραστικά στοιχεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο συνολικό μέγεθος ενός αντισταθμιστή και αναμενόμενο χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου στο μέλλον λόγω της συνεχώς πτωτικής τάσης στην τιμή των διακοπτών σταθερής κατάστασης.

- Σε αντίθεση με τα παθητικά φίλτρα L-C, τα ενεργά φίλτρα δεν παρουσιάζουν πιθανό συντονισμό στο δίκτυο και δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές στην αντίσταση πηγής.

Η λειτουργία των ενεργών φίλτρων ισχύος (APF) είναι να παράγει αρμονικά ρεύματα ή τάσεις με τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα δικτύου ή τα κύματα τάσης να διατηρούν την ημιτονοειδή μορφή. Ωστόσο, η τεχνολογία ενεργού φίλτρου ισχύος αυξάνει την πολυπλοκότητα του κυκλώματος (κύκλωμα ισχύος και έλεγχος). Θα υπάρξουν επίσης ορισμένες απώλειες που σχετίζονται με τους διακόπτες ημιαγωγών. Η έννοια του φίλτρου ενεργού ισχύος είναι η ανίχνευση ή εξαγωγή των ανεπιθύμητων αρμονικών ακραίων συνιστωσών ενός ρεύματος γραμμής και στη συνέχεια η παραγωγή και έγχυση ενός σήματος στη γραμμή με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει μερική ή ολική ακύρωση των ανεπιθύμητων στοιχείων. Τα APF μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο σε σειρά (Series APF), παράλληλα (Shunt APF) για αντιστάθμιση αρμονικών τάσης ή αρμονικών ρεύματος αντίστοιχα. Ή μπορεί να συνδεθεί με παθητικά φίλτρα για την κατασκευή των υβριδικών φίλτρων (HAPF).

3.2. Αρχή Λειτουργείας Ενεργών Φίλτρων

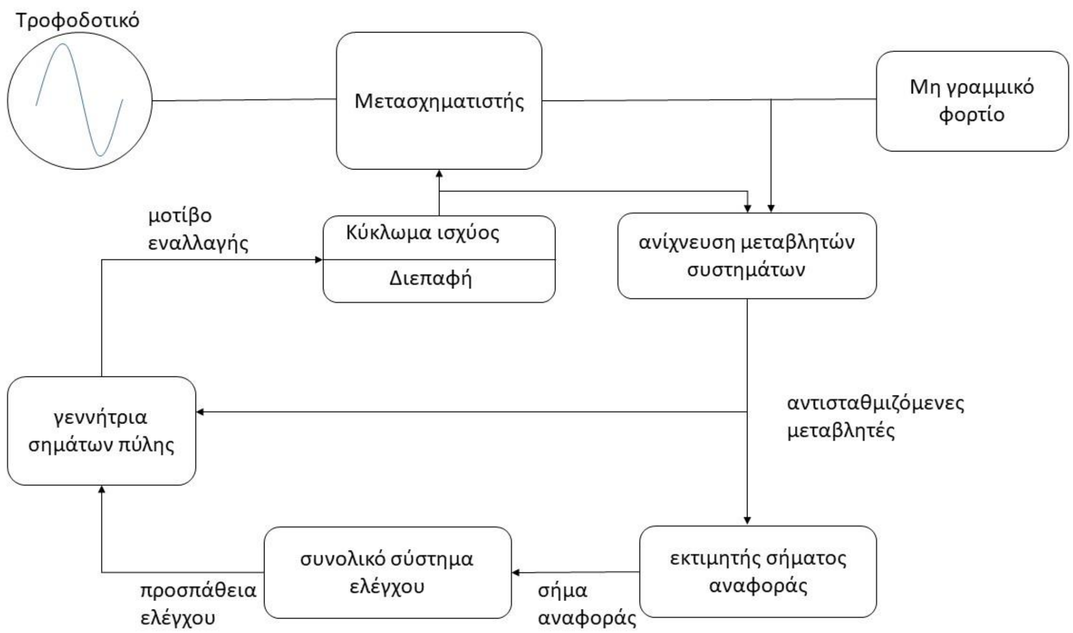
Η εφαρμογή των ενεργών φίλτρων είναι ένας άλλος τρόπος εξάλειψης των στρεβλώσεων των ρευμάτων που απορροφώνται από μη γραμμικούς καταναλωτές από ένα δίκτυο παροχής. Το ενεργό φίλτρο ισχύος (APF) είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος που είναι ικανός να παράγει το ρεύμα ή την τάση μιας αυθαίρετα υποτιθέμενης κυματομορφής στιγμιαίων τιμών. Το APF, σε αντίθεση με το παθητικό φίλτρο, ενεργεί ταυτόχρονα σε όλες τις αρμονικές, και το καθήκον του είναι να εξαλείψει την "μη ενεργή ισχύ". Η μη ενεργή ισχύς περιέχει τα εξαρτήματα που παράγονται από υψηλότερες αρμονικές ρεύματος και τάσης, καθώς και την παθητική ισχύ του θεμελιώδους στοιχείου. Ένα τέτοιο φίλτρο δεν έχει πηγή τροφοδοσίας και λειτουργεί απορροφώντας την ενέργεια από και επιστρέφοντάς το στο δίκτυο που αντισταθμίζεται από αυτό. Για την αποθήκευση της στιγμιαίας ενέργειας, χρησιμοποιούνται πυκνωτές ή ρυθμιστικά. Μια τέτοια αντιστάθμιση σε ένα δεδομένο σημείο του δικτύου στοχεύει στη λήψη μιας τέτοιας κατάστασης στην οποία οι τριφασικές τάσεις και τα ρεύματα σε αυτό το σημείο είναι ημιτονοειδείς και ισορροπημένες, και δεν υπάρχει μετατόπιση μεταξύ κυματομορφών ρεύματος και τάσης σε καθεμία από τις φάσεις. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντιστάθμιση των απωλειών στο σύστημα φίλτρου απορροφάται επίσης από το δίκτυο. Στο Σχ. 3.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του συστήματος ενεργού φίλτρου που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός τρέχοντος αντιστροφέα τρανζίστορ του οποίου στόχος είναι να αντισταθμίσει υψηλότερες αρμονικές του ρεύματος που απορροφάται από έναν μη γραμμικό καταναλωτή ο οποίος έχει τη μορφή έξι παλμών τριφασικός ανορθωτής. Ο αντιδραστήρας στο κύκλωμα DC παρέχεται για την αποθήκευση της ενέργειας που απορροφάται και αναπληρώνεται από τον κατάλληλα ελεγχόμενο ενσωματωμένο μετατροπέα.



Σχήμα 3.1: Η αντιστάθμιση της ισχύος παραμόρφωσης ενός μη γραμμικού καταναλωτή με τη χρήση ενός Ενεργού φίλτρου

Το ενεργό φίλτρο απορροφά ενέργεια από μια δεδομένη φάση, την αποθηκεύει στην «αποθήκη» του (πυκνωτής, αντιδραστήρα ή συσσωρευτής) και στη συνέχεια την περνά πίσω στη φάση όταν απαιτείται προσωρινά. Η ταχύτητα τέτοιων λειτουργιών επηρεάζει την ικανότητα του "καταστήματος", δηλαδή του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας . Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μια στιγμιαία ανταλλαγή ενέργειας
συμβαίνει μεταξύ του APF και του συστήματος τροφοδοσίας. Αυτή η ανταλλαγή πρέπει να είναι αμοιβαία και της μέσης τιμής σταθερής κατάστασης ίσης με το μηδέν (σε παραμελημένες απώλειες). Διαφορετικά το ενεργό φίλτρο ισχύος πρέπει να συνδέεται μόνιμα με μια πρόσθετη πηγή τροφοδοσίας ή ενεργό καταναλωτή.

Το Σχήμα 3.2 δείχνει τα στοιχεία ενός τυπικού συστήματος APF και τις συνδέσεις τους. Το σήμα αναφοράς αντιστάθμισης από τον εκτιμητή οδηγεί στον συνολικό ελεγκτή συστήματος. Αυτό με τη σειρά του παρέχει τον έλεγχο για τη γεννήτρια σήματος πύλης. Η έξοδος της γεννήτριας σήματος πύλης ελέγχει το κύκλωμα ισχύος μέσω κατάλληλης διεπαφής.



Σχήμα 3.2: Βασικό διάγραμμα του APF

Το κύκλωμα ισχύος στο παραπάνω γενικευμένο διάγραμμα μπορεί να συνδεθεί σε σειρές ή παράλληλες διαμορφώσεις ανάλογα με τον επαγωγέα διασύνδεσης / μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται. Ένα δυσμενές αλλά αδιαχώριστο χαρακτηριστικό του APF είναι η ανάγκη γρήγορης εναλλαγής υψηλών ρευμάτων στο κύκλωμα ισχύος του APF. Ένα ενεργό φίλτρο ισχύος μπορεί να θεωρηθεί αντισταθμιστής αρμονικών του συστήματος ισχύος. Η λειτουργία του ενεργού φίλτρου ισχύος αποτελείται κυρίως από τρία στάδια . Πρόκειται για:

- Προσαρμογή σήματος
- Παραγωγή σήματος αντιστάθμισης.
- Δημιουργία σήματος πύλης.

Η ρύθμιση σήματος αναφέρεται στην ανίχνευση ή την ανίχνευση αρμονικών στη γραμμή διανομής ισχύος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, το σήμα αναφοράς προς επεξεργασία από τον ελεγκτή είναι το βασικό στοιχείο που εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του APF. Η εκτίμηση του σήματος αναφοράς ξεκινά με την ανίχνευση βασικών σημάτων τάσης / ρεύματος για τη συλλογή ακριβών πληροφοριών για τις μεταβλητές του συστήματος. Οι μεταβλητές τάσης και ρεύματος στο σύστημα ισχύος ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας πιθανούς μετασχηματιστές, μετασχηματιστές ρεύματος, ενισχυτές απομόνωσης κ.λπ. Οι μεταβλητές τάσης που θα ανιχνευθούν είναι τάση πηγής AC, τάση DC-bus του APF και τάση σε μετασχηματιστή διασύνδεσης. Τυπικές μεταβλητές ρεύματος είναι ρεύμα φόρτωσης, ρεύμα πηγής AC, ρεύμα αντιστάθμισης και ρεύμα σύνδεσης DC του APF. Με βάση αυτές τις ανατροφοδοτήσεις μεταβλητών συστήματος, η εκτίμηση σημάτων αναφοράς από την άποψη των επιπέδων τάσης / ρεύματος εκτιμάται σε τομέα συχνότητας ή τομέα χρόνου. Το επόμενο στάδιο είναι η παραγωγή του αντισταθμιστικού σήματος από το διαταραγμένο κύμα που αποτελείται τόσο από το θεμελιώδες κύμα όσο και από το αρμονικό περιεχόμενο. Μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές μεθόδους - προσέγγιση τομέα συχνότητας και προσέγγιση τομέα χρόνου. Η προσέγγιση τομέα συχνότητας χρησιμοποιεί τη μέθοδο μετασχηματισμού Fourier για το σκοπό αυτό. Ενώ η προσέγγιση του τομέα χρόνου χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους όπως το στιγμιαίο θεώρημα αντιδραστικής ισχύος, το θεώρημα σύγχρονης αναφοράς-πλαισίου, το θεώρημα σύγχρονης ανίχνευσης, το θεώρημα ημι-πολλαπλασιασμού, η μέθοδος φίλτρου εγκοπής κ.λπ. Το τρίτο στάδιο είναι η δημιουργία σήματος πύλης για αρμονική καταστολή. Τόσες πολλές τεχνικές ελέγχου όπως το Space Vector PWM, επαναλαμβανόμενος έλεγχος, έλεγχος ρεύματος υστέρησης, έλεγχος ενός κύκλου, έλεγχος νεκρού ρυθμού, έλεγχος λειτουργίας ολίσθησης, ασαφής έλεγχος και η μέθοδος τεχνητού νευρικού δικτύου έχουν εισαχθεί και εφαρμοστεί σε διάφορες διαμορφώσεις φίλτρων ενεργού ισχύος . Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται γεννήτρια σήματος πύλης στο γενικό διάγραμμα.

Η αρχή του ενεργού φιλτραρίσματος για την τρέχουσα αντιστάθμιση φαίνεται στο σχήμα 3.3. Όπως φαίνεται υπάρχουν τρία ρεύματα στο κύκλωμα:

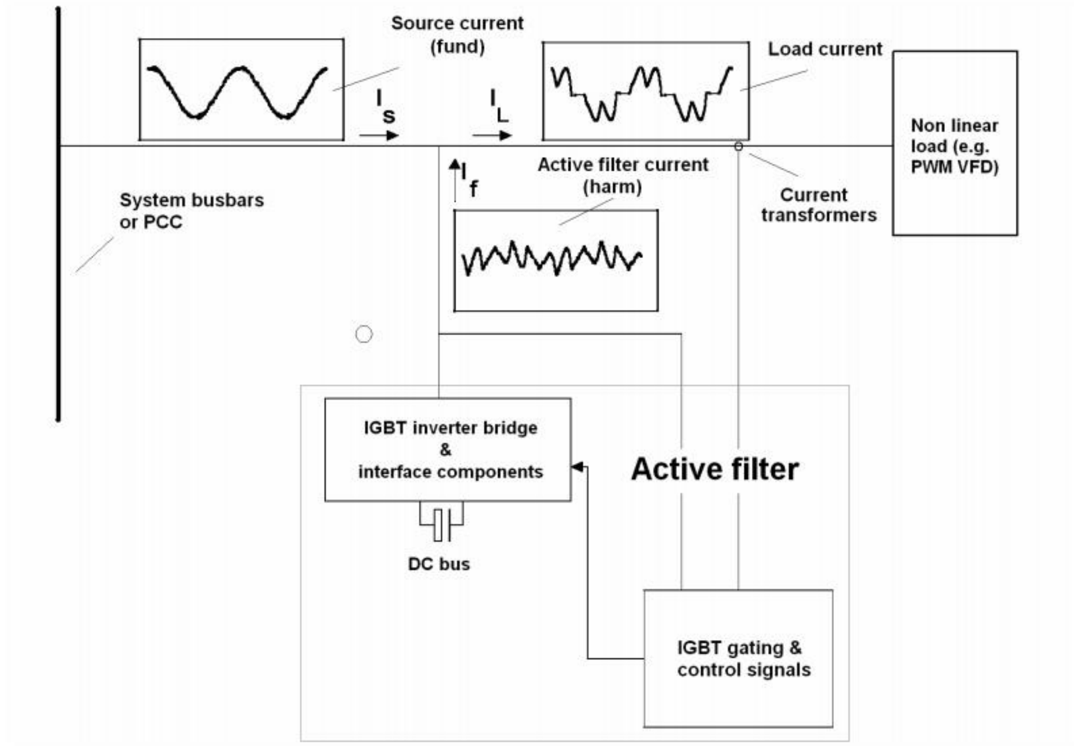
$$I_S = I_L - I_F \tag{3.1}$$

Όπου:

I_S = ρεύμα πηγής (θεμελιώδες)

I_L = ρεύμα μη γραμμικού φορτίου

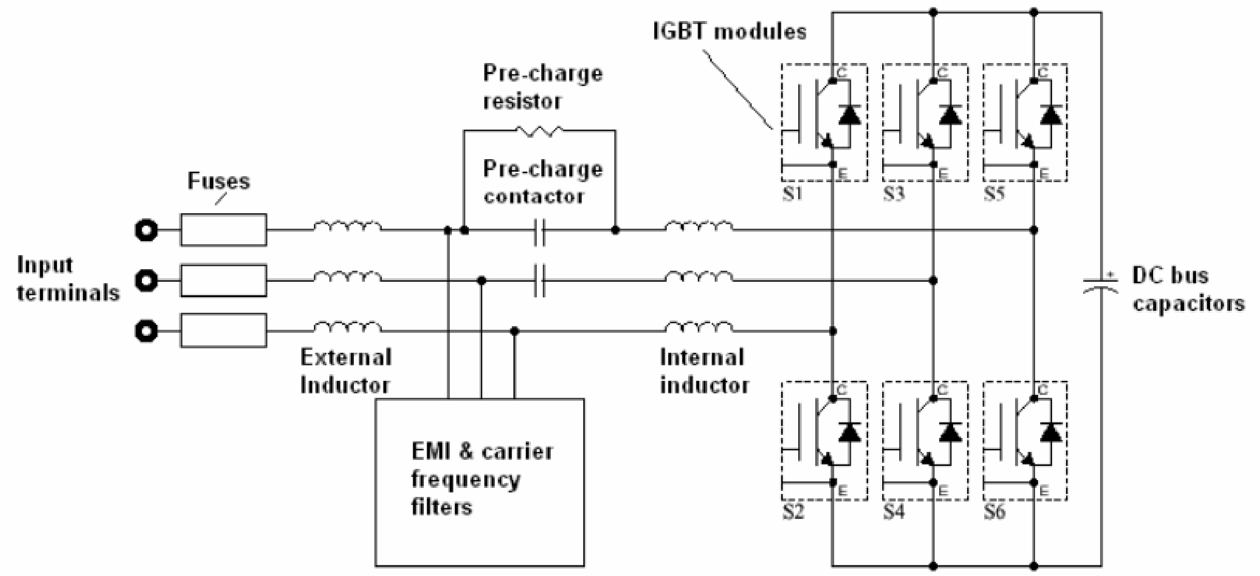
I_F = ρεύμα ενεργού φίλτρου(Αρμονικό)



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ενεργού φίλτρου με συσχετισμένες τρέχουσες κυματομορφές

Με αναφορά στο Σχήμα 3.3, το ενεργό φίλτρο μετρά το σχήμα κύματος της μη γραμμικής κυματομορφής ρεύματος φορτίου μέσω μετασχηματιστών ρεύματος (CT) στη γραμμή, ο πραγματικός αριθμός των οποίων ποικίλλει ανάλογα με τον κατασκευαστή. Η τάση αναφοράς που προέρχεται από τα CT τροφοδοτείται σε ένα φίλτρο εγκοπής ή παρόμοιο κύκλωμα, όπου αφαιρείται το Θεμελιώδες στοιχείο. Το υπόλοιπο σήμα είναι ένα μέτρο του "ρεύματος παραμόρφωσης" (δηλαδή, το ρεύμα φορτίου μείον το βασικό ρεύμα). Αυτό το σήμα στη συνέχεια τροφοδοτείται στο σύστημα ελέγχου το οποίο δημιουργεί τα αντίστοιχα μοτίβα ενεργοποίησης IGBT που είναι απαραίτητα για την αναπαραγωγή και την ενίσχυση του «ρεύματος παραμόρφωσης» (τώρα ονομάζεται «ρεύμα αντιστάθμισης»), το οποίο εγχέεται στο φορτίο σε φάση (π.χ. , Εμφανίζεται 180 °) για την αντιστάθμιση του αρμονικού ρεύματος.

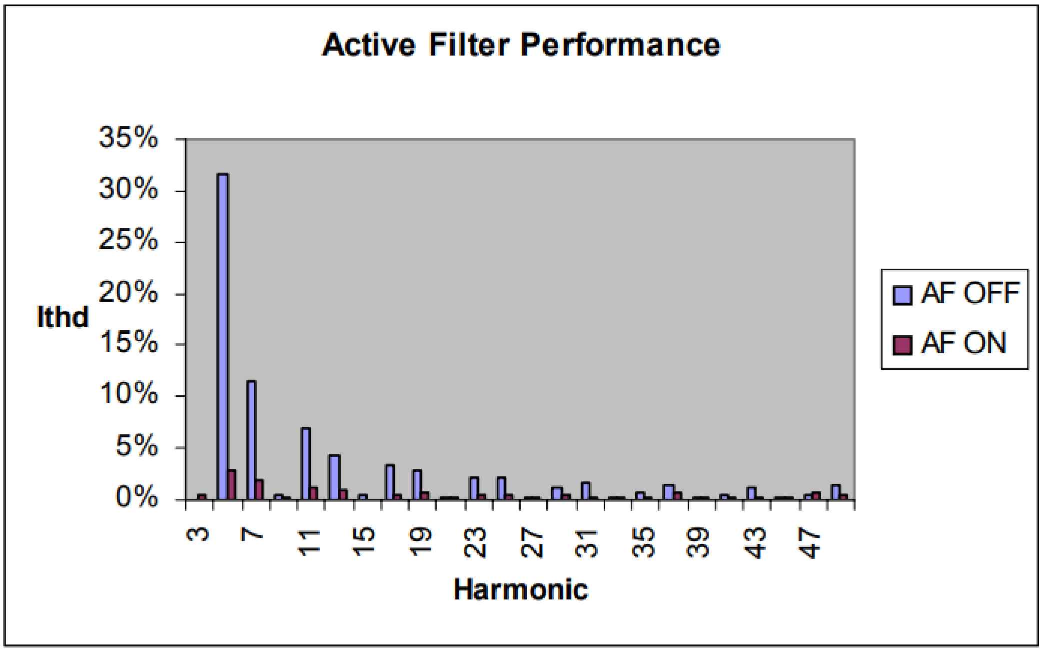
Όταν βαθμολογείται σωστά ως προς το "αρμονικό ρεύμα αντιστάθμισης", το ενεργό φίλτρο παρέχει στο μη γραμμικό φορτίο το αρμονικό ρεύμα που χρειάζεται για να λειτουργήσει, ενώ η πηγή παρέχει μόνο το θεμελιώδες ρεύμα (δηλαδή, 50 Hz ή 60 Hz στοιχείο). Το σχήμα 3.4, παρακάτω, απεικονίζει ένα τυπικό σχηματικό κύκλωμα ισχύος ενός ενεργού φίλτρου συνδεδεμένου με διακλάδωση. Τα φίλτρα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) και φορέων είναι παθητικά δίκτυα L-C. Το φίλτρο EMI παρέχει φιλτράρισμα κοινής λειτουργίας [δηλαδή, μεταξύ όλων των φάσεων και γείωσης (γη) και ένα μέτρο φιλτραρίσματος διαφορικής λειτουργίας (δηλαδή, μεταξύ φάσεων)]. Σε εφαρμογές της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), ένα αναβαθμισμένο φίλτρο EMI ή ένα πρόσθετο φίλτρο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) είναι συνήθως απαραίτητο προκειμένου να συμμορφώνεται με την οδηγία EMC της ΕΕ σχετικά με τα όρια εκπομπών EMI στην περιοχή από 150 kHz έως 30 MHz.



Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο κύκλωμα ισχύος του ενεργού φίλτρου

Το "φίλτρο φορέα"(Carrier filter) εξασθενεί τη συχνότητα φορέα γέφυρας IGBT (δηλαδή, ~ 5 kHz έως 20 MHz ανάλογα με τη βαθμολογία του ενεργού φίλτρου σε υψηλότερες βαθμούς(> 300 A) η συχνότητα μεταγωγής συνήθως μειώνεται για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος της συσκευής). Ωστόσο, μετά το φιλτράρισμα συχνότητας φορέα, μπορεί να είναι εμφανής κάποια διαρροή, η οποία μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τα εξαρτήματα σε δίσκους SCR εμπρός άκρου και άλλου εξοπλισμού. Σε αυτές τις εφαρμογές, ένας αντιδραστήρας γραμμής AC 3% μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ενεργού φίλτρου και του μη γραμμικού φορτίου είναι συνήθως επαρκής για να αποτρέψει οποιαδήποτε δυσμενή αλληλεπίδραση και να μειώσει το μέγεθος του αρμονικού ρεύματος. Οι αντιστάσεις προφόρτισης και οι σχετικοί επαφείς εξασθενούν το ρεύμα εισόδου του διαύλου DC κατά την αρχική ενεργοποίηση, μεγιστοποιώντας έτσι τη διάρκεια ζωής των πυκνωτών. Η αρχιτεκτονική της γέφυρας IGBT και του διαύλου DC είναι παρόμοια με εκείνη που υπάρχει στις μονάδες AC PWM. Ο δίαυλος DC χρησιμοποιείται ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Ο επαφέας προφόρτισης και η αντίσταση προφόρτισης χρησιμοποιούνται για την «μαλακή εκκίνηση» του διαύλου DC (δηλαδή, τη μείωση του ρεύματος εισόδου στους πυκνωτές διαύλου DC κατά την αρχική ενεργοποίηση). Ο δίαυλος DC επαναφορτίζεται συνεχώς μέσω των διόδων πακέτου IGBT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Η γέφυρα IGBT δημιουργεί ένα τρέχον σχήμα κύματος για την αρμονική αντιστάθμιση με βάση το σήμα «παραμόρφωσης ρεύματος» που προέρχεται από τα CT και το φίλτρο εγκοπής ή παρόμοιο κύκλωμα.

Το σχήμα 3.5, παρακάτω, απεικονίζει την τυπική απόδοση ενός ενεργού φίλτρου με σωστή αξιολόγηση. Το μη γραμμικό φορτίο είναι μια μονάδα AC PWM με αντιδραστήρα γραμμής AC 3%. Χωρίς το ενεργό φίλτρο στο κύκλωμα, το I_{thd} είναι 35,28%. Με το ενεργό φίλτρο να λειτουργεί, το I_{thd} μειώνεται στο 3,67%. Τα ενεργά φίλτρα θα πρέπει να αξιολογούνται ως «αρμονικό ρεύμα ακύρωσης», με βάση τα ρεύματα που τραβήχτηκαν με το φίλτρο στο κύκλωμα. Για να βοηθήσει στη μείωση του μεγέθους του αρμονικού ρεύματος, οι Επαγωγικές αντιδράσεις γραμμής AC τουλάχιστον 3% πρέπει να συνδέονται μεταξύ του φίλτρου και του φορτίου. Ο αντιδραστήρας γραμμής AC χρησιμεύει επίσης για να παρέχει προστασία σε μονάδες SCR με βάση τα μπροστινά άκρα από τη συχνότητα του ενεργού φορέα φίλτρου. Τα περισσότερα ενεργά φίλτρα δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης φόντου τάσης (> 8-10%), λόγω βλάβης σε χωρητικά στοιχεία στην είσοδο του φίλτρου. Η βαθμολογία ενός ενεργού φίλτρου πρέπει να βασίζεται στο ρεύμα φόρτωσης που έχει σχεδιαστεί με το ενεργό φίλτρο συνδεδεμένο, όπως περιγράφεται παραπάνω. Σε αντίθετη περίπτωση, το ενεργό φίλτρο μπορεί να είναι «κορεσμένο» πρόωρα (δηλαδή, το ρεύμα περιορίζεται στο μέγιστη βαθμό του), με τυχόν επιπλέον αρμονικό ρεύμα να χυθεί στο δίκτυο ως «ρεύμα παραμόρφωσης» και να αυξήσει την παραμόρφωση της πλευρικής τάσης της πηγής. Ωστόσο, πολλά ενεργά φίλτρα λειτουργούν τακτικά κατά διαστήματα σε μέγιστα επίπεδα ρεύματος εξόδου χωρίς γνωστά προβλήματα.



Σχήμα 3.5: Τυπική απόδοση ενεργού φίλτρου με 150 HP AC PWM με 3% AC αντιδραστήρα γραμμής

Τα ενεργά φίλτρα αντισταθμίζουν τα αρμονικά ρεύματα και παρέχουν αντιστάθμιση άεργου ισχύος (δηλαδή, ηλεκτρονική διόρθωση συντελεστή ισχύος). Σε ψηφιακά ελεγχόμενα φίλτρα, η ποσότητα κάθε μπορεί να επιλεγεί μέσω του πληκτρολογίου διεπαφής χρήστη. Ωστόσο, σε παλαιότερα σχέδια αναλογικού συστήματος ελέγχου, δεν είναι συνήθως δυνατό να ελέγξετε το άεργο ρεύμα. Αυτό μπορεί να είναι προβληματικό. Για παράδειγμα, σε συστήματα ισχύος όπου το μη γραμμικό φορτίο έχει απενεργοποιηθεί ή το φορτίο βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, είναι πιθανό να επιβληθεί στην πηγή ανεξέλεγκτο άεργο ρεύμα έως σχεδόν τη μέγιστη χωρητικότητα του ενεργού φίλτρου. Αυτό μπορεί να μην προκαλεί ανησυχίες για «άκαμπτα» παραθαλάσσια

τροφοδοτικά, αλλά μπορεί να είναι προβληματικό σε «μαλακές» θαλάσσιες και υπεράκτιες γεννήτριες προμήθειες τάσης.
Ο έλεγχος του ποσού του ρεύματος αντιστάθμισης αρμονικής σε αντιδραστικό ρεύμα σε ψηφιακά ενεργά φίλτρα βασίζεται στην ονομαστική χωρητικότητά του και βασίζεται στον ακόλουθο τύπο:

$$I_{AF} = \sqrt{I^2{}_h + I^2{}_r} \tag{3.2}$$

Όπου

I_{AF}= συνολικό ρεύμα εξόδου του ενεργού φίλτρου
I_h= Πρόσθετο αρμονικό ρεύμα του φίλτρου
I_r= Πρόσθετο άεργο ρεύμα

Τα ενεργά φίλτρα έχουν τη δυνατότητα να αντισταθμίζουν τυχόν ανισορροπίες ρεύματος από πλευράς φορτίου, αλλά είναι γνωστό ότι είναι ευαίσθητα σε ανισορροπία τάσης στην πλευρά πηγής της σύνδεσης. Λάβετε υπόψη ότι έχει πραγματοποιηθεί μικρή έρευνα σχετικά με την απόδοση του ενεργού φίλτρου υπό συνθήκες ανισορροπίας, αλλά δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες υποδηλώνουν ότι οι μη ισορροπημένες τάσεις μπορούν να δημιουργήσουν μια 2η αρμονική τάση στο δίαυλο DC, και επομένως ένα 2ο αρμονικό ρεύμα, του οποίου το πλάτος εξαρτάται στη χωρητικότητα του διαύλου DC. Αυτή η 2η αρμονική μπορεί να απεικονιστεί στην πλευρά AC του φίλτρου ως 3η αρμονική, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της αρμονικής αντιστάθμισης. Η υπερβολική παραμόρφωση τάσης φόντου (δηλ.,> 8-10% Vthd) μπορεί, εκτός από την καταστροφή των χωρητικών στοιχείων στην ενεργή είσοδο φίλτρου, να επηρεάσει επίσης τη δημιουργία αναφοράς και άλλων σημάτων. Επομένως, παρουσία υψηλών επιπέδων παραμόρφωσης τάσης υποβάθρου, πρέπει να φιλτράρονται τα «σήματα τάσης τροφοδοσίας» (δηλαδή εκείνα που είναι απαραίτητα για έλεγχο και προστασία). Για λειτουργία άνω του 1 KV, τα ενεργά φίλτρα LV μπορούν να εισχωρήσουν στην τροφοδοσία μέσω παρεμβαλλόμενων μετασχηματιστών με μικρή απώλεια απόδοσης σε υψηλότερες συχνότητες. Αυτοί οι μετασχηματιστές πρέπει να σχεδιαστούν ειδικά με βάση την ένεση αρμονικών ρευμάτων σε συχνότητες έως 2,5 kHz ή 3 kHz (50η αρμονική με βάση 50 Hz και 60 Hz βασικές αρχές). Τα ενεργά φίλτρα είναι σχετικά απλά στην εφαρμογή. Μπορούν να συνδεθούν με οποιοδήποτε μη γραμμικό φορτίο ή σημείο κοινής ζεύξης (PCC). Η αποτελεσματικότητά τους στη μείωση της «γραμμής εγκοπής» λόγω πλήρως ελεγχόμενων μονάδων SCR και άλλου παρόμοιου εξοπλισμού εξαρτάται από την ταχύτητα λειτουργίας του φίλτρου, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τον κατασκευαστή και / ή την ποσότητα της αντίδρασης μετακίνησης στη γραμμή. Τα ενεργά φίλτρα μπορούν συνήθως να μειώσουν την εγκοπή, αλλά δεν μπορούν να το εξαλείψουν εντελώς.
Τα ενεργά φίλτρα είναι σύνθετα προϊόντα και ενδέχεται να μην είναι δυνατή η επισκευή τους από οποιοδήποτε άλλο μέρος εκτός από τους μηχανικούς σέρβις του κατασκευαστή. Επίσης, είναι απαραίτητη η πλήρης θέση σε λειτουργία από τους κατασκευαστές για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση, αν και τα μοντέλα «self tuning» είναι πλέον διαθέσιμα. Τα ενεργά φίλτρα προσφέρουν καλή απόδοση στη μείωση των αρμονικών και στον έλεγχο του συντελεστή ισχύος. Η χρήση τους πρέπει να εξεταστεί βάσει έργου ανά έργο, ανάλογα με τα κριτήρια εφαρμογής.

3.3 Θεωρία στιγμιαίας ισχύος (Instantaneous power p-q theory)

Η θεωρία της στιγμιαίας άεργης ισχύος δημοσιεύθηκε αρχικά στα Αγγλικά στα Πρακτικά του Διεθνούς Συνεδρίου Ηλεκτρονικής Ισχύος(International Power Electronics Conference) το 1983. Ωστόσο, ήταν το 1984, μετά τη δημοσίευσή του σε IEEE TRANSACTIONS, όταν αυτή η θεωρία έγινε γνωστή παγκοσμίως. Από τότε, η θεωρία της στιγμιαίας άεργης ισχύος ήταν η πιο χρησιμοποιημένη στρατηγική αντιστάθμισης στα φίλτρα ενεργού ισχύος (APF). Πράγματι, η προτεινόμενη στρατηγική λαμβάνει ημιτονοειδή και ισορροπημένα ρεύματα, σταθερή στιγμιαία ισχύ και συντελεστή ισχύος ενότητας στην πλευρά της πηγής όταν η τάση που εφαρμόζεται είναι ισορροπημένη και ημιτονοειδής. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, δηλαδή, όταν η τάση είναι μη ισορροπημένη και / ή μη-ημιτονοειδής, η στιγμιαία ισχύς είναι σταθερή μετά την αντιστάθμιση στην πλευρά της πηγής, αλλά το ρεύμα δεν είναι ισορροπημένο και ημιτονοειδές, και ο συντελεστής ισχύος δεν είναι η ενότητα. Έτσι, από την άποψη της έρευνας, η δημοσίευση της θεωρίας της στιγμιαίας άεργης ισχύος προκάλεσε μεγάλο αντίκτυπο στις τεχνικές αντιστάθμισης. Επομένως, έκτοτε έχουν δημοσιευτεί πολλές προσεγγίσεις. Στην πραγματικότητα, τη δεκαετία του 1990, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε ειδικά στη μελέτη τριφασικών συστημάτων τεσσάρων συρμάτων στις πιο γενικές συνθήκες: μη ισορροπημένη και μη ημιτονοειδής πηγή και μη γραμμικό μη ισορροπημένο φορτίο. Ο πρώτος στόχος ήταν να βρεθούν στρατηγικές ελέγχου που επιτρέπουν την εξουδετέρωση του ουδέτερου ρεύματος με μηδενική μέση ισχύ που μεταφέρεται από τον αντισταθμιστή. Έτσι, εκτός από την αρχική διατύπωση, μεταξύ άλλων, η τροποποιημένη σύνθεση p-q ξεχωρίζει. Μια συγκριτική αξιολόγηση αυτών των θεωριών πραγματοποιήθηκε όταν εφαρμόστηκαν για την απόκτηση αλγορίθμων ελέγχου ενεργητικών γραμμών ισχύος για μη ισορροπημένα συστήματα με μη-ημιτονοειδή τάση. Υπό αυτές τις συνθήκες, κάθε θεωρία παρήγαγε διαφορετικά αποτελέσματα, χωρίς να αποκτήσει την ευκαιρία να αποδείξει, με γενικό τρόπο, το πλεονέκτημα οποιασδήποτε θεωρίας έναντι των άλλων. Άλλες αξιοσημείωτες διατυπώσεις είναι το d-q, ή η εναλλακτική του μορφή, το id-iq στο περιστρεφόμενο πλαίσιο, το p-q-r και η διανυσματική διαμόρφωση. Όλα αυτά σχετίζονται με τη μεταφορά ενέργειας σε ένα τριφασικό σύστημα σε λειτουργία με τη στιγμιαία ισχύ (στιγμιαία πραγματική ισχύ) p (t) και με τη στιγμιαία φανταστική (ή άεργη) ισχύ, ανάλογα με τη διατύπωση. Αυτή η τελευταία ποσότητα καθορίζει τη διαφορά μεταξύ της θεωρίας της στιγμιαίας άεργης ισχύος και των υπόλοιπων άλλων πιθανών θεωριών σχετικά με την ηλεκτρική ισχύ. Όλα αυτά τα έργα έχουν δημοσιευτεί προσπαθώντας να βελτιώσουν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη θεωρία της στιγμιαίας άεργης ισχύος σε τριφασικά τεσσάρων συρμάτων συστήματα σε οποιεσδήποτε συνθήκες τροφοδοσίας τάσης. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των στρατηγικών αποζημίωσης που προέρχονται από αυτές τις σχετικές θεωρίες σε ένα ίδιο σύστημα ισχύος, δείχνει ότι καμία από αυτές τις θεωρίες δεν λαμβάνει ισορροπημένο και ημιτονοειδές ρεύμα πηγής εάν η τάση είναι μη ισορροπημένη και μη-ημιτονοειδής.

Το 1983, ο Akagi έχει προτείνει τη «Γενικευμένη Θεωρία της Στιγμιαίας Άεργης Ισχύος σε Τριφασικά Κυκλώματα», επίσης γνωστή ως θεωρία στιγμιαίας ισχύος ή θεωρία p-q. Βασίζεται σε στιγμιαίες τιμές σε τριφασικά συστήματα ισχύος με ή χωρίς ουδέτερο καλώδιο και ισχύει για λειτουργίες σταθερής κατάστασης ή παροδικές, καθώς και για γενικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Η θεωρία p-q αποτελείται από έναν αλγεβρικό μετασχηματισμό (μετασχηματισμός Clarke) των τριφασικών τάσεων και ρευμάτων στις συντεταγμένες a-b-c έως τις συντεταγμένες α-β-0, ακολουθούμενος από τον υπολογισμό των στοιχείων στιγμιαίας ισχύος της θεωρίας p-q:

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

$$\begin{pmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

$p_0 = v_0 \cdot i_0$ στιγμιαία ισχύ μηδενικής ακολουθίας (3.5)

$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta$ στιγμιαία πραγματική ισχύς (3.6)

$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha$ στιγμιαία φανταστική ισχύς (3.7)

Τα στοιχεία ισχύος p και q σχετίζονται με τις ίδιες τάσεις και ρεύματα α-β και μπορούν να γραφτούν μαζί:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

Αυτές οι ποσότητες απεικονίζονται στο Σχήμα 4 για ένα ηλεκτρικό σύστημα που αντιπροσωπεύεται σε συντεταγμένες abc και έχουν την ακόλουθη φυσική σημασία:

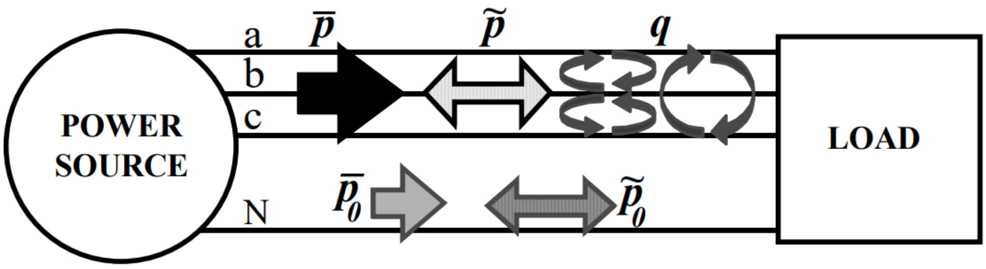
$\overline{p}_0$= μέση τιμή της στιγμιαίας ισχύος μηδενικής ακολουθίας αντιστοιχεί στην ενέργεια ανά χρόνο ενότητα που μεταφέρεται από την παροχή ισχύος στο το φορτίο μέσω των στοιχείων μηδενικής ακολουθίας τάσης και ρεύματος.

$\tilde{p}_0$= εναλλασσόμενη τιμή της στιγμιαίας ισχύος μηδενικής ακολουθίας Εννοεί την ενέργεια ανά ώρα που ανταλλάσσεται μεταξύ της τροφοδοσίας και του φορτίου μέσω των στοιχείων μηδενικής ακολουθίας. Η ισχύς μηδενικής ακολουθίας υπάρχει μόνο σε τριφασικά συστήματα με ουδέτερο σύρμα. Επιπλέον, τα συστήματα πρέπει να έχουν μη ισορροπημένες τάσεις και ρεύματα και/ή 3ης αρμονικής τόσο σε τάση όσο και σε ρεύμα τουλάχιστον μιας φάσης.

$\bar{p}$= μέση τιμή της στιγμιαίας πραγματικής ισχύος αντιστοιχεί στην ενέργεια ανά ώρα, η οποία μεταφέρεται από την τροφοδοσία στο φορτίο, μέσω των συντεταγμένων a-b-c, με ισορροπημένο τρόπο (είναι το επιθυμητό στοιχείο ισχύος).

$\tilde{p}$= εναλλασσόμενη τιμή της στιγμιαίας πραγματικής ισχύος. Είναι η ενέργεια ανά ώρα που ανταλλάσσεται μεταξύ της τροφοδοσίας και του φορτίου, μέσω των συντεταγμένων a-b-c.

q = στιγμιαία φανταστική ισχύς - αντιστοιχεί στην ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ των φάσεων του φορτίου. Αυτό το στοιχείο δεν συνεπάγεται μεταβίβαση ή ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ της τροφοδοσίας και του φορτίου, αλλά είναι υπεύθυνο για την ύπαρξη ανεπιθύμητων ρευμάτων, τα οποία κυκλοφορούν μεταξύ των φάσεων του συστήματος. Στην περίπτωση ισορροπημένης ημιτονοειδούς τροφοδοσίας τάσης και ισορροπημένου φορτίου, με ή χωρίς αρμονικές, q (η μέση τιμή της στιγμιαίας φανταστικής ισχύος) είναι ίση με τη συμβατική άεργη ισχύ.



Σχήμα 3.6: Στοιχεία ισχύος της θεωρίας p-q σε συντεταγμένες a-b-c.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.ΕΙΔΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

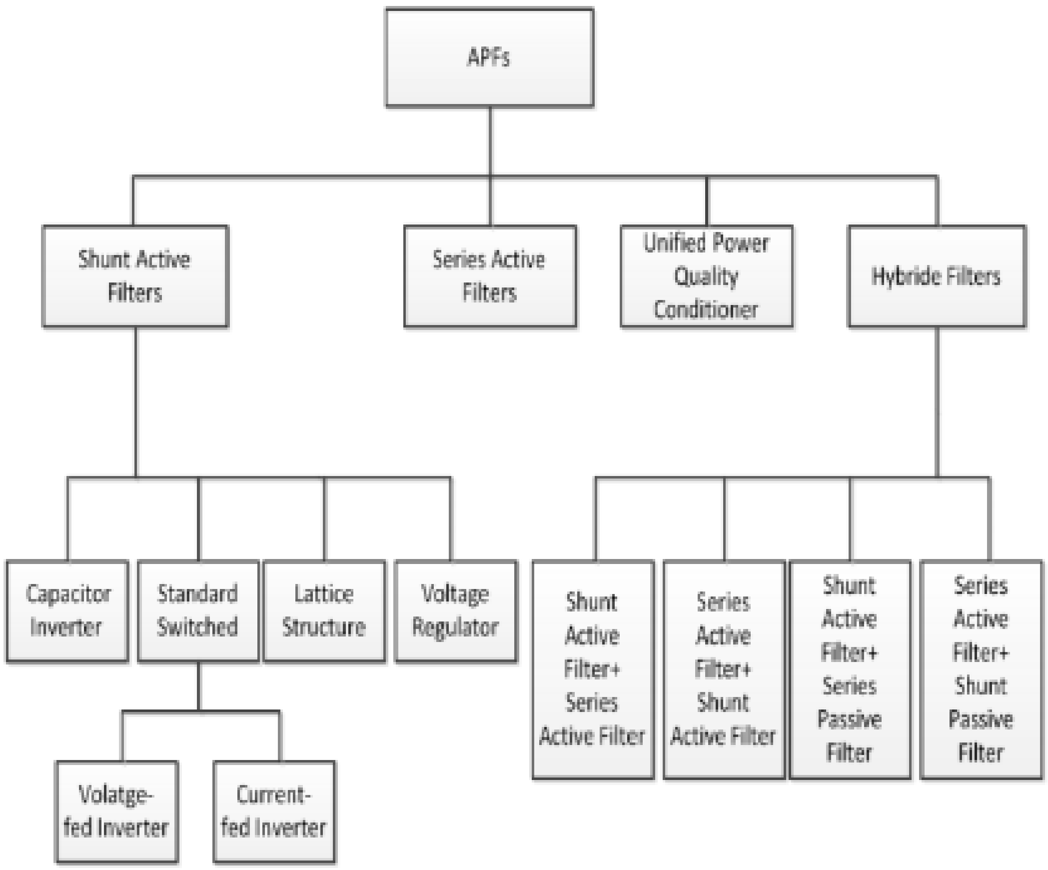
4.1 Εισαγωγή

Αρχικά τα παθητικά φίλτρα συνήθως χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση των προβλημάτων ποιότητας ισχύος. Αυτές οι προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς σε υψηλή τάση μετάδοσης DC (HVDC) για φιλτράρισμα των αρμονικών στις πλευρές AC και DC. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση είναι ακατάλληλη σε επίπεδο διανομής, καθώς τα παθητικά φίλτρα μπορούν να διορθώσουν μόνο συγκεκριμένες συνθήκες φορτίου ή μια συγκεκριμένη κατάσταση του συστήματος ισχύος. Αυτά τα φίλτρα δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις μεταβαλλόμενες συνθήκες συστήματος. Έτσι, το ενεργό φιλτράρισμα (APF) εισήχθη για αντιστάθμιση των αρμονικών και της άεργης ισχύς.
Τα ενεργά φίλτρα ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Διαμορφώσεις και συνδέσεις κυκλώματος ισχύος
- Ονομαστική ισχύς και ταχύτητα απόκρισης που απαιτείται στα αντισταθμισμένα συστήματα
- Παράμετροι συστήματος προς αντιστάθμιση
- Χρησιμοποιούμενες τεχνικές ελέγχου
- Τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος / τάσης αναφοράς

4.2 Είδη ενεργών φίλτρων βάση κυκλώματος ισχύος, διαμορφώσεων και συνδέσεων

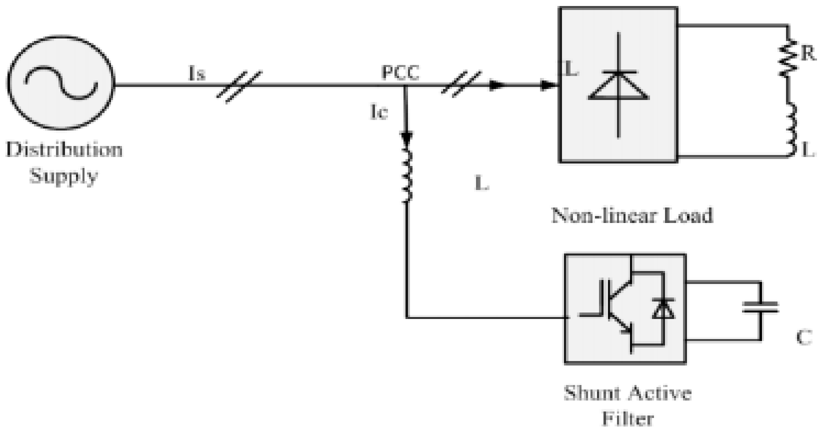
Όταν τα APF ταξινομούνται σύμφωνα με συνδέσεις και διαμορφώσεις κυκλώματος ισχύος, αυτό επηρεάζει πολύ την αποτελεσματικότητά του και την ακρίβεια της αντιστάθμισης. Είναι επομένως πολύ σημαντικό να επιλέξετε το σωστό είδος διαμόρφωσης για αντιστάθμιση. Το σχήμα 4.1 δείχνει διαφορετικούς τύπους APF όταν ταξινομούνται με βάση τις διαμορφώσεις και τις συνδέσεις τους.



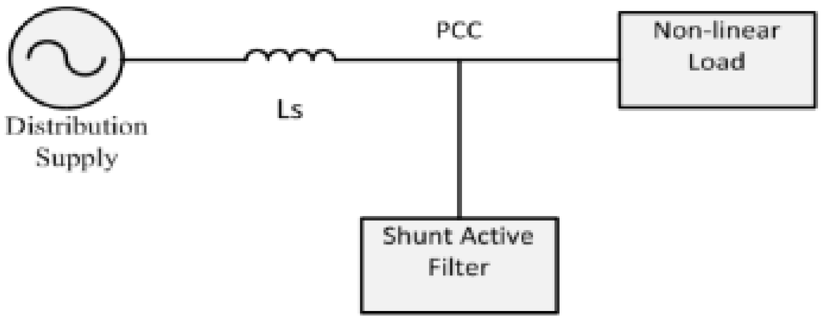
Σχήμα 4.1: είδη των ενεργών φίλτρων με βάση το κύκλωμα ισχύος, τις διαμορφώσεις και τις συνδέσεις

4.2.1 Παράλληλα ενεργά φίλτρα

Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και κυρίαρχη μορφή ενεργών φίλτρων (APF) για την αντιστάθμιση του ρεύματος φορτίου αρμονικών και άεργη ισχύς επίσης. Συνδέεται παράλληλα με την παροχή διανομής στο PCC και εισάγει αρμονικό ρεύμα που είναι ίσο σε μέγεθος με το φορτίο αρμονικού ρεύματος αλλά έχει 180 μοίρες μετατόπιση φάσης για να ακυρώσει τις αρμονικές ρεύματος φορτίου και η πηγή ρεύματος γίνεται ημιτονοειδές . Το σχήμα 4.2 και 4.3 δείχνει τη διαμόρφωση συστήματος του παράλληλου ενεργού φίλτρου. Για αυξημένο εύρος βαθμού ισχύος, μπορούν να ενεργοποιηθούν αρκετά παράλληλα ενεργά φίλτρα μαζί για να αντέξει υψηλότερα ρεύματα.



Σχήμα 4.2: Παράλληλο ενεργό φίλτρο



Σχήμα 4.3 :Διαμόρφωση δικτύου σε παράλληλο ενεργό φίλτρο

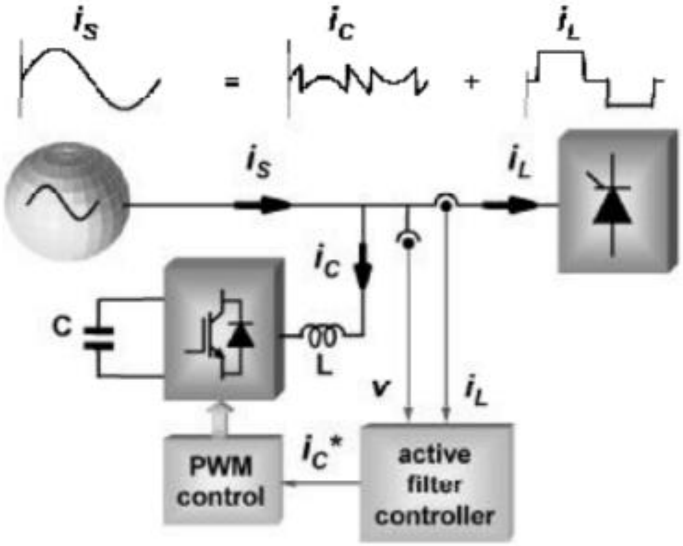
Το παράλληλο ενεργό φίλτρο είναι συνήθως κατασκευασμένο με τη μορφή τριφασικού μετατροπέα σε διαμόρφωση πλάτους παλμού. Εφαρμόζοντας μια κατάλληλα υψηλή συχνότητα διαμόρφωσης, της τάξης των 20-30kHz, είναι συνήθως δυνατό να αντισταθμιστεί η υποτιθέμενες παραμορφώσεις έως την 19^{η} αρμονική. Στην πράξη εφαρμόζονται και οι δύο τύποι μετατροπέων: αυτοί εξοπλισμένοι με μια τρέχουσα πηγή (μια αυτεπαγωγή ως στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας) και αυτές που έχουν πηγή τάσης (ένας πυκνωτής ως στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας).
Στην περίπτωση του παράλληλου ενεργού φίλτρου είναι δυνατόν να επιτευχθεί ότι όλα τα στοιχεία του ρεύματος απορροφούνται από έναν καταναλωτή, ανεπιθύμητα στο πλέγμα του δικτύου, να ρέει αποκλειστικά εντός του κυκλώματος του καταναλωτή και της ελεγχόμενης αντισταθμιστικής (προστιθέμενης) πηγής ρεύματος, επομένως δεν φορτώνουν τη γραμμή τροφοδοσίας.
Με αυτόν τον τρόπο τα παράλληλα συστήματα καθιστούν δυνατή:

- για την αντιστάθμιση των αντιδραστικών στοιχείων της θεμελιώδης συχνότητας ρεύματος του καταναλωτή
- για την εξισορρόπηση φορτίων στο πλάι των τερματικών δικτύων και ακόμη και για την αντιστάθμιση ενός αντίθετο στοιχείο του καταναλωτή σε μια μη ισορροπημένη τάση τροφοδοσίας ·
- για φιλτράρισμα αρμονικών υψηλότερου ρεύματος, πρακτικά ανεξάρτητα από την σύνθετη αντίσταση του δικτύου και σε βαθμό που δεν είναι εφικτό για τα αντιδραστικά φίλτρα LC.

Τα παράλληλα ενεργά φίλτρα αποτελούνται γενικά από δύο ξεχωριστά κύρια μέρη:

- Ο μετατροπέας PWM (τροφοδοσία ισχύος)
- Ο ενεργός ελεγκτής φίλτρου (επεξεργασία σήματος)

Ο μετατροπέας PWM είναι υπεύθυνος για τον επεξεργαστή ισχύος στη σύνθεση του αντισταθμιστικού ρεύματος που πρέπει να αντλείται από το σύστημα ισχύος. Ο ενεργός ελεγκτής φίλτρου είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία σήματος για τον καθορισμό σε πραγματικό χρόνο των στιγμιαίων αντισταθμιστικών αναφορών ρεύματος, οι οποίες μεταδίδονται συνεχώς στον μετατροπέα PWM. Το σχήμα 4.4 δείχνει τη βασική διαμόρφωση ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου για αντιστάθμιση αρμονικού ρεύματος ενός συγκεκριμένου φορτίου. Αποτελείται από έναν μετατροπέα τροφοδοσίας τάσης με ελεγκτή ρεύματος PWM και έναν ενεργό ελεγκτή φίλτρου που πραγματοποιεί έναν σχεδόν στιγμιαίο αλγόριθμο ελέγχου. Ο παράλληλος ενεργός ελεγκτής φίλτρου λειτουργεί με κλειστό βρόχο, ανιχνεύοντας συνεχώς το ρεύμα φορτίου i_L και υπολογίζοντας τις στιγμιαίες τιμές του αντισταθμιστικού ρεύματος i_C^* για τον μετατροπέα PWM. Σε μια ιδανική περίπτωση, ο μετατροπέας PWM μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμικός ενισχυτής ισχύος, όπου το τρέχον αντισταθμιστικό i_C παρακολουθεί σωστά την αναφορά του i_C^*. Ο μετατροπέας PWM πρέπει να έχει υψηλή συχνότητα μεταγωγής (f_{PWM}) προκειμένου να αναπαράγει με ακρίβεια τα ανταγωνιστικά ρεύματα. Κανονικά, $f_{PWM} > 10 f_{hmax}$, όπου το f_{hmax} αντιπροσωπεύει τη συχνότητα της υψηλότερης τάξης αρμονικού ρεύματος που πρόκειται να αντισταθμιστεί. Στο σχήμα 4.4 ο πυκνωτής dc και το IGBT (διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης) με αντιπαράλληλη δίοδο χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ένα παράλληλο ενεργό φίλτρο που δημιουργείται από έναν μετατροπέα πηγής τάσης (VCS). Στην πραγματικότητα, μετατροπείς πηγής τάσης ή μετατροπείς ρεύματος-πηγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παράλληλα ενεργά φίλτρα στην εμπορική λειτουργία χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής τάσης.



Σχήμα 4.4:Βασική Διαμόρφωση παράλληλου ενεργού φίλτρου

Μετατροπείς PWM για παράλληλα ενεργά φίλτρα

Υπάρχουν δύο τύποι τριφασικών μετατροπέων για την εφαρμογή παράλληλων ενεργών φίλτρων:

- Το κάλυμμα πηγής τάσης (VSC)
- Ο μετατροπέας ρεύματος-πηγής (CSC)

Οι σχετικοί ελεγκτές ρεύματος PWM κάθε μετατροπέα έχουν διαφορετικά σχέδια. Ωστόσο, και οι δύο ελεγκτές PWM έχουν την ίδια λειτουργικότητα: Να αναγκάσει τον μετατροπέα να συμπεριφέρεται ως ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει τροφοδοσία, μόνο ένα στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο στην πλευρά dc των μετατροπέων. Ο λόγος είναι ότι η κύρια λειτουργία ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου είναι να συμπεριφέρεται ως αντισταθμιστής. Με άλλα λόγια, η «μέση ενέργεια» που ανταλλάσσεται μεταξύ του ενεργού φίλτρου και του συστήματος ισχύος πρέπει να είναι μηδέν. Επιπλέον, ο ενεργός ελεγκτής φίλτρου θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος για να διατηρεί σταθερή τη μέση τάση dc του VSC ή το μέσο ρεύμα dc του CSC, και θα πρέπει να αναγκάζει την παροχή ρεύματος να παρέχει τις απώλειες στο μετατροπέα ισχύος.

Μερικές φορές, είναι βολικό να εφαρμόζετε τριφασικά ενεργά φίλτρα χρησιμοποιώντας τρεις μονοφασικούς μετατροπείς αντί για έναν μονοφασικό μετατροπέα. Ωστόσο, για να αντισταθμιστεί η τριφασική στιγμιαία άεργος ισχύς χωρίς την ανάγκη για στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία χωρητικότητα ενός συνεχούς ρεύματος στην περίπτωση χρήσης VSC ή μια μονή επαγωγή DC στην περίπτωση χρήσης CSC οι τρεις μονοφασικοί μετατροπείς που συνδέονται παράλληλα με αυτό.

Επιπλέον, η μονάδα IGBT που είναι τώρα διαθέσιμη στην αγορά είναι πιο κατάλληλη για τον μετατροπέα PWM πηγής τάσης, επειδή μια δίοδος ελεύθερης περιστροφής συνδέεται με αντιπαραλληλικό τρόπο με κάθε IGBT. Αυτό σημαίνει ότι το IGBT δεν χρειάζεται να παρέχει τη δυνατότητα αποκλεισμού της αντίστροφης τάσης από μόνη της, φέρνοντας έτσι μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό της συσκευής σε συμβιβασμό μεταξύ απώλειας αγωγής και μεταγωγής και δυνατότητας βραχυκυκλώματος από το IGBT αντίστροφης φραγής. Από την άλλη πλευρά, ο μετατροπέας PWM πηγής-ρεύματος απαιτεί είτε σύνδεση σειράς ενός παραδοσιακού IGBT και δίοδο αντίστροφης φραγής, είτε το IGBT αντίστροφης φραγής που οδηγεί σε πιο περίπλοκο σχεδιασμό και κατασκευή συσκευών και ελαφρώς χειρότερα χαρακτηριστικά συσκευής από το παραδοσιακό IGBT χωρίς δυνατότητα αντίστροφης φραγής. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλα τα ενεργά φίλτρα που έχουν τεθεί σε πρακτικές εφαρμογές έχουν υιοθετήσει τον μετατροπέα PWM πηγής τάσης εξοπλισμένο με τον πυκνωτή dc ως κύκλωμα ισχύος.

Ενεργοί ελεγκτές φίλτρων

Ο αλγόριθμος ελέγχου που εφαρμόζεται στον ελεγκτή του παράλληλου ενεργού φίλτρου καθορίζει τα χαρακτηριστικά αντιστάθμισης του παράλληλου ενεργού φίλτρου. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να σχεδιάσετε έναν αλγόριθμο ελέγχου για ενεργό φιλτράρισμα. Βεβαίως, η θεωρία p-q αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική βάση για τον καθορισμό ενεργών ελεγκτών φίλτρων.
Ο σχεδιασμός του ελεγκτή είναι ιδιαίτερα δύσκολος εάν το ενεργό φίλτρο διακλάδωσης εφαρμόζεται σε συστήματα ισχύος στα οποία η ίδια η τάση τροφοδοσίας έχει ήδη παραμορφωθεί και είναι μη ισορροπημένη. Οι γενικές εκφράσεις της θεωρίας p-q δείχνουν ότι είναι αδύνατο να αντισταθμιστεί το ρεύμα φορτίου και να αναγκάσει το αντισταθμισμένο ρεύμα πηγής να ικανοποιεί ταυτόχρονα τα ακόλουθα τρία «βέλτιστα» χαρακτηριστικά αντιστάθμισης εάν το σύστημα ισχύος περιέχει αρμονικές τάσης και ανισορροπίες στη θεμελιώδη συχνότητα:

- Σχεδιασμός μιας σταθερής στιγμιαίας ενεργής ισχύς από την πηγή

- Σχεδιασμός ενός ημιτονοειδές ρεύματος από την πηγή

- Σχεδιασμός της ελάχιστης τιμή rms του ρεύματος πηγής που μεταφέρει την ίδια ενέργεια στο φορτίο με ελάχιστες απώλειες κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι οι πηγές έχουν τρέχουσες κυματομορφές ανάλογες με τις αντίστοιχες τάσεις

Κάτω από τρεις φάσεις ημιτονοειδούς ισορροπημένης τάσης, είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα τα τρία βέλτιστα χαρακτηριστικά αντιστάθμισης που δίνονται παραπάνω. Ωστόσο, κάτω από μη ημιτονοειδείς και μη ισορροπημένες τάσεις συστήματος, το παράλληλο ενεργό φίλτρο μπορεί να αντισταθμίσει τα ρεύματα φορτίου για να εγγυηθεί μόνο ένα βέλτιστο χαρακτηριστικό αντιστάθμισης. Επομένως, πρέπει να γίνει επιλογή πριν από το σχεδιασμό του μηχανισμού ελέγχου ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου. Αυτός είναι ο λόγος για την εξαγωγή τριών διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου:

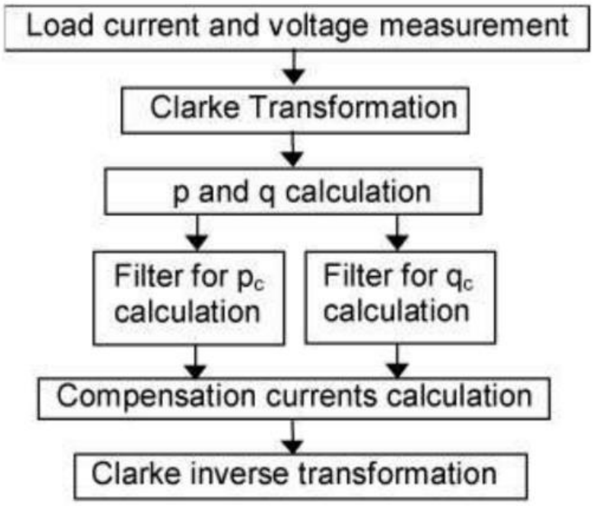
- Σταθερή στρατηγική στιγμιαίας ισχύος
- Στρατηγική ημιτονοειδούς ελέγχου ρεύματος
- Γενική στρατηγική ελέγχου Fryze

Κάτω από ημιτονοειδείς, ισορροπημένες τάσεις συστήματος, οι τρεις στρατηγικές ελέγχου μπορούν να παράγουν τα ίδια αποτελέσματα. Ωστόσο, υπό μη ημιτονοειδείς και μη ισορροπημένες τάσεις συστήματος,
κάθε στρατηγική ελέγχου εγγυάται το αντίστοιχο χαρακτηριστικό αντιστάθμισης. Ως εκ τούτου, τα προκύπτοντα αντισταθμιζόμενα ρεύματα πηγής είναι διαφορετικά.

Η θεωρία p-q στα παράλληλα ενεργά φίλτρα

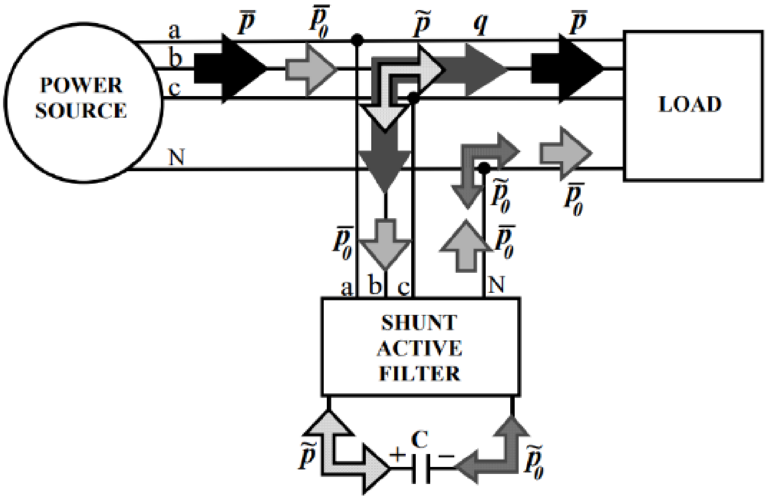
Η θεωρία p-q είναι μία από τις πολλές μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ενεργά φίλτρα ελέγχου. Παρουσιάζει μερικά
ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, δηλαδή:

- Είναι εγγενώς μια τριφασική θεωρία συστήματος.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τριφασικό σύστημα (ισορροπημένο ή μη ισορροπημένο, με ή χωρίς αρμονικές και στα δύο
- τάσεις και ρεύματα)
- Βασίζεται σε στιγμιαίες τιμές, επιτρέποντας εξαιρετική δυναμική απόκριση.
- Οι υπολογισμοί του είναι σχετικά απλοί (περιλαμβάνει μόνο αλγεβρικές εκφράσεις που μπορούν να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας τυπικούς επεξεργαστές)
- Επιτρέπει δύο στρατηγικές ελέγχου: σταθερή στιγμιαία ισχύ τροφοδοσίας και ημιτονοειδές ρεύμα τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.5: Βασικός αλγόριθμος ελέγχου για παράλληλο ενεργό φίλτρο ισχύος βασισμένο στη θεωρία p-q

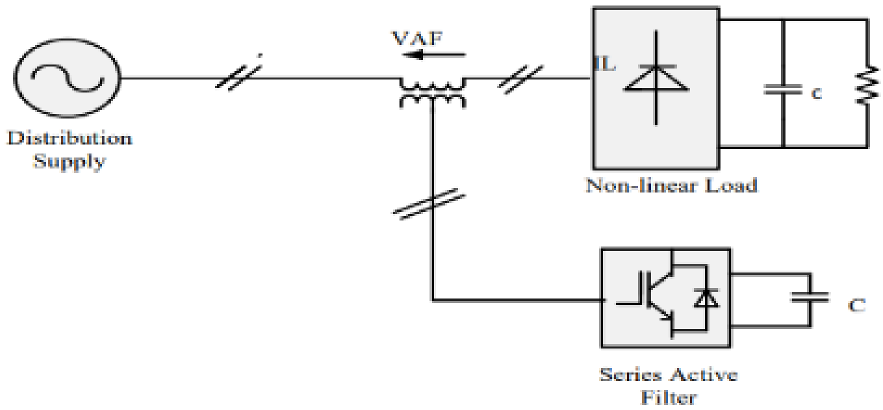
Όπως είδαμε προηγουμένως στο κεφάλαιο 3, το p είναι συνήθως το μόνο επιθυμητό συστατικό της θεωρίας p-q. Οι άλλες ποσότητες μπορεί να αντισταθμίζονται χρησιμοποιώντας ένα παράλληλο ενεργό φίλτρο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Το $\overline{p}_0$μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς την ανάγκη παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στο παράλληλο ενεργό φίλτρο. Αυτή η ποσότητα παραδίδεται από την τροφοδοσία στο φορτίο, μέσω του ενεργού φίλτρου. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που μεταφέρθηκε προηγουμένως από την πηγή στο φορτίο μέσω των στοιχείων μηδενικής ακολουθίας τάσης και ρεύματος, παραδίδεται τώρα με ισορροπημένο τρόπο από την πηγή φάσεων. Είναι επίσης δυνατό να συμπεράνουμε από το Σχήμα 4.6 ότι ο πυκνωτής ενεργού φίλτρου είναι απαραίτητος μόνο για την αντιστάθμιση $\tilde{p}$και $\tilde{p}_0$, δεδομένου ότι αυτές οι ποσότητες πρέπει να αποθηκευτούν σε αυτό το στοιχείο σε μια στιγμή για να παραδοθούν αργότερα στο φορτίο. Η στιγμιαία φανταστική ισχύς (q), η οποία περιλαμβάνει τη συμβατική άεργη ισχύ, αντισταθμίζεται χωρίς τη συνεισφορά του πυκνωτή. Αυτό σημαίνει ότι, το μέγεθος του πυκνωτή δεν εξαρτάται από την ποσότητα άεργου ισχύος για αντιστάθμιση.



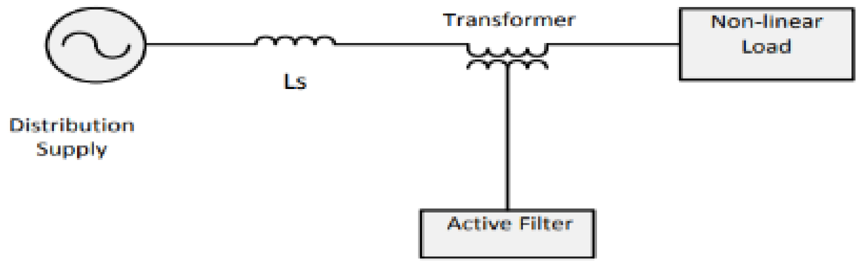
Σχήμα 4.6:Αντιστάθμιση στα στοιχεία ισχύος της θεωρίας p-q σε συντεταγμένες a-b-c σε παράλληλο ενεργό φίλτρο

4.2.2 Ενεργά φίλτρα σε σειρά

Τα Ενεργά φίλτρα σε σειρά συνδέονται σε σειρά με τη χρησιμότητα ενός αντίστοιχου μετασχηματιστή. Κανονικά, το σε σειρά ενεργό φίλτρο είναι κατάλληλο για αρμονική αντιστάθμιση μιας αρμονικής πηγής τάσης όπως ο ανορθωτής διόδων με έναν πυκνωτή σύνδεσης DC. Γενικά, τα σε σειρά ενεργά φίλτρα χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά σε σχέση με τα παράλληλα ενεργά φίλτρα. Σε αντίθεση με το παράλληλο ενεργό φίλτρο που μεταφέρει κυρίως ρεύμα αντιστάθμισης, το κύκλωμα σειράς πρέπει να χειρίζεται ρεύματα υψηλού φορτίου. Αυτό προκαλεί αυξημένη εκτίμηση του φίλτρου που το κάνει κατάλληλο για μεταφορά του αυξημένου ρεύματος. Στο Σχήμα 4.7 και 4.8 δείχνει τη διαμόρφωση του συστήματος ενεργού φίλτρου σειράς.



Σχήμα 4.7: Ενεργό φίλτρο σε σειρά



Σχήμα 4.8: Διαμόρφωση δικτύου σε σειρά ενεργό φίλτρο

Το διάγραμμα του φίλτρου ενεργού ισχύος σειράς αποτελείται από τριφασική τροφοδοσία, σειρά ενεργού φίλτρου ισχύος και μη γραμμικό φορτίο. Τα τριφασικά συστήματα ισχύος έχουν τουλάχιστον τρεις αγωγούς που μεταφέρουν τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος που αντισταθμίζονται εγκαίρως από το ένα τρίτο της περιόδου. Το τριφασικό σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί σε διάταξη δέλτα ή αστέρι. Το σύστημα αστέρα επιτρέπει τη χρήση δύο διαφορετικών τάσεων σε όλες τις τρείς φάσεις , όπως ένα σύστημα 230/400 v που παρέχει 230 v μεταξύ της ουδέτερης και οποιασδήποτε από τις φάσεις, και 400 v σε οποιεσδήποτε δύο φάσεις. Ένα σύστημα δέλτα παρέχει μία τάση μεγέθους, ωστόσο έχει μεγαλύτερη πλεονασματικότητα όσο μπορεί συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά με μία από τις τρεις τροφοδοσίες συλλέγοντας εκτός σύνδεσης, τα ρεύματα αρμονικών σε ουδέτερο μπορεί να γίνονται πολύ μεγάλοι εάν συνδέονται σε μη γραμμικά φορτία. Σε αυτά λόγω του μη γραμμικού φορτίου, το φορτίο τάσης και ρεύματος μπορεί να παραμορφωθούν , επομένως είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν οι παραμορφώσεις ως εκ τούτου, το φίλτρο ενεργού ισχύος της σειράς είναι συνδεδεμένο στη πλευρά της πηγής που φαίνεται στο σχήμα. παραπάνω.

Το σειριακό ενεργό φίλτρο ισχύος εισάγει το στοιχείο τάσης των αρμονικών σε σειρά με την τάση τροφοδοσίας. Για να αντισταθμίσει τις αρμονικές και διατηρώντας το τροφοδοτικό. Για την απαίτηση βελτίωσης της αρμονικής αντιστάθμισης, βελτίωση του συντελεστή ισχύος και μείωση του μεγέθους ενός φίλτρου ενεργού ισχύος, ένα φίλτρο ενεργού ισχύος σειράς χρησιμοποιείται. Το ενεργό φίλτρο ισχύος είναι οικονομικά αποδοτικό και εύκολο στη εφαρμογή. Ένα φορτίο θεωρείται μη γραμμικό εάν η αντίσταση του αλλάζει με την εφαρμοζόμενη τάση. Η μεταβαλλόμενη αντίσταση σημαίνει ότι το ρεύμα που αντλείται από το μη γραμμικό φορτίο δεν θα να είναι ημιτονοειδές ακόμα και όταν συνδέεται με ημιτονοειδές τάση. Αυτά τα μη ημιτονοειδή ρεύματα περιέχουν αρμονικά ρεύματα που αλληλεπιδρούν με την σύνθετη αντίσταση της δύναμης διανομής για τη δημιουργία παραμόρφωσης τάσης που μπορεί επηρεάζουν τόσο τον εξοπλισμό του συστήματος διανομής όσο και τα φορτία συνδεδεμένο με αυτό. Στο παρελθόν, τα μη γραμμικά φορτία κυρίως είχαν βρεθεί σε βαριές βιομηχανικές εφαρμογές όπως καμίνους τόξου, μεγάλες μονάδες μεταβλητής συχνότητας (VFD), βαριές ανορθωτές για ηλεκτρολυτική διύλιση κ.λπ.

Τα ενεργά φίλτρα σε σειρά συνίσταται στο ότι στο σύστημα τροφοδοσίας μια πρόσθετη ελεγχόμενη πηγή προστιθέμενης τάσης (ένα σειριακό φίλτρο ενεργής ισχύος τάσης) συνδέεται εν σειρά στην πηγή τάσης. Το καύσιμο της τάσης πηγής και εκείνου του συστήματος φιλτραρίσματος, μειωμένο από την πτώση τάσης στην αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας, είναι η τάση του καταναλωτή. Μια καθορισμένη τιμή μπορεί να προσδιοριστεί αφαιρώντας μια σχετική τιμή της ιδανικής ημιτονοειδούς τάσης τροφοδοσίας από εκείνη της παραμορφωμένης τάσης που μετράται σε έναν εξεταζόμενο μετατροπέα.

Το σειριακό ενεργό φίλτρο αποτελείται από τέσσερις συνδέσμους που καθιστούν δυνατή τη διαμόρφωση του πλάτους παλμού σε 100%.
Τα σειριακά ενεργά φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- για την αντιστάθμιση των πτώσεων τάσης στην αντίδραση της γραμμής τροφοδοσίας.
- για εξισορρόπηση και ρύθμιση της τάσης σε μια γραμμή τροφοδοσίας
- να φιλτράρει αρμονικές τάσης στους τερματικούς σταθμούς του καταναλωτή, που παράγονται από μια δεδομένη πηγή τάσης και έναν καταναλωτή.
- να χρησιμεύσει ακόμη και ως μετατοπιστής φάσης.

Ένα σημαντικό πρόβλημα των διαδικασιών παράλληλου και σειριακού ενεργού φιλτραρίσματος είναι ο διαχωρισμός των απαιτούμενων τυπικών κυματομορφών που αντισταθμίζουν τα ρεύματα και τις τάσεις. Οι κυματομορφές διαμορφώνονται στις εξόδους των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που λειτουργούν ως συστήματα APF. Η αλληλεπίδραση της προστιθέμενης τάσης ή και του ρεύματος, με, αντίστοιχα, την τάση (τα αποτελέσματα αντίστασης του δικτύου παραμελούνται) ή και το ρεύμα, προκαλεί την προαναφερθείσα ανταλλαγή της ενεργού ισχύος μεταξύ του APF σύστημα και σύστημα παροχής. Ένα μέρος της σπατάλης ισχύος σχετίζεται με πτώσεις τάσης στα στοιχεία του συστήματος (π.χ. ημιαγωγοί) και ένα άλλο μέρος συνδέεται με απώλειες κατά την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των στοιχείων ημιαγωγών. Οι απώλειες εναλλαγής κυριαρχούν συνήθως στα ενεργά φίλτρα και εξαρτώνται σε άμεση αναλογία από τη συχνότητα λειτουργίας εναλλαγής των συσκευών εναλλαγής. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο πιο πιθανή αντιστάθμιση των γρήγορων στρεβλώσεων. Στην πράξη, συνήθως αναζητείται ένας συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας αντιστάθμισης και απώλειας ισχύος σε ένα σύστημα.

Τα παράλληλα φίλτρα έχουν διαστάσεις με βάση τις τιμές rms των υψηλότερων αρμονικών προς αντιστάθμιση. Στην περίπτωση των σειριακών φίλτρων ολόκληρη η ισχύς του καταναλωτή ρέει μέσω του φίλτρου, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες ισχύος, επομένως θα πρέπει να εγκατασταθεί μεγαλύτερη ισχύς. Εάν ένα φίλτρο εφαρμόζεται σε μετατροπείς με πολύ υψηλή ανενεργή ισχύ (π.χ. ατμούς τόξου υψηλής ισχύος), τότε οι απώλειες ισχύος στα παράλληλακαι τα σειριακά συστήματα είναι συγκρίσιμα.

Το αρχικό και λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση ενός ενεργού φίλτρου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Η τελική τιμή ενός φίλτρου προκύπτει από τις τιμές των εξαρτημάτων του και της καταναλισκόμενης εργασίας. Στο ενεργό φίλτρο μπορούν να διακριθούν τέσσερις ομάδες εξαρτημάτων, συγκεκριμένα:
παθητικά στοιχεία (πυκνωτές, Επαγωγικές αντιδράσεις), συνδετήρες ισχύος ημιαγωγών(lGBT, GTO), ηλεκτρονικές συσκευές ελέγχου και μέτρησης (μικροεπεξεργαστής) και βοηθητικά στοιχεία. Κατά τη σύγκριση των τιμών των συγκεκριμένων ομάδων των στοιχείων τους πρέπει να ληφθούν υπόψη τα επίπεδα ισχύος και τάσης. Το κόστος του ηλεκτρονικού ελέγχου & οι συσκευές μέτρησης καθώς και το κόστος εργασίας έχουν σημαντικό μερίδιο στην τελική τιμή μόνο στα φίλτρα χαμηλής ισχύος (έως 10 kW).

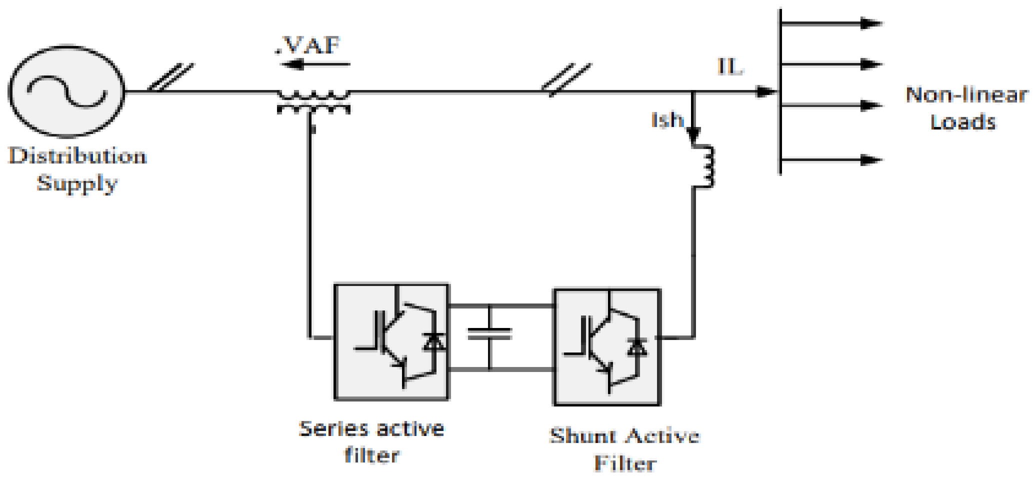
Για συστήματα χαμηλής τάσης (έως 0,4 kV), μεσαίας ισχύος (έως περίπου 250 kW) οι σύνδεσμοι ισχύος ημιαγωγών αποφασίζουν για τη συνολική τιμή των συστημάτων.

Για τα συστήματα μεσαίας τάσης υψηλής ισχύος (έως μερικά MW), η τιμή των παθητικών και βοηθητικών στοιχείων είναι πολύ σημαντική, εκτός από την τιμή των ημιαγωγών.

Σήμερα, λόγω της ταχέως αναπτυσσόμενης τεχνολογίας των στοιχείων ισχύος ημιαγωγών, καθώς και η υπολογιστική τεχνική του μικροεπεξεργαστή, είναι δυνατή η κατασκευή ενεργών φίλτρων ικανών να εξαλείψουν κάθε είδους παραμόρφωση. Το μόνο πρόβλημα είναι να βρείτε τη πιο βέλτιστη σχέση μεταξύ του κόστους ενός φίλτρου (αρχικό και λειτουργικό) και τις επιπτώσεις της λειτουργίας του.

4.2.3 Συνδυασμός παράλληλων και σε σειρά ενεργών φίλτρων(Unified Power-Quality Conditioner)

Αποτελείται από παράλληλα και σε σειρά ενεργά φίλτρα. Η λειτουργία των σε σειρά ενεργών φίλτρων είναι να απομονώσει τις αρμονικές τάσης μεταξύ της πηγής και του φορτίου. Επιπλέον, ρυθμίζει τη τάση και αντισταθμίζει τις μεταβατικές διαταραχές και τις ανισορροπίες τάσης PCC. Ο στόχος του παράλληλου ενεργού φίλτρου είναι να αντισταθμίσει τις αρμονικές του φορτίου-ρεύματος, του άεργου ρεύματος και των μη ισορροπημένων ρευμάτων. Το Σχήμα 4.9 δείχνει τη διαμόρφωση δικτύου του UPQC.



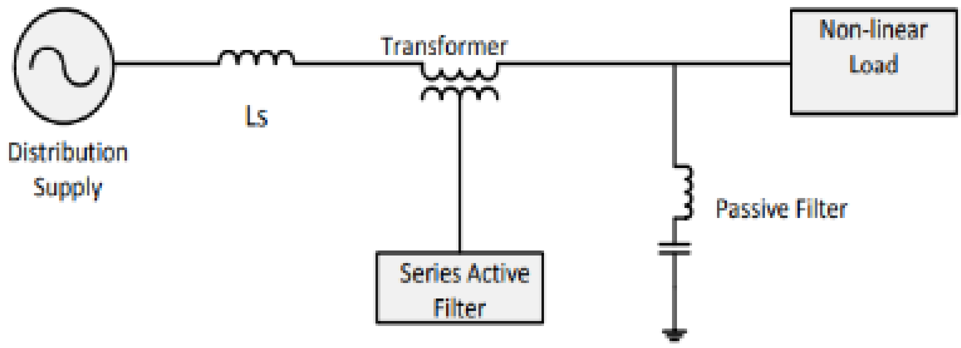
Σχήμα 4.9: Διαμόρφωση δικτύου UPQC

4.2.4 Υβριδικά φίλτρα

Ένας άλλος τύπος φίλτρου είναι τα υβριδικά (ενεργά-παθητικά) φίλτρα. Το υβριδικό φίλτρο αποτελείται από το συνδυασμό του ενεργού και του παθητικού φίλτρου για να αποδίδουν καλύτερα. Ο συνδυασμός μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους, για παράδειγμα ο συνδυασμός παράλληλου ενεργού φίλτρου και παράλληλου παθητικού φίλτρου, ή ο συνδυασμός σειράς ενεργού φίλτρου και παράλληλου παθητικού φίλτρου ή συνδυασμός ενεργού φίλτρου συνδεδεμένου σε σειρά με παράλληλου παθητικού φίλτρου και πολλά άλλα. Κάθε ένας από αυτούς τους συνδυασμούς έχει διαφορετική απόδοση. Ωστόσο, συνδυασμός παράλληλου ενεργού φίλτρου και παράλληλου παθητικού φίλτρου είναι πιο εμπορικός και περισσότερο κοινά χρησιμοποιημένος. Το σειριακό ενεργό φίλτρο και παράλληλο παθητικό φίλτρο χρησιμοποιείται συνήθως για δοκιμές.

Συνδυασμός ενεργών φίλτρων σειράς και παράλληλων παθητικών φίλτρων

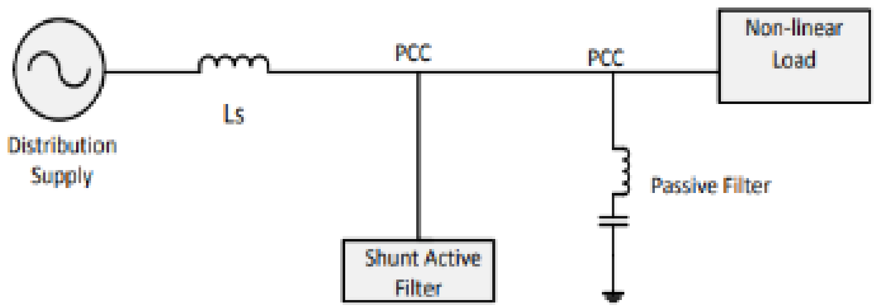
Ο συνδυασμός σειρών και παράλληλων ενεργών φίλτρων UPQC είναι πολύ περίπλοκος στον έλεγχο ο οποίος έχει και υψηλό κόστος. Μια μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι να αντικατασταθεί το παράλληλο ενεργό φίλτρο με παράλληλο παθητικό φίλτρο , καθώς τα παθητικά φίλτρα είναι πολύ απλά στην εφαρμογή τους και δεν απαιτούν κανένα κύκλωμα ελέγχου. Έτσι, η λύση γίνεται πολύ οικονομική. Το σειριακό ενεργό φίλτρο, το οποίο αποτελεί υψηλή σύνθετη αντίσταση για αρμονικές υψηλής συχνότητας, είναι συνοδευόμενο από παράλληλο παθητικό φίλτρο για να παρέχει μια διαδρομή για τα αρμονικά ρεύματα του φορτίου. Το Σχήμα 4.10 δείχνει τον πιθανό συνδυασμό ενεργών φίλτρων σειράς και παράλληλων παθητικών φίλτρων.



Σχήμα 4.10: Συνδυασμός ενεργού φίλτρου σε σειρά με παράλληλο παθητικό φίλτρο

Συνδυασμός παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων

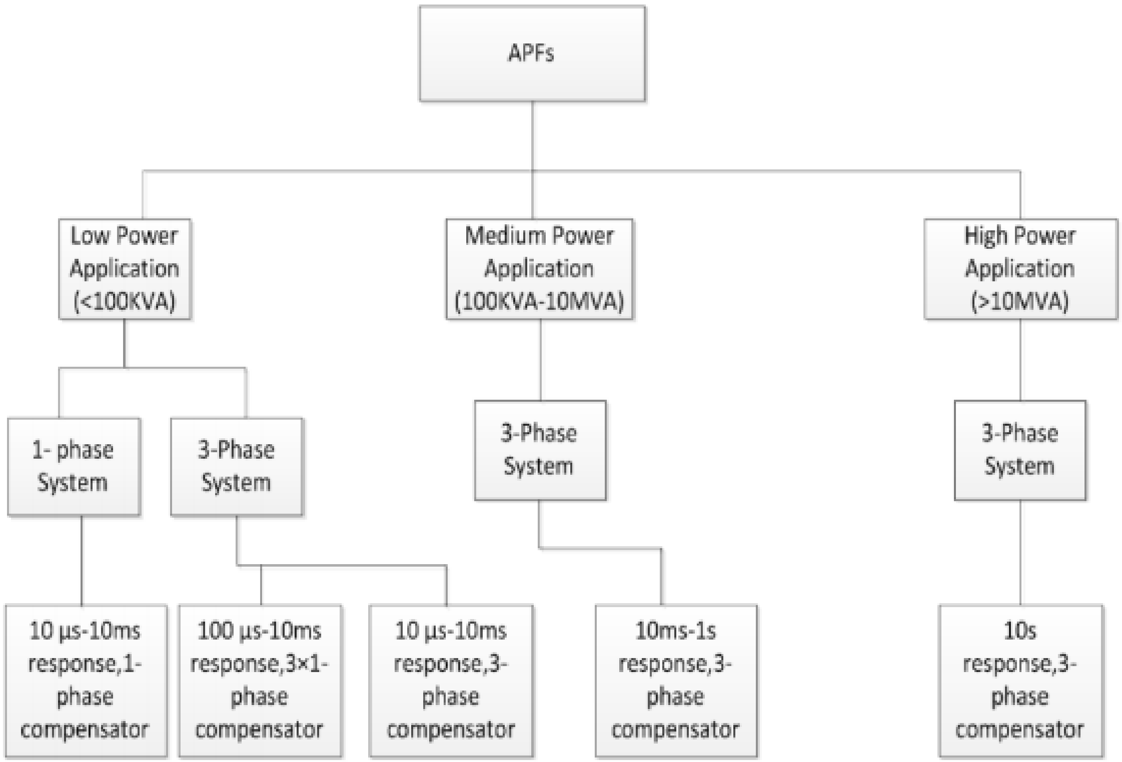
Τα παράλληλα φίλτρα είναι τα καλύτερα κατάλληλα για την αντιστάθμιση αρμονικών χαμηλότερης τάξης και τα κάνει πολύ οικονομικά σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Η διαμόρφωση των παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων χρησιμοποιούν τη χρήση του παράλληλου παθητικού φίλτρου για την αντιστάθμιση των αρμονικών υψηλής τάξης. Το Σχήμα 4.11 δείχνει τη διαμόρφωση του συνδυασμού παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων



Σχήμα 4.11: Συνδυασμός παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων

4.3 Είδη ενεργών φίλτρων με βάση την εκτίμηση ισχύος και την ταχύτητα απόκρισης στο αντισταθμισμένο σύστημα

Το μέγεθος των μη γραμμικών φορτίων παίζει σημαντικό ρόλο στη λήψη αποφάσεων για την εφαρμογή των στρατηγικών ελέγχου των ενεργών φίλτρων. Το φίλτρο που απαιτείται για την αντιστάθμιση πρέπει να είναι πρακτικό για το φορτίο και αυτό επηρεάζει την ταχύτητα απόκρισης. Το διάγραμμα στο σχήμα 4.12 δείχνει την ταξινόμηση των APF σύμφωνα με την ισχύ ισχύος και την ταχύτητα απόκρισης των φίλτρων.



Σχήμα 4.12: Ταξινόμηση των ενεργών φίλτρων με βάση την ισχύ ισχύος και την ταχύτητα απόκρισης

4.3.1 Εφαρμογές χαμηλής ισχύος

Τα APF αυτής της κατηγορίας έχουν τιμές ισχύος κάτω από 100kVA. Αυτά τα APFs χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατοικημένες περιοχές, εμπορικά κτίρια νοσοκομεία και για μεσαίου μεγέθους εργοστασιακά φορτία και για συστήματα κινητήρων. Τα APF για αυτό το εύρος ισχύος χρησιμοποιούν εξελιγμένες τεχνικές με μεγάλων αριθμό παλμών PWM και μετατροπείς τάσης ή ρεύματος. Ο χρόνος απόκρισης για τις μικρότερες εφαρμογές είναι σχετικά πολύ ταχύτερη από το εύρος υψηλής ισχύος και βρίσκεται στο εύρος των μικροδευτερολέπτων έως δέκα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Αποτελείται από μονοφασικό και τριφασικό σύστημα.

4.3.2 Εφαρμογές μεσαίας ισχύος

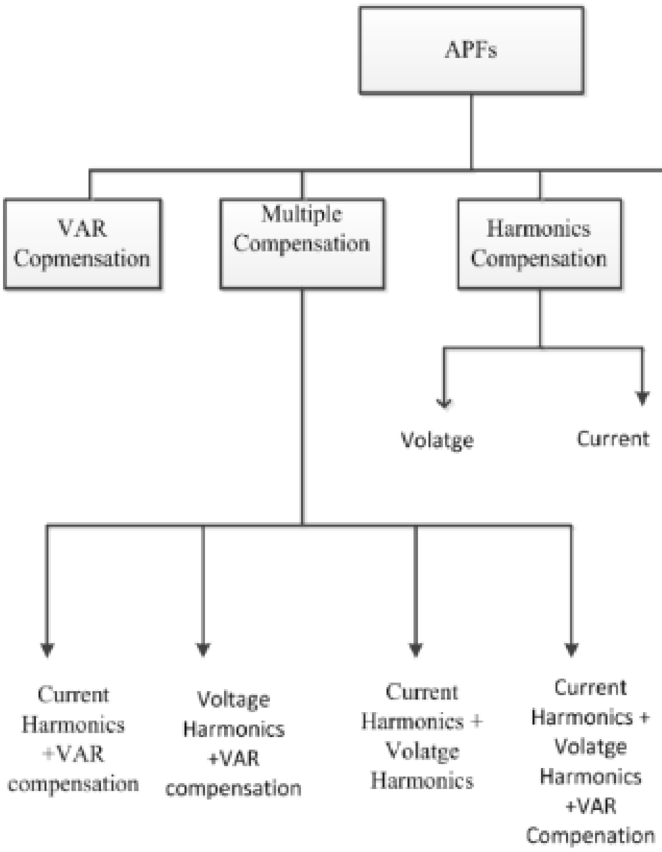
Τα συστήματα ισχύος με τιμές ισχύος στην περιοχή των 100kVA-10MVA εμπίπτουν στην κατηγορία μεσαίας ισχύος. Ο κύριος στόχος είναι η εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος ως αντίκτυπο η ανισορροπία της φάσης είναι μικρότερη. Η ταχύτητα απόκρισης αυτού του εύρους εφαρμογής είναι η σειρά δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου.

4.3.3 Εφαρμογές υψηλής ισχύος

Τα συστήματα ισχύος με τιμές ισχύος άνω των 10MVA εμπίπτουν στην κατηγορία υψηλής ισχύος εφαρμογές. Ο απαιτούμενος χρόνος απόκρισης για αυτήν την περίπτωση είναι στο εύρος των δεκάδων δευτερολέπτων, το οποίο αρκεί για τη λειτουργία των επαφέων και των διακοπτών μετά τη λήψη της βέλτιστης εναλλαγής απόφασης. Οι διακυμάνσεις ισχύος στο εύρος μερικών δευτερολέπτων, από την άλλη πλευρά, αντιμετωπίζονται από τις βοηθητικές συσκευές των σταθμών παραγωγής.

4.4 Είδη ενεργών φίλτρων με βάση τις αντισταθμισμένες μεταβλητές

Η σχεδιαστική λειτουργικότητα των ενεργών φίλτρων είναι να παρέχει κατάλληλη αντιστάθμιση για μία συγκεκριμένη μεταβλητή ή πολλαπλές μεταβλητές. Το Σχήμα 4.13 δείχνει την ποικιλία των αντισταθμιζόμενων μεταβλητών που τα APF μπορούν να παρέχουν.



Σχήμα 4.13: Υποδιαίρεση των ενεργών φίλτρων βάσει αντισταθμισμένων μεταβλητών

4.4.1 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος

Τα παράλληλα ενεργά φίλτρα παρέχουν την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος, αλλά σπάνια χρησιμοποιούνται για το πρόβλημα διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Όταν επιθυμείτε αντιστάθμιση άεργου ισχύος, χαμηλού εφαρμογές ισχύος είναι πιο κατάλληλες, δεδομένου ότι το ρεύμα που απαιτείται για άεργη ισχύ
η αντιστάθμιση είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το ονομαστικό ρεύμα του φορτίου.

4.4.2 Αντιστάθμιση αρμονικών

Η εξαγωγή αρμονικών είναι η πιο σημαντική μεταβλητή που απαιτείται κατά την αντιστάθμιση. Τα APF χρησιμοποιούνται για την παροχή αντιστάθμισης αρμονικών έναντι αρμονικών τάσης και ρεύματος. Οι αρμονικές τάσης σχετίζονται με τις τρέχουσες αρμονικές και την αντίσταση της γραμμής. Γενικά, στο PCC εφαρμόζονται αυστηρά πρότυπα για τη διατήρηση ενός καθορισμένου επιπέδου THD έτσι ώστε η ρύθμιση τάσης να διατηρηθεί. Το πρόβλημα της αντιστάθμισης αρμονικών είναι να εξασφαλίσει ότι η παροχή θα είναι καθαρά ημιτονοειδής που είναι σημαντικό για το σύστημα τροφοδοσίας στις συσκευές προστασίας. Αν και η αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης συμβάλλει στη μείωση στις αρμονικές ρεύματος, αυτό ωστόσο, δεν αναιρεί την ανάγκη για τρέχουσα αρμονική αντιστάθμιση. Αν και οι τρέχουσες αρμονικές μειώνονται σημαντικά από την αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης, αλλά η αντιστάθμιση τους σύμφωνα με καθορισμένα πρότυπα είναι απαραίτητη, διότι ακριβώς δεν επηρεάζει τις απώλειες θέρμανσης των γραμμών, των συσκευών και του χρόνου ζωής τους, αλλά επίσης επηρεάζει το σχεδιασμό εξοπλισμού συστήματος ισχύος καθώς απαιτούν συγκεκριμένο μέγεθος και σχήμα ρεύματος.

4.4.3 Εξισορρόπηση τριφασικών συστημάτων

Το πρόβλημα της ανισορροπίας τάσης και ρεύματος στο σύστημα διανομής χαμηλής και μέσης τάσης είναι πολύ συνηθισμένο όταν οι τάσεις και τα ρεύματα είτε δεν ισούνται σε μεγέθη είτε οι φάσεις δεν κατανέμονται στους 120 βαθμούς μεταξύ τους αντίστοιχα.

Η ανισορροπία τάσης οφείλεται στην τρέχουσα ανισορροπία που συνδέεται άμεσα με τη γραμμή αντίστασης. Τα APF επιλύουν αυτό το πρόβλημα προσθέτοντας ή αφαιρώντας το αντίστοιχο ποσό στιγμιαία τάσης για να την αναγκάσει στην τάση αναφοράς. Η ίδια στρατηγική εφαρμόζεται για την αντιστάθμιση των τρεχουσών ανισορροπιών όπου ο αντισταθμιστής αναγκάζει το ρεύμα τροφοδοσίας να ακολουθεί το ρεύμα αναφοράς.

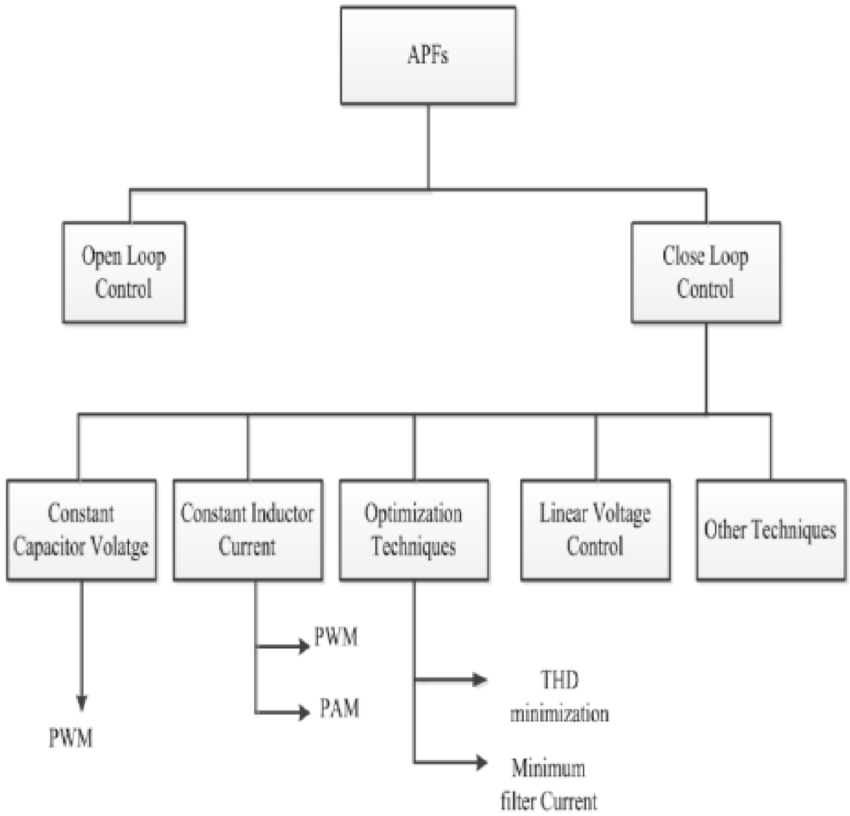
4.4.4 Πολλαπλή αντιστάθμιση

Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των ενεργών φίλτρων συνήθως περισσότερα από ένα αντισταθμιστικές μεταβλητές εφαρμόζονται σε ένα ενεργό φίλτρο. Οι πιο συχνοί χρησιμοποιούμενοι συνδυασμοί αντισταθμιστικών μεταβλητών είναι:

- Αντιστάθμιση ρεύματος και άεργης ισχύος αρμονικής
- Αντιστάθμιση τάσης αρμονικής και άεργου ισχύος
- Ρεύμα και τάσεις αρμονικής
- Αρμονικό ρεύμα και τάσεις με αντιστάθμιση άεργου ισχύος

4.5 Είδη ενεργών φίλτρων με βάση την τεχνική ελέγχου

Σύμφωνα με το σύστημα ελέγχου, οι APF ταξινομούνται ως έλεγχος ανοικτού βρόχου και έλεγχος κλειστού βρόχου ενεργά φίλτρα ισχύος. Το Σχήμα 4.14 δείχνει την ταξινόμηση των APF με βάση το σύστημα έλεγχού.



Σχήμα 4.14: Ταξινόμηση των ενεργών φίλτρων με βάση τις τεχνικές ελέγχ

4.5.1 Ενεργά φίλτρα με σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου

Οι APF που βασίζονται στο σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου ανιχνεύουν το ρεύμα αρμονικού φορτίου και εισαγάγουν ή σχεδιάζουν σταθερή ποσότητα ρεύματος στο σύστημα ισχύος για την αντιστάθμιση των αρμονικών του φορτίου. Όπως και δεν υπάρχει βρόχος ανάδρασης στο σύστημα, δεν υπάρχει αναφορά για έλεγχο της απόδοσης και ακρίβεια του φίλτρου. Αυτή είναι η παλιά τεχνική και δεν χρησιμοποιείται στις μέρες μας.

4.5.2 Ενεργά φίλτρα με σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου

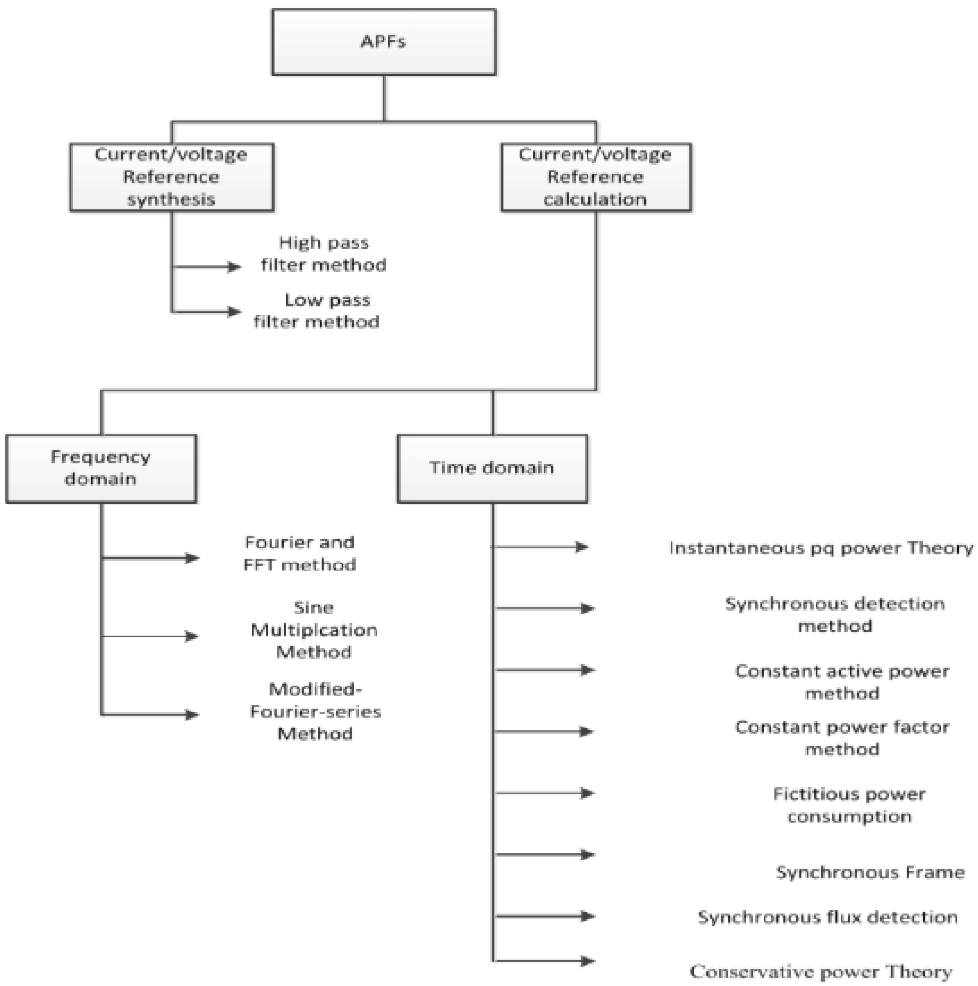
Τα ενεργά φίλτρα που βασίζονται στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου περιέχουν βρόχο ελέγχου ανατροφοδότησης για πραγματική ανίχνευση αντισταθμιστικών μεταβλητών που εξετάζονται για ακρίβεια. Σχεδόν όλα τα μοντέρνα ενεργά φίλτρα χρησιμοποιούν αυτό το στοιχείο ελέγχου.

Οι τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου που απασχολούνται στα ενεργά φίλτρα είναι:

- Σταθερή τάση πυκνωτή
- Σταθερό ρεύμα επαγωγέα
- Τεχνική βελτιστοποίησης σε σχέση με την ελαχιστοποίηση THD και το ελάχιστο ρεύμα φίλτρου
- Γραμμική τάση
- Άλλες τεχνικές που χρειάζονται επεξεργαστή ψηφιακού σήματος (DSP).

4.6 Είδη ενεργών φίλτρων με βάση την τεχνική εκτίμησης αναφοράς ρεύματος/τάσης

Το Σχήμα 4.15 δείχνει την ταξινόμηση των APF με βάση την εκτίμηση το ρεύμα ή την τάση



Σχήμα 4.15: Η ταξινόμηση με βάση στην τεχνική εκτίμησης αναφοράς ρεύματος / τάσης

4.6.1 Σύνθεση αναφοράς ρεύματος/τάσης

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί αναλογικό φίλτρο σήματος στην πλευρά τροφοδοσίας για να προσδιορίσει τις τρέχουσες αρμονικές από την τροφοδοσία. Είναι πολύ απλή τεχνική και εύκολο να εφαρμοστεί, αλλά έχει μεγάλο μειονέκτημα επειδή εισάγει το μέγεθος και το σφάλμα φάσης. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί φίλτρα υψηλής και χαμηλής διέλευσης για εξαγωγή του ρεύματος που περιείχε αρμονικές.

4.6.2 Υπολογισμός αναφοράς ρεύματος/τάσης

Η τεχνική σύνθεσης αναφοράς ρεύματος ή τάσης υφίσταται στα μειονεκτήματα του μεγέθους και σφάλματος φάσης και επίσης με την επίδραση του θορύβου. Ο υπολογισμός των αρμονικών παρέχει την
πιο αποτελεσματική εναλλακτική προσέγγιση. Αυτή η τεχνική διαιρείται περαιτέρω σε τομείς συχνότητας και χρόνου. Η ανάλυση σε τομέα χρόνου είναι ανώτερη από τον τομέα συχνότητας και σε μεγαλύτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια.

Προσεγγίσεις τομέα συχνότητας

Οι μέθοδοι τομέα συχνότητας ταυτίζονται με ανάλυση Fourier, αναδιατάσσονται ώστε να έχουν το αποτελέσματα όσο το δυνατόν γρηγορότερα με μειωμένο αριθμό υπολογισμών που επιτρέπουν εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο σε DSP's. Αυτή η προσέγγιση έχει χαμηλότερη δυναμική απόκριση και δεν χρησιμοποιείται ευρέως.

Ακολουθούν οι προσεγγίσεις τομέα συχνότητας:

- Συμβατικός αλγόριθμος ανάλυσης Fourier και FFT
- Τεχνική πολλαπλασιασμού ημιτόνου
- Τροποποιημένη τεχνική σειρά Fourier

Προσεγγίσεις τομέα χρόνου

Οι μέθοδοι τομέα χρόνου χρησιμοποιούνται όταν η απαιτούμενη ταχύτητα του συστήματος θα είναι υψηλή και όταν έχουν μικρότερο υπολογισμό σε σύγκριση με τον τομέα συχνότητας .

Ακολουθούν οι θεωρίες που χρησιμοποιούνται στον τομέα του χρόνου:

- Στιγμιαία θεωρία P-Q
- Μέθοδος σύγχρονου αλγορίθμου ανίχνευσης
- Αλγόριθμος σταθερής ενεργού ισχύος
- Αλγόριθμος σταθερού συντελεστή ισχύος
- Αλγόριθμος αποζημίωσης εικονικής ισχύος
- Σύγχρονος αλγόριθμος βάσει πλαισίου
- Αλγόριθμος Σύγχρονης Ανίχνευσης Ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ανησυχία και οι οδηγίες του ΙΜΟ και της ΕΕ για πιο πράσινες μεταφορές, έχουν κάνει πλοία αλλά και λιμάνια να ολοκληρώσουν τις αποστολές τους με πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, ορισμένες εργασίες μετεξοπλισμού πρέπει να πραγματοποιηθούν στα πλοία όπως η εγκατάσταση των ακόλουθων εξοπλισμών:

- σύστημα επεξεργασίας νερού έρματος (BWTS)
- συστήματα καθαρισμού καυσαερίων («scrubbers») για τη μείωση των εκπομπών
- τροφοδοσία ρεύματος από ξηρά («Cold Ironing»)
- αντικατάσταση φωτιστικών φωτός από μοντέρνα τεχνολογίας LED

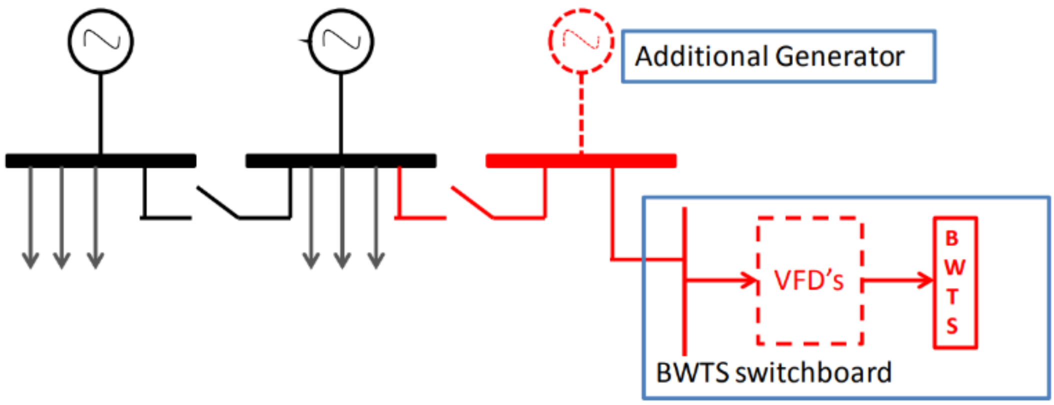
Εκτός από τυχόν προβλήματα στην απόκτηση επιπλέον χώρου στο πλοίο και στην εκπλήρωση όλων των απαιτήσεων ασφαλείας από άποψη ενέργειας, αυτές οι προκλήσεις συνίστανται καλύπτοντας σωστά τις αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας είτε εισάγοντας την αποβολή φορτίου (μέσω προτιμησιακού χρονοδιάγραμμα ταξιδιού) ή εγκαθιστώντας πρόσθετες πηγές ενέργειας, όπως γεννήτριες καταστρώματος. Αυτές οι τροπολογίες στα υποσυστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας συνεπάγονται πράγματι μια πορεία δράσεων που σχετίζονται με τον κίνδυνο και την ασφάλεια ανάλυση του ανακαινισμένου ενεργειακού συστήματος. Ένα από τα ζητήματα που δημιουργήθηκαν είναι η διεξαγωγή μελέτης αρμονικής παραμόρφωσης (IACS, 2016). Τα περισσότερα από τα νέα συστήματα λειτουργούν σε συνδυασμό με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που επιτυγχάνουν βέλτιστη ροπή έναντι ελέγχου ταχύτητας σε ελαχιστοποιημένες απώλειες.
Ωστόσο, αυτοί οι μετατροπείς προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στις κυματομορφές ρεύματος και τάσης που μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

5.2 Συστήματα Επεξεργασίας Νερού Έρματος (BWTS's)

Τα συστήματα επεξεργασίας έρματος έχουν ήδη εγκατασταθεί ή πρόκειται να εγκατασταθούν στα περισσότερα πλοία όπως μεταφοράς φορτίου χύδην ή δεξαμενόπλοια σε μια προσπάθεια ελαχιστοποίησης των δυσμενών βιολογικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων των νερών ανάμιξης σε διαφορετικές θάλασσες εξουδετερώνοντας όλους τους ζωντανούς οργανισμούς εντός του έρματος.

Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν μονάδες άντλησης και επεξεργασίας που εκτός από ειδικές ρυθμίσεις στο πλοίο για τις σωληνώσεις, εισάγουν απαιτήσεις για επιπλέον τροφοδοσία ενέργειας από τις ηλεκτρικές γεννήτριες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι απαιτούμενες πρόσθετες ποσότητες ενέργειας είναι της τάξης των 50 έως 600 kW αποδίδεται ότι της ενσωματωμένης γεννήτριας το σχέδιο λειτουργίας αρκετά συχνά δεν είναι αρκετό. Επιπλέον, τα περισσότερα BWTS είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του χειρισμού φορτίου (cargo handling)και ίσως σε ελιγμούς, ενώ η λειτουργία τους δεν περιλαμβάνεται, σε πολλές περιπτώσεις, εντός του τρόπου λειτουργίας «θαλάσσιας μετάβασης» ή «αγκύρωσης στο λιμάνι» που παρέχει κάποια ευελιξία στον προγραμματισμό της λειτουργία γεννητριών. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός εναλλακτικών λύσεων για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, δηλαδή:

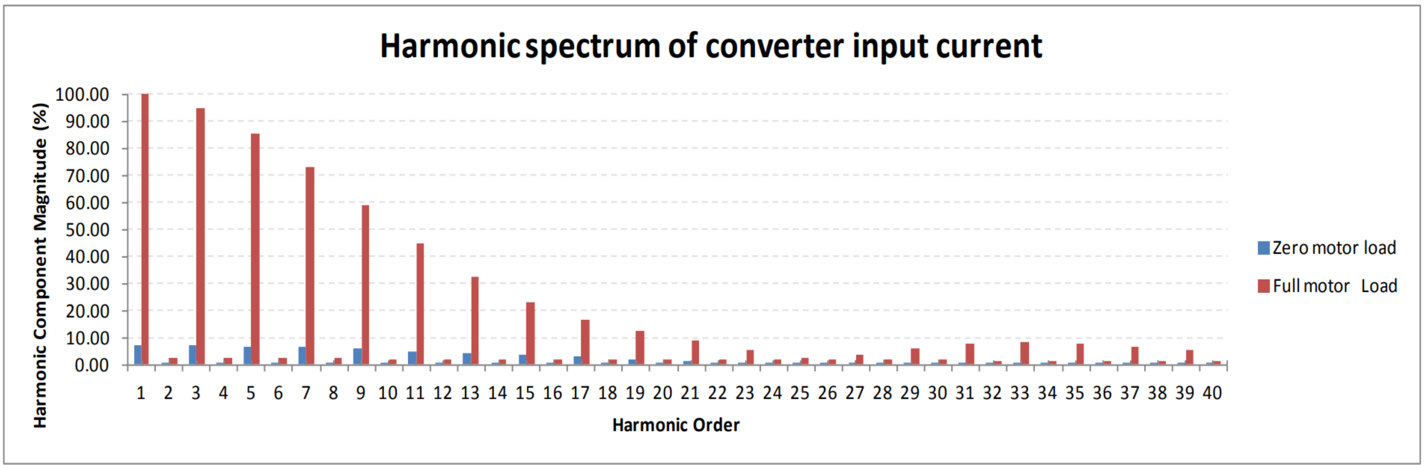
- Επανεξέταση του σχήματος λειτουργίας της γεννήτριας με συμμετοχή οποιασδήποτε γεννήτριας "stand-by" για συμμετοχή στην κατανομή φορτίων
- Εγκατάσταση πρόσθετης γεννήτριας (μια πρόσθετη γεννήτρια είναι εγκατεστημένη επί του σκάφους, στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω περιορισμοί χώρου, στο πάνω κατάστρωμα του πλοίου)



Σχήμα 5.1: Μετασκευασμένο ενεργειακό σύστημα για την τροφοδοσία του BWTS (μετασκευές με κόκκινο χρώμα,)

Σε μια προσπάθεια ελαχιστοποίησης των απαιτήσεων ισχύος του BWTS, ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός συνοδεύεται από μονάδες μεταβλητής συχνότητας (VFD) που υποτίθεται ότι μειώνουν τις απώλειες λειτουργίας και αυξάνουν την απόδοση.
Ωστόσο, η εισαγωγή αυτής της διεπαφής προκαλεί αρμονική παραμόρφωση. Για παράδειγμα, το αρμονικό φάσμα του μετατροπέα εισάγει ρεύμα τόσο όταν ο κινητήρας

λειτουργεί όσο και όταν δεν λειτουργεί. Επιπλέον, παρατηρούνται επίσης αρμονικές μικρής αξίας ακόμη και ταξινομημένες, οι οποίες οφείλονται κυρίως στον εσωτερικό σύνδεσμο DC του μετατροπέα ισχύος και ίσως, στο σχετικό φίλτρο στο VFD. Ένα επιπλέον ζήτημα σχετίζεται με την πτώση της αρμονικής τάσης στα καλώδια ισχύος διανομής. Ειδικότερα, η απαραίτητη καλωδίωση αυτών των συστημάτων θα μπορούσε να είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά εάν έχουν συγκεκριμένες καλωδιακές διαδρομές να ακολουθηθούν για να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι ασφαλείας. Όσο μεγαλύτερη είναι η καλωδίωση, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση και η μεγαλύτερη η (αρμονική) πτώση τάσης λόγω του πολύ παραμορφωμένου ρεύματος του VFD, ενώ υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί σχετικά με τις διατομές καλωδίων που μπορούν να διεισδύσουν σε υπάρχοντες δίσκους καλωδίων.

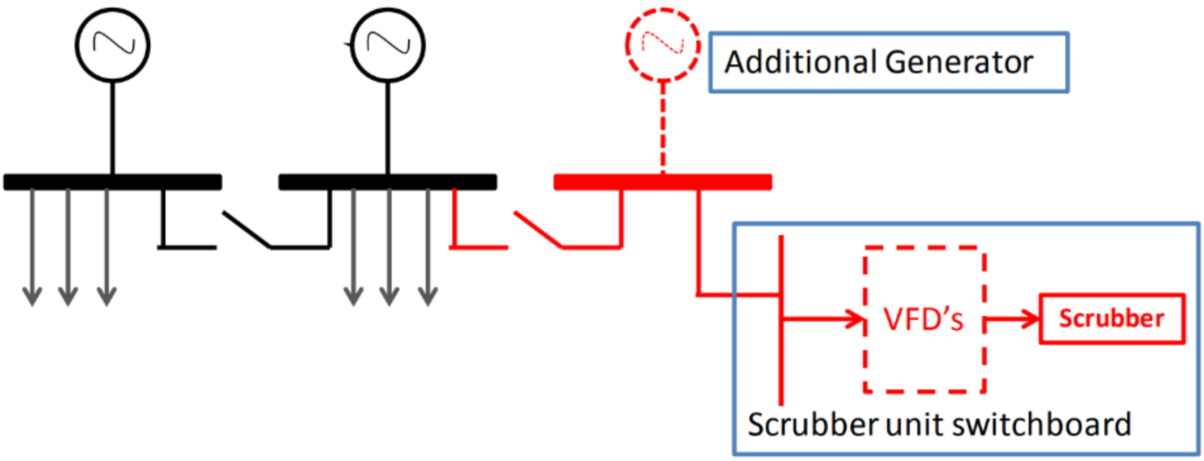


Σχήμα 5.2: Αρμονικό φάσμα του ρεύματος εισόδου του κινητήρα ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος που τροφοδοτεί έναν κινητήρα.

5.3 Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων («scrubbers»)

Ακολουθώντας τις οδηγίες του IMO και της ΕΕ για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τη ναυτιλία, τα πλοία είναι εξοπλισμένα με μονάδες παγίδευσης εκπομπών, οι πιο κοινές από τις οποίες είναι τα scrubbers. Αυτή η μετασκευή έχει κάποια κοινά σημεία, αλλά και ορισμένες ομοιότητες με το προαναφερθέν BWTS του. Ειδικότερα, μια μονάδα καθαρισμού καυσαερίων περιλαμβάνει ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό ποικίλης ζήτησης ισχύος μεταξύ 100 και 500 kW, τα οποία, όπως συνάγεται, δεν μπορούν εύκολα να καλυφθούν από τους υπάρχοντες παραγωγούς πλοίων.
Έτσι, και στην περίπτωση αυτή, υπάρχει περιορισμένος αριθμός επιλογών για την αντικατάσταση της δυσκολίας του προβλήματος τροφοδοσίας της νέας μονάδας καθαρισμού καυσαερίων, με την εγκατάσταση μιας πρόσθετης γεννήτριας που είναι η πιο αποτελεσματική.
Φυσικά, όπως και στο BWTS, αυτές οι απαιτήσεις ισχύος μπορεί να μειωθούν κάπως μέσω της εισαγωγής ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος που οδηγούν τους ηλεκτροκινητήρες που έχουν εμπλακεί σε όλες τις παρενέργειες που σχετίζονται με τους μετατροπείς ισχύος π.χ. Η αρμονική παραμόρφωση, η πτώση της αρμονικής τάσης

κ.λπ.. Από την άλλη πλευρά, σε αντίθεση με το BWTS's, η λειτουργία των scrubbers πρέπει να γίνεται σε συνεχή βάση.

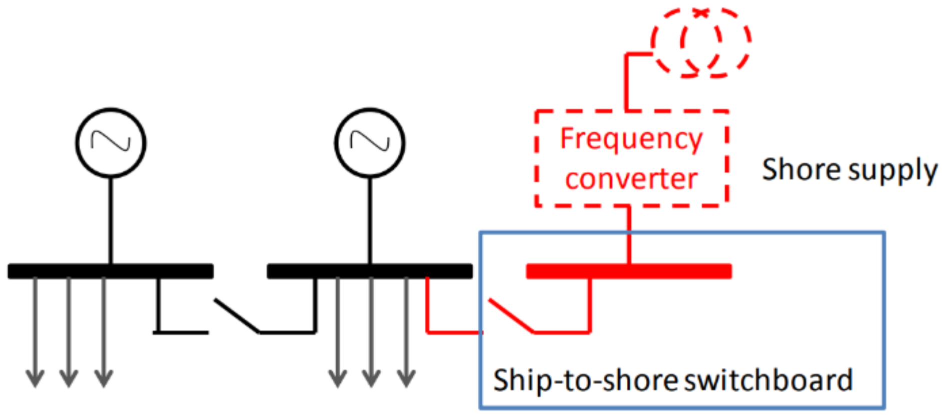


Σχήμα 5.3: Μετασκευασμένο ενεργειακό σύστημα για την τροφοδοσία της μονάδας καθαρισμού καυσαερίων(μετασκευές με κόκκινο χρώμα)

5.4 Διασύνδεση πλοίου-ξηρά (cold ironing)

Το cold ironing αναφέρεται στην πλήρη απενεργοποίηση όλων των κινητήρων των πλοίων (συμπεριλαμβανομένων των γεννητριών) ενώ βρίσκεται σε αγκυροβόλιο σε λιμάνια και κάλυψη των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διασύνδεσης ισχύος με το δίκτυο του λιμανιού. Έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο αποτελεσματική λύση για την εξάλειψη του περιβαλλοντικού προβλήματος από τα πλοία σε λιμάνια. Η συνολική ατμοσφαιρική λύση μειώνεται επίσης καθώς η ηλεκτρική ενέργεια είναι πιο πράσινη από ό, τι των πλοίων, καθώς βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα όπως το φυσικό αέριο.
Φαίνεται ότι η επένδυση σε μια τέτοια τεχνολογία των πλοιοκτητών τείνει να καταστεί τελικά υποχρεωτική, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ορισμένα λιμάνια, όπως αυτά της Πολιτείας της Καλιφόρνια (ΗΠΑ) από το 2021, όλα τα πλοία που βρίσκονται στον ελλιμενισμό πρέπει να είναι σε κατάσταση «cold ironing».
Αυτή η ενσωμάτωση της εγκατάστασης διασύνδεσης πλοίου σε ξηρά επί ενός πλοίου συνεπάγεται έναν άλλο εξοπλισμό, αυτή τη φορά στον υπάρχοντα πίνακα διανομής ξηράς. Το τελευταίο στα περισσότερα πλοία έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί μόνο κατά τη διάρκεια της αποβάθρας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτή σε ένα πλήρες νεκρό πλοίο, ενώ φυσικά σε τέτοια κατάσταση λειτουργίας η συγχρονισμένη λειτουργία των γεννητριών πλοίων με το δίκτυο του λιμένα δεν έχει νόημα. Αντιθέτως, ο νέος πίνακας διανομής ξηράς σε πλοίο πρέπει να αντιμετωπίζεται ως «επιπλέον τροφοδοτικό» που μπορεί (και μάλλον πρέπει) να λειτουργεί σε συγχρονισμένη λειτουργία με τις γεννήτριες του πλοίου, έτσι ώστε να μην υπάρχει "black-out" κατά τη διάρκεια της μετάβασης από πλοίο σε λιμάνι. Επιπλέον, η χωρητικότητα αυτού του πίνακα διανομής πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε όλες τις απαιτήσεις ενέργειας του πλοίου σε κατάσταση λειτουργία λιμανίου

π.χ. φορτία ξενοδοχείων, μαγειρεία, διαμονή, διακίνηση φορτίων, φωτισμός, κλιματισμός κ.λπ. που είναι, γενικά, μεγαλύτερες από τις απαιτήσεις του dry-docking. Περαιτέρω επιπτώσεις τόσο των τεχνικών όσο και των οικονομικών μπορεί να προκληθούν εάν η τροφοδοσία του λιμανιού έχει διαφορετική τάση και συχνότητα σε σύγκριση με αυτό ενός πλοίου. Σε αυτήν την τελευταία περίπτωση, οι μετασχηματιστές τάσης και οι μετατροπείς συχνότητας πρέπει να συνοδεύουν τη μετασκευή του πίνακα διακοπτών



Σχήμα 5.4: Μετασκευασμένο ενεργειακό σύστημα πλοίου cold ironing (μετασκευές με κόκκινο χρώμα)

5.5 Τεχνολογία LED

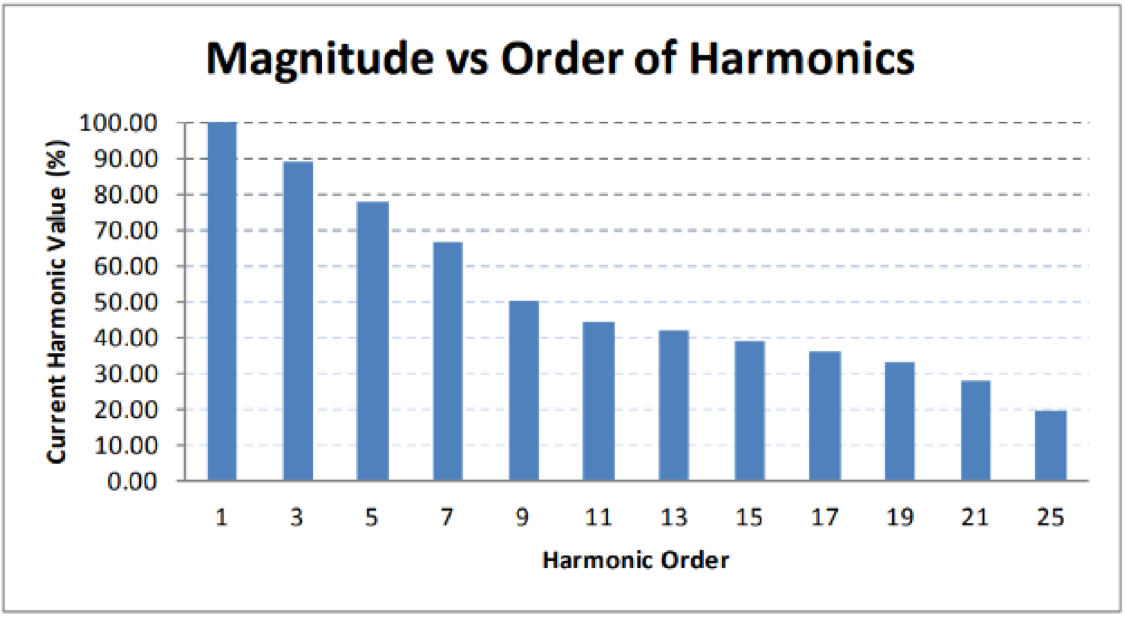
Η τεχνολογία LED έχει επιτύχει να παρέχει συσκευές φωτισμού υψηλής χωρητικότητας φωτισμού αλλά χαμηλής ενέργειας κατανάλωσης. Το τελευταίο στην πραγματικότητα αναφέρεται μόνο σε ενεργές απαιτήσεις ισχύος και όχι σε άεργες που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων αρμονικά στοιχεία παραμόρφωσης. Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, όπου το μετρούμενο αρμονικό φάσμα της τρέχουσας κυματομορφής απορροφάται από έναν αντιπροσωπευτικό λαμπτήρα LED, το ρεύμα έχει μία σημαντική παραμόρφωση που περιλαμβάνει αρμονικές περιττής τάξης που οδηγούν σε THD ίσο με 172,2%. Επιπλέον, ενώ επιβεβαιώνεται ότι η ενεργή κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή, ο συντελεστής ισχύος μετριέται επίσης πολύ χαμηλής τιμής, καθώς είναι 0,478 επαγωγικός.
Αυτό αντικατοπτρίζεται στις υψηλές απαιτήσεις άεργης και φαινόμενης ισχύος (που είναι σχεδόν δύο φορές τις ενεργού).

Ενεργή Ισχύς	Άεργη Ισχύς	Φαινόμενη Ισχύς	Συντελεστής Ισχύος
P(%)	*Q(%)*	S(%)	Pf(-)
47.80	87.8	100	0.478

Σχήμα 5.5: Ενδεικτικοί δείκτες ισχύος ενός λαμπτήρα LED

Ως εκ τούτου, από τη μία πλευρά, ο φωτισμός LED χαρακτηρίζεται από χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις ως προς την ενεργό ισχύ, ενώ από την άλλη πλευρά, εισάγει σημαντική αρμονική παραμόρφωση που μεταφράζεται σε σχετικά υψηλές απαιτήσεις άεργης και φαινομενικής ισχύος, καθώς και χαμηλός (πραγματικός) συντελεστής ισχύος.
Λόγω του μικρού, σε σύγκριση με άλλους, ποσότητες ενέργειας που αντιστοιχούν στα φορτία φωτισμού στα περισσότερα εμπορικά πλοία, το προαναφερθέν ζήτημα δεν

αναμένεται να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του οι περισσότερες γεννήτριες πλοίων με την πιθανή εξαίρεση των κρουαζιερόπλοιων, όπου ο φωτισμός κυριαρχεί.



Σχήμα 5.6: Αρμονικό φάσμα της τρέχουσας κυματομορφής ενός φωτός LED εξοικονόμησης ενέργειας (THD = 172,2%).

5.6 Μελέτη αρμονικής ροή ισχύος

Επί του παρόντος, τα ηλεκτρικά πρότυπα για συστήματα ενέργειας πλοίων έχουν αόριστους περιορισμούς για την αρμονική παραμόρφωση που αναφέρεται κυρίως σε μία τάση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους περισσότερους κανόνες ταξινόμησης, το THD της τάσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%, εκτός εάν υπάρχουν πολλοί μετατροπείς ηλεκτρονικής ισχύος που μπορούν να εγκατασταθούν έως 8%. Επιπλέον, σύμφωνα με τον κανόνα IACS / E24, (IACS, 2016), τα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης πρέπει να εξετάζονται σε ετήσια βάση. Το STANAG-108 του NATO,(STANAG-108, 2004) παρέχει μια αρκετά πιο λεπτομερή περιγραφή των προβλημάτων αρμονικής παραμόρφωσης που ορίζουν όρια για κάθε αρμονική των κυματομορφών τάσης, ενώ ορίζει ότι η αρμονική ροή ισχύος πρέπει να μελετηθεί μέσω προσομοιώσεων σε ειδικά πακέτα υπολογιστών.

Τα υπολογισμένα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης ροής αρμονικής φόρτισης αποτελούνται από την ενεργή και άεργη ροή ισχύος σε όλες τις γραμμές διανομής καθώς και τις τάσεις σε όλους τους αγωγούς. Για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια ανάλυση:

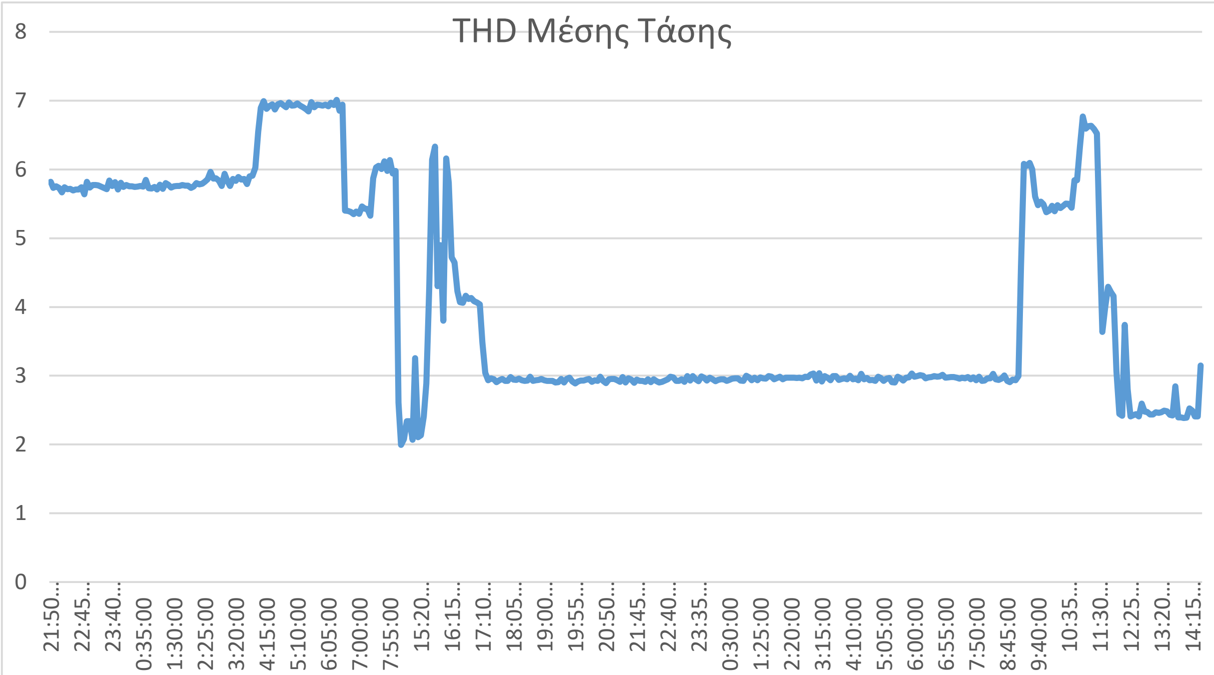
- Όλα τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του ενεργειακού συστήματος πλοίου, π.χ. καλώδια διανομής, μετασχηματιστές, γεννήτριες, κινητήρες κ.λπ. πρέπει να μοντελοποιούνται μέσω των αρμονικών τους μοντέλων. Είναι σημαντικό να μοντελοποιούνται και τυχόν υπάρχοντα φίλτρα(παθητικά ή ενεργά).

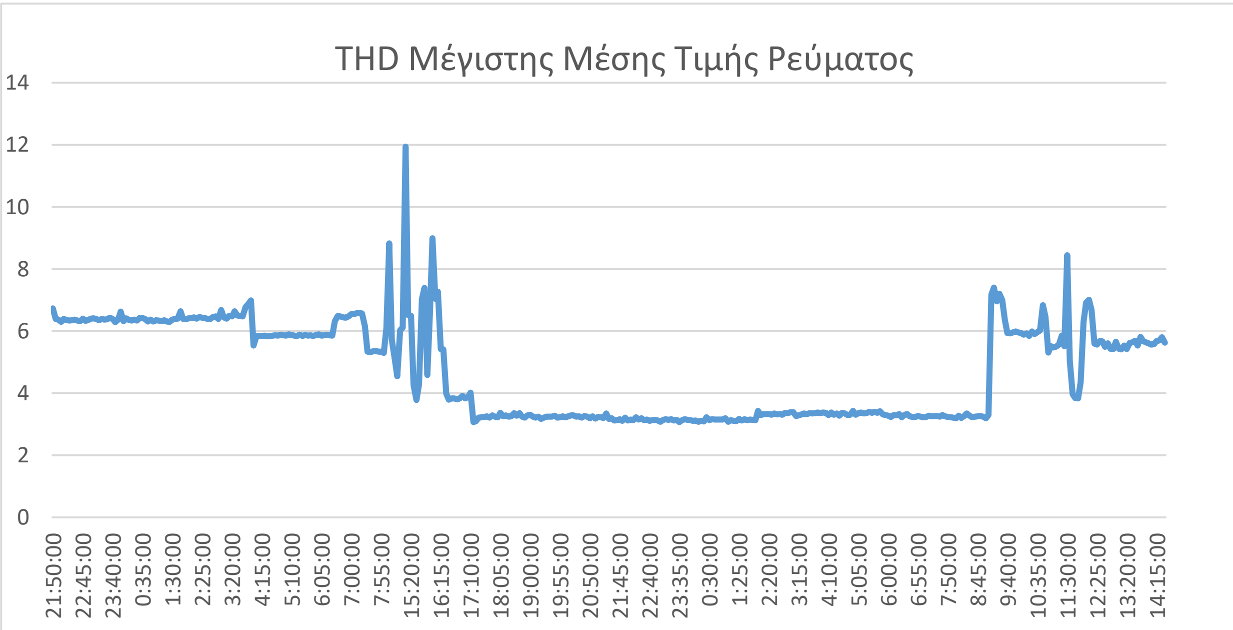
- Οι τιμές των αρμονικών τάσης ή/και ρεύματος κάθε ξεχωριστού εξαρτήματος πρέπει να είναι διαθέσιμες (π.χ. από κατασκευαστές φωτός VFD ή LED, ή με μετρήσεις) και να μοντελοποιηθούν πιθανότατα ως αρμονική τάση ή/και τρέχουσες πηγές.

5.7 Μελέτη Εφαρμογής Σε Πραγματικό Πλοίο.

Η μελέτη που παρουσιάζεται στη συνέχεια έχει εξαχθεί από το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ένα κρουαζιερόπλοιο. Οι μετρήσεις είχαν ως στόχο την εύρεση του ποσοστού της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης(THD) σε ρεύμα και τάση συναρτήσει του χρόνου αλλά και το ποσοστό των αρμονικών($3^{ης}$, $5^{ης}$, $7^{ης}$, $11^{ης}$, $13^{ης}$) των ρευμάτων και των τάσεων. Οι γραφικές παραστάσεις έχουν εξαχθεί υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τριών φάσεων των ρευμάτων και των τάσεων.

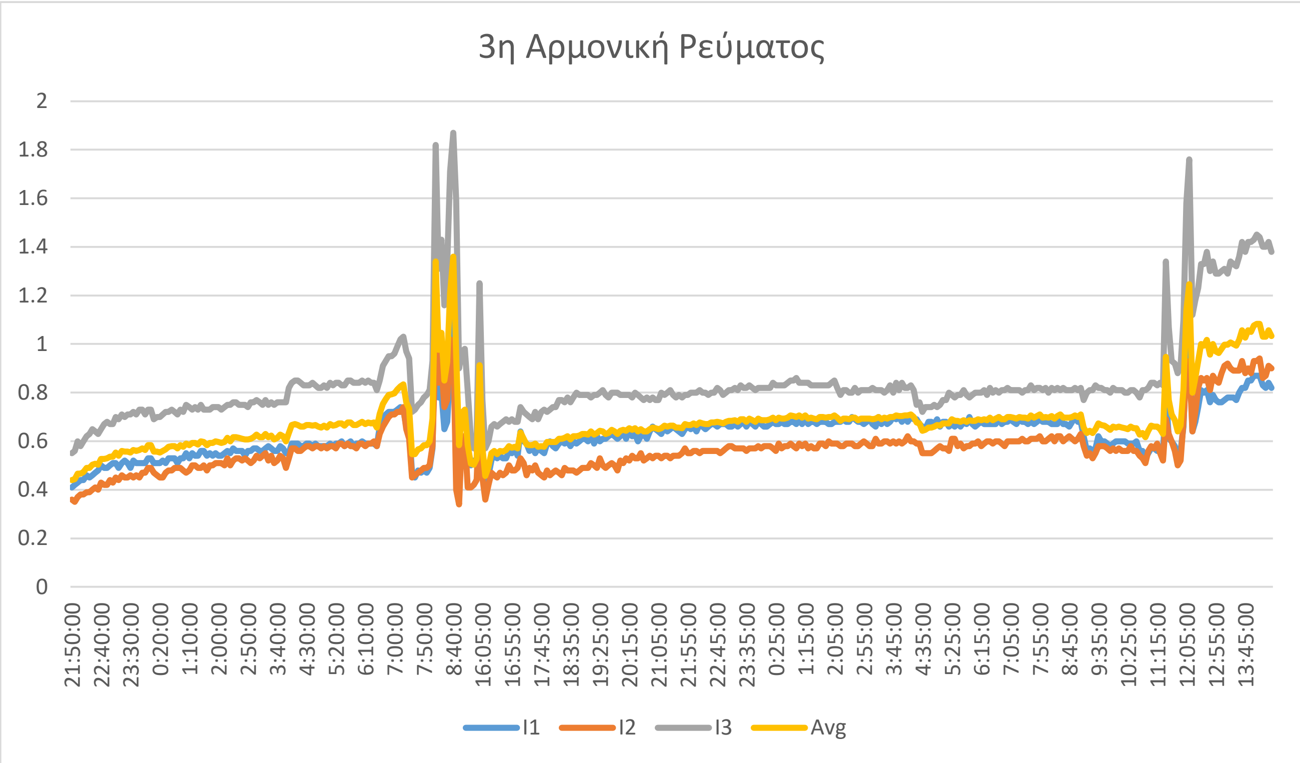
5.7.1 Αποτελέσματα ολικής αρμονικής παραμόρφωσης(THD)

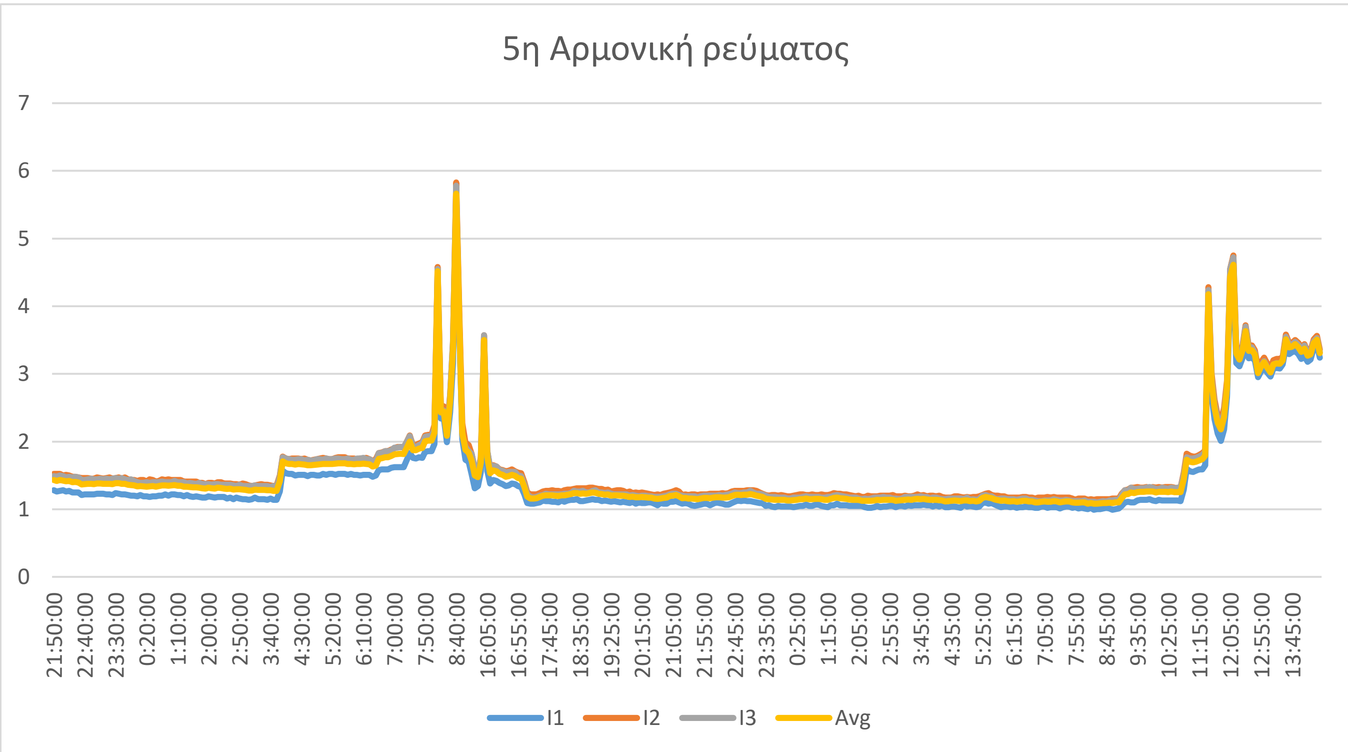


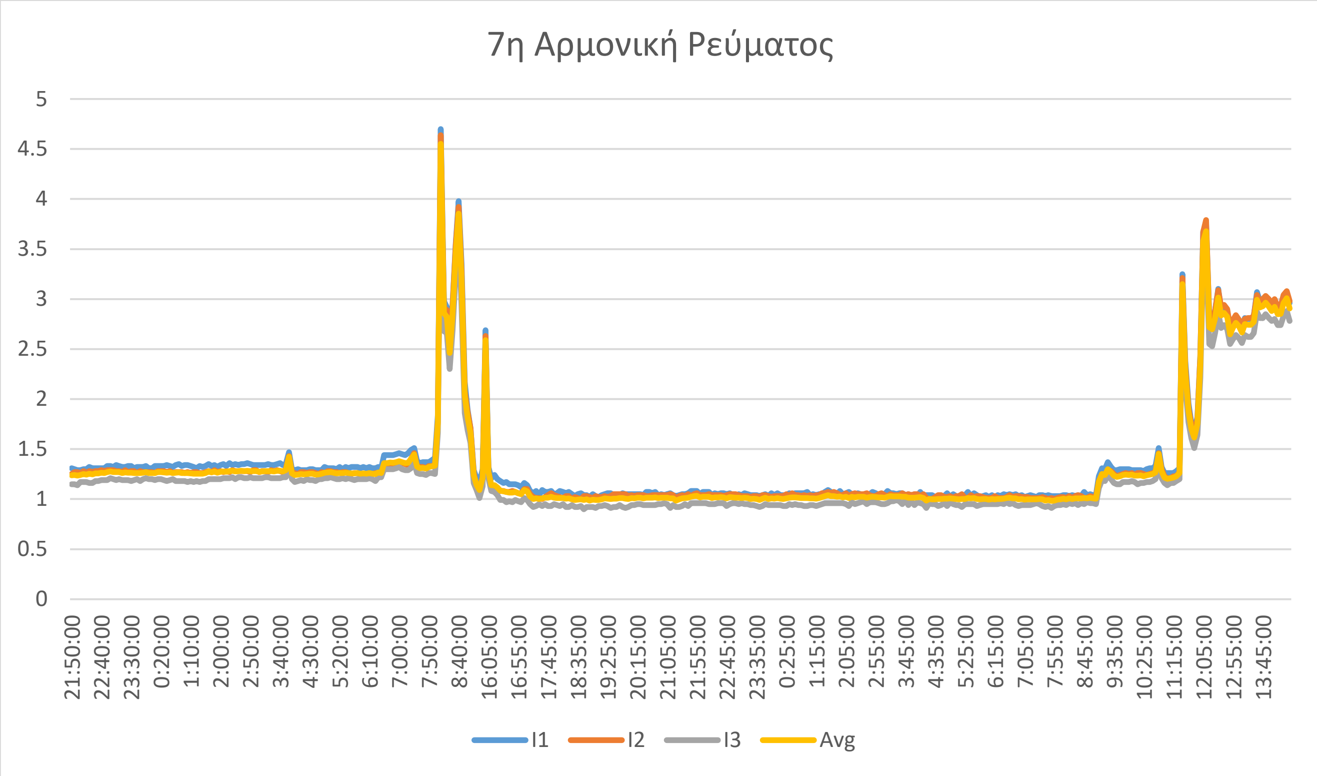



THD Μέσης τιμής ρεύματος
8
7
6
5
4
3
2
1
0
21:50:00
22:40:00
23:30:00
0:20:00
1:10:00
2:00:00
2:50:00
3:40:00
4:30:00
5:20:00
6:10:00
7:00:00
7:50:00
8:40:00
16:00:00
16:50:00
17:40:00
18:30:00
19:20:00
20:10:00
21:00:00
21:50:00
22:40:00
23:30:00
0:20:00
1:10:00
2:00:00
2:50:00
3:40:00
4:30:00
5:20:00
6:10:00
7:00:00
7:50:00
8:40:00
9:30:00
10:20:00
11:10:00
12:00:00
12:50:00
13:40:00
14:30:00

5.7.2 Αποτελέσματα αρμονικών ρευμάτων



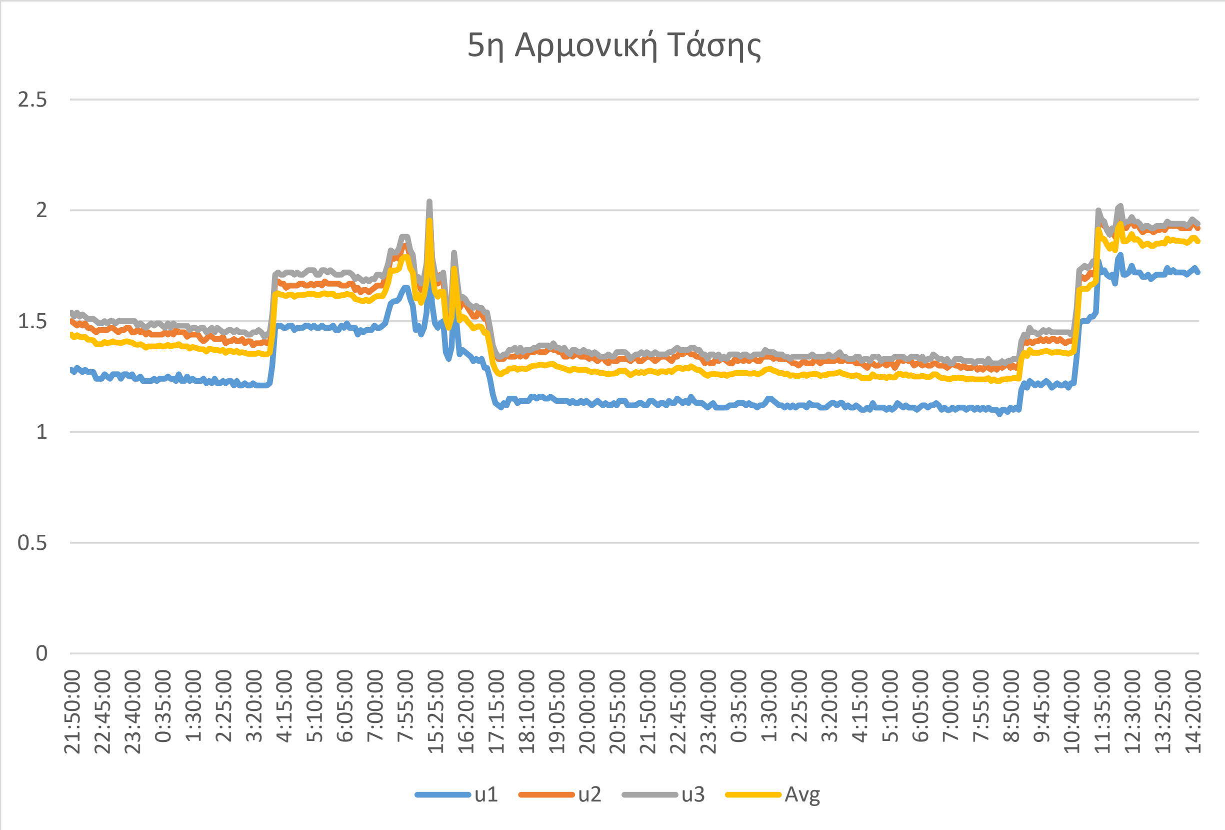


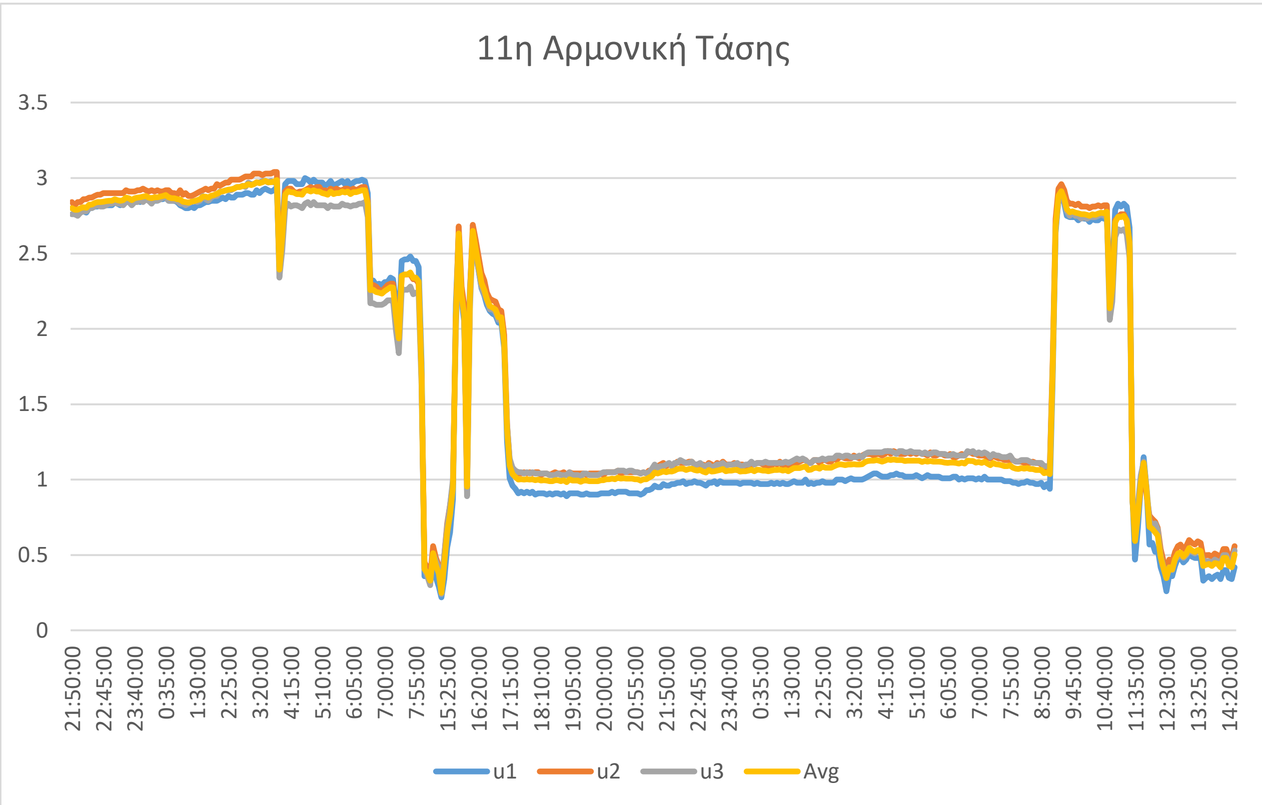

7η Αρμονική Ρεύματος
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
21:50:00
22:40:00
23:30:00
0:20:00
1:10:00
2:00:00
2:50:00
3:40:00
4:30:00
5:20:00
6:10:00
7:00:00
7:50:00
8:40:00
16:05:00
16:55:00
17:45:00
18:35:00
19:25:00
20:15:00
21:05:00
21:55:00
22:45:00
23:35:00
0:25:00
1:15:00
2:05:00
2:55:00
3:45:00
4:35:00
5:25:00
6:15:00
7:05:00
7:55:00
8:45:00
9:35:00
10:25:00
11:15:00
12:05:00
12:55:00
13:45:00
I1
I2
I3
Avg

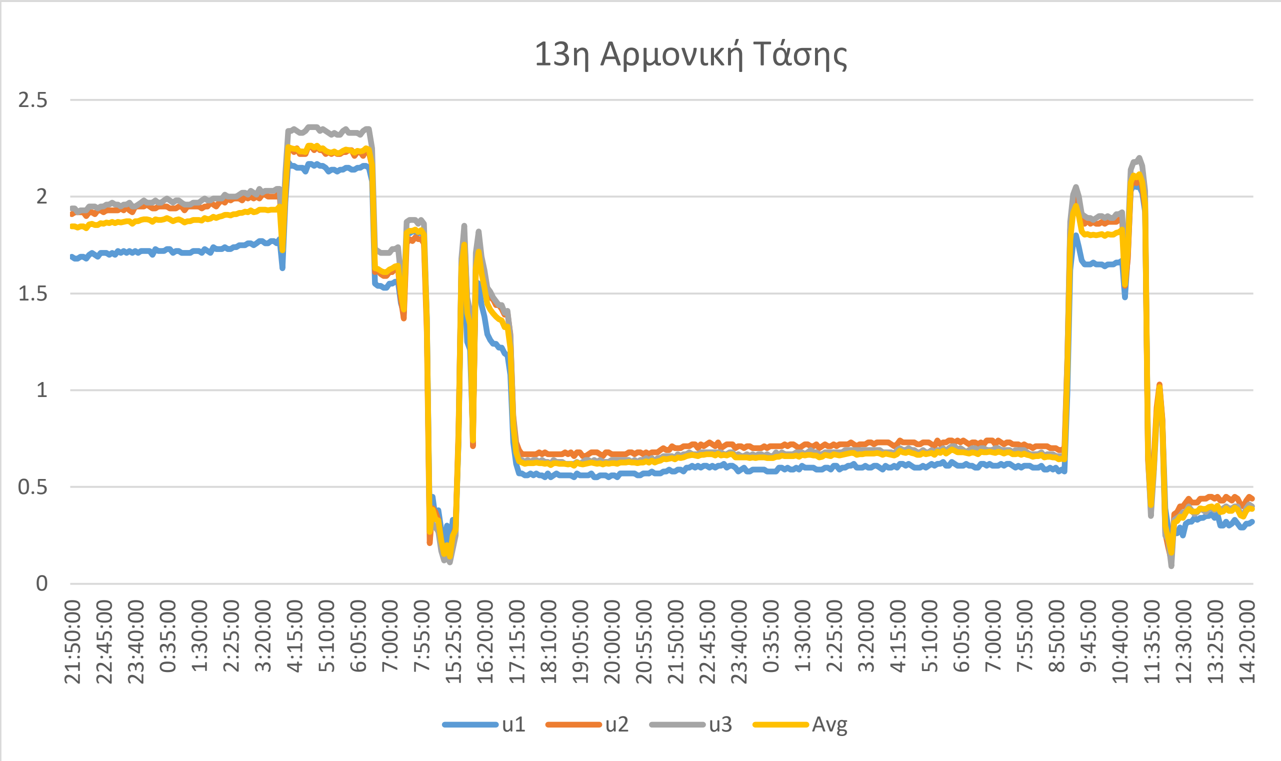

11η Αρμονική ρεύματος
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
21:50:00
22:40:00
23:30:00
0:20:00
1:10:00
2:00:00
2:50:00
3:40:00
4:30:00
5:20:00
6:10:00
7:00:00
7:50:00
8:40:00
16:05:00
16:55:00
17:45:00
18:35:00
19:25:00
20:15:00
21:05:00
21:55:00
22:45:00
23:35:00
0:25:00
1:15:00
2:05:00
2:55:00
3:45:00
4:35:00
5:25:00
6:15:00
7:05:00
7:55:00
8:45:00
9:35:00
10:25:00
11:15:00
12:05:00
12:55:00
13:45:00
I1
I2
I3
Avg

13η Αρμονική ρεύματος
2.5
2
1.5
1
0.5
0
21:50:00
22:40:00
23:30:00
0:20:00
1:10:00
2:00:00
2:50:00
3:40:00
4:30:00
5:20:00
6:10:00
7:00:00
7:50:00
8:40:00
16:05:00
16:55:00
17:45:00
18:35:00
19:25:00
20:15:00
21:05:00
21:55:00
22:45:00
23:35:00
0:25:00
1:15:00
2:05:00
2:55:00
3:45:00
4:35:00
5:25:00
6:15:00
7:05:00
7:55:00
8:45:00
9:35:00
10:25:00
11:15:00
12:05:00
12:55:00
13:45:00
I1
I2
I3
Avg

5.7.3 Αποτελέσματα αρμονικών τάσεων






13η Αρμονική Τάσης
2.5
2
1.5
1
0.5
0
21:50:00
22:45:00
23:40:00
0:35:00
1:30:00
2:25:00
3:20:00
4:15:00
5:10:00
6:05:00
7:00:00
7:55:00
15:25:00
16:20:00
17:15:00
18:10:00
19:05:00
20:00:00
20:55:00
21:50:00
22:45:00
23:40:00
0:35:00
1:30:00
2:25:00
3:20:00
4:15:00
5:10:00
6:05:00
7:00:00
7:55:00
8:50:00
9:45:00
10:40:00
11:35:00
12:30:00
13:25:00
14:20:00
u1
u2
u3
Avg

Ακολουθούν πίνακες για τις αρμονικές ρεύματος και τάσης για την περίοδο 17:30-9:00 όπου οι τιμές είναι περίπου σταθερές και έτσι παρατίθενται αναλυτικά ανά φάση για να δειχθεί ότι και σε αυτή την περίοδο οι τιμές διαφέρουν.

Αρμονικές Ρεύματος											
5η			**7η**			**11η**			**13η**		
1^{η} Φάση	**2^{η} Φάση**	**3^{η} Φάση**	**1^{η} Φάση**	**2^{η} Φάση**	**3^{η} Φάση**	**1^{η} Φάση**	**2^{η} Φάση**	**3^{η} Φάση**	**1^{η} Φάση**	**2^{η} Φάση**	**3^{η} Φάση**
1,1	1,24	1,2	1,04	1,01	0,95	1,12	1,05	1,04	0,56	0,55	0,57
1,13	1,26	1,21	1,09	1	0,93	1,1	1,06	1,05	0,57	0,56	0,57
1,12	1,27	1,23	1,07	1,02	0,95	1,12	1,06	1,05	0,57	0,56	0,58
1,12	1,27	1,22	1,07	1,04	0,93	1,11	1,06	1,06	0,57	0,56	0,59
1,11	1,28	1,22	1,08	1,06	0,93	1,13	1,07	1,05	0,57	0,57	0,58
1,11	1,27	1,22	1,05	1,04	0,95	1,11	1,06	1,06	0,56	0,57	0,58
1,1	1,27	1,22	1,06	1,03	0,94	1,12	1,06	1,05	0,57	0,56	0,58
1,13	1,26	1,22	1,08	1,02	0,93	1,12	1,06	1,05	0,55	0,57	0,59
1,11	1,28	1,23	1,07	1,01	0,95	1,1	1,07	1,05	0,57	0,57	0,57
1,13	1,29	1,23	1,06	1,03	0,92	1,1	1,06	1,06	0,55	0,56	0,58
1,14	1,29	1,24	1,07	1,03	0,92	1,1	1,07	1,05	0,56	0,57	0,58
1,14	1,3	1,27	1,05	1	0,94	1,08	1,06	1,04	0,56	0,56	0,57
1,15	1,31	1,26	1,03	1,02	0,92	1,1	1,06	1,04	0,57	0,56	0,57
1,12	1,31	1,26	1,05	1,01	0,92	1,1	1,06	1,05	0,56	0,56	0,57
1,12	1,31	1,27	1,06	1	0,93	1,1	1,08	1,04	0,55	0,57	0,58
1,13	1,31	1,25	1,04	1,03	0,9	1,1	1,05	1,04	0,55	0,56	0,57
1,14	1,32	1,25	1,04	1,03	0,92	1,11	1,07	1,05	0,55	0,56	0,58
1,15	1,32	1,27	1,02	1,02	0,92	1,1	1,06	1,03	0,56	0,55	0,57
1,14	1,31	1,28	1,05	1,01	0,92	1,09	1,08	1,05	0,55	0,57	0,57
1,14	1,3	1,25	1,03	1,03	0,91	1,1	1,06	1,05	0,55	0,56	0,58
1,12	1,3	1,25	1,02	1,02	0,93	1,09	1,05	1,03	0,56	0,56	0,57
1,13	1,28	1,24	1,04	1,02	0,93	1,1	1,06	1,04	0,57	0,56	0,57
1,12	1,29	1,25	1,05	1,03	0,94	1,1	1,06	1,03	0,56	0,56	0,58
1,11	1,26	1,23	1,06	1,02	0,93	1,09	1,05	1,03	0,55	0,57	0,57
1,12	1,27	1,22	1,06	1,03	0,91	1,08	1,04	1,03	0,55	0,55	0,58
1,11	1,28	1,22	1,04	1,05	0,92	1,09	1,04	1,04	0,55	0,56	0,58
1,1	1,28	1,22	1,04	1,05	0,92	1,1	1,05	1,03	0,57	0,56	0,57
1,11	1,27	1,22	1,04	1,05	0,94	1,11	1,05	1,04	0,57	0,56	0,57
1,1	1,25	1,22	1,06	1,05	0,92	1,11	1,05	1,05	0,55	0,57	0,58
1,09	1,26	1,2	1,05	1,05	0,91	1,1	1,04	1,05	0,55	0,56	0,58
1,11	1,24	1,21	1,05	1,03	0,92	1,09	1,05	1,05	0,56	0,56	0,57
1,08	1,25	1,2	1,05	1,04	0,94	1,13	1,05	1,05	0,57	0,56	0,58
1,1	1,24	1,19	1,05	1,03	0,94	1,12	1,05	1,05	0,56	0,56	0,58
1,09	1,25	1,2	1,05	1,04	0,95	1,13	1,05	1,06	0,57	0,57	0,57
1,09	1,24	1,2	1,05	1,04	0,95	1,14	1,05	1,06	0,57	0,56	0,58
1,1	1,23	1,19	1,04	1,04	0,94	1,14	1,05	1,06	0,57	0,57	0,58
1,1	1,22	1,19	1,07	1,03	0,94	1,12	1,06	1,06	0,56	0,58	0,58
1,08	1,21	1,18	1,07	1,03	0,94	1,12	1,06	1,05	0,56	0,57	0,57
1,06	1,22	1,18	1,06	1,04	0,94	1,13	1,05	1,06	0,57	0,57	0,57

1,09	1,21	1,18	1,07	1,04	0,94	1,11	1,06	1,05	0,56	0,57	0,58
1,08	1,23	1,19	1,04	1,04	0,95	1,12	1,05	1,05	0,56	0,56	0,58
1,08	1,24	1,2	1,05	1,04	0,95	1,12	1,05	1,04	0,57	0,56	0,58
1,11	1,25	1,22	1,04	1,04	0,96	1,11	1,04	1,04	0,57	0,56	0,59
1,11	1,26	1,23	1,05	1,04	0,95	1,11	1,04	1,03	0,57	0,56	0,59
1,12	1,28	1,23	1,06	1,05	0,91	1,11	1,04	1,04	0,57	0,57	0,58
1,1	1,26	1,21	1,04	1,04	0,94	1,1	1,04	1,04	0,56	0,56	0,57
1,08	1,21	1,2	1,03	1,01	0,92	1,1	1,04	1,03	0,56	0,55	0,57
1,09	1,22	1,19	1,04	1,03	0,92	1,1	1,06	1,06	0,56	0,56	0,59
1,08	1,21	1,19	1,05	1,04	0,93	1,15	1,1	1,1	0,59	0,58	0,61
1,06	1,22	1,19	1,05	1,03	0,95	1,17	1,1	1,1	0,6	0,58	0,6
1,05	1,22	1,19	1,06	1,05	0,93	1,18	1,11	1,11	0,6	0,6	0,61
1,06	1,21	1,17	1,08	1,03	0,96	1,2	1,13	1,13	0,6	0,6	0,62
1,07	1,22	1,19	1,08	1,05	0,96	1,19	1,14	1,12	0,6	0,61	0,62
1,08	1,22	1,2	1,08	1,06	0,96	1,2	1,14	1,14	0,62	0,61	0,62
1,08	1,22	1,2	1,05	1,04	0,96	1,18	1,12	1,12	0,6	0,6	0,61
1,06	1,23	1,2	1,07	1,04	0,96	1,18	1,13	1,11	0,6	0,6	0,62
1,08	1,23	1,2	1,07	1,04	0,96	1,19	1,13	1,13	0,6	0,61	0,63
1,1	1,23	1,2	1,07	1,05	0,95	1,18	1,13	1,14	0,61	0,61	0,63
1,09	1,23	1,21	1,04	1,04	0,95	1,18	1,13	1,13	0,61	0,62	0,62
1,08	1,24	1,2	1,06	1,04	0,95	1,19	1,13	1,12	0,6	0,61	0,62
1,07	1,23	1,21	1,05	1,04	0,96	1,2	1,13	1,12	0,62	0,61	0,62
1,07	1,24	1,22	1,06	1,04	0,96	1,2	1,14	1,12	0,61	0,61	0,63
1,09	1,26	1,23	1,06	1,03	0,96	1,16	1,12	1,11	0,61	0,61	0,62
1,11	1,27	1,25	1,05	1,04	0,93	1,15	1,11	1,11	0,6	0,61	0,62
1,13	1,27	1,24	1,06	1,05	0,95	1,15	1,12	1,11	0,6	0,61	0,63
1,12	1,27	1,24	1,04	1,05	0,96	1,17	1,11	1,1	0,61	0,61	0,62
1,13	1,27	1,25	1,03	1,05	0,96	1,17	1,11	1,09	0,61	0,6	0,62
1,12	1,28	1,25	1,05	1,04	0,95	1,17	1,13	1,1	0,61	0,62	0,63
1,12	1,28	1,27	1,04	1,03	0,96	1,16	1,11	1,09	0,62	0,61	0,61
1,11	1,28	1,25	1,06	1,03	0,95	1,15	1,12	1,09	0,61	0,61	0,62
1,1	1,27	1,23	1,05	1,03	0,95	1,17	1,11	1,1	0,6	0,61	0,62
1,09	1,25	1,23	1,04	1,02	0,94	1,15	1,11	1,09	0,61	0,6	0,61
1,09	1,23	1,22	1,04	1,03	0,94	1,17	1,1	1,11	0,6	0,6	0,61
1,05	1,21	1,2	1,04	1,03	0,93	1,15	1,1	1,09	0,59	0,59	0,6
1,06	1,2	1,18	1,03	1,02	0,92	1,15	1,1	1,1	0,58	0,58	0,61
1,04	1,21	1,18	1,04	1,04	0,93	1,16	1,1	1,11	0,59	0,59	0,61
1,03	1,21	1,18	1,05	1,04	0,95	1,18	1,11	1,11	0,6	0,6	0,61
1,05	1,2	1,17	1,03	1,03	0,94	1,17	1,12	1,11	0,59	0,59	0,61
1,04	1,21	1,17	1,06	1,02	0,94	1,18	1,12	1,11	0,59	0,59	0,62
1,04	1,2	1,17	1,04	1,03	0,94	1,19	1,11	1,09	0,6	0,59	0,6
1,04	1,19	1,16	1,06	1,03	0,94	1,17	1,12	1,11	0,6	0,59	0,6
1,04	1,19	1,16	1,04	1,03	0,94	1,19	1,11	1,11	0,6	0,59	0,6
1,03	1,2	1,17	1,04	1,03	0,93	1,17	1,12	1,12	0,6	0,59	0,61
1,04	1,21	1,17	1,04	1,05	0,93	1,2	1,1	1,12	0,59	0,6	0,61
1,05	1,22	1,17	1,06	1,03	0,95	1,19	1,12	1,12	0,59	0,59	0,62
1,05	1,22	1,18	1,05	1,06	0,94	1,19	1,1	1,13	0,59	0,6	0,61
1,07	1,21	1,19	1,06	1,04	0,95	1,19	1,11	1,11	0,58	0,6	0,61

1,05	1,21	1,18	1,06	1,04	0,94	1,17	1,1	1,11	0,59	0,58	0,61
1,05	1,22	1,18	1,06	1,03	0,94	1,16	1,1	1,1	0,58	0,6	0,6
1,07	1,21	1,18	1,06	1,04	0,93	1,16	1,1	1,1	0,59	0,59	0,61
1,07	1,21	1,18	1,07	1,03	0,93	1,18	1,1	1,1	0,58	0,6	0,61
1,05	1,22	1,17	1,04	1,04	0,94	1,17	1,1	1,11	0,59	0,6	0,61
1,04	1,21	1,17	1,05	1,03	0,94	1,17	1,11	1,11	0,58	0,6	0,61
1,03	1,21	1,18	1,04	1,04	0,93	1,16	1,1	1,11	0,58	0,59	0,61
1,06	1,22	1,18	1,05	1,04	0,94	1,16	1,11	1,11	0,6	0,59	0,62
1,06	1,24	1,2	1,05	1,06	0,95	1,19	1,12	1,11	0,61	0,6	0,62
1,08	1,23	1,21	1,07	1,06	0,96	1,19	1,14	1,14	0,62	0,62	0,63
1,06	1,23	1,2	1,09	1,07	0,96	1,21	1,13	1,16	0,61	0,62	0,63
1,06	1,22	1,19	1,07	1,06	0,96	1,21	1,15	1,16	0,61	0,62	0,63
1,06	1,22	1,18	1,06	1,07	0,96	1,23	1,14	1,16	0,63	0,62	0,63
1,05	1,21	1,17	1,05	1,06	0,96	1,23	1,14	1,15	0,62	0,61	0,63
1,05	1,2	1,17	1,08	1,04	0,96	1,22	1,13	1,16	0,61	0,61	0,63
1,05	1,19	1,17	1,05	1,04	0,96	1,18	1,1	1,12	0,61	0,6	0,61
1,05	1,2	1,16	1,06	1,06	0,95	1,18	1,1	1,12	0,59	0,6	0,61
1,05	1,18	1,15	1,07	1,03	0,93	1,18	1,1	1,12	0,59	0,6	0,62
1,03	1,18	1,16	1,05	1,05	0,97	1,19	1,11	1,13	0,61	0,6	0,62
1,02	1,2	1,15	1,04	1,06	0,95	1,17	1,11	1,13	0,6	0,6	0,62
1,02	1,19	1,16	1,06	1,05	0,96	1,19	1,11	1,14	0,61	0,61	0,62
1,03	1,19	1,17	1,05	1,05	0,97	1,2	1,11	1,13	0,61	0,6	0,62
1,05	1,19	1,17	1,04	1,05	0,98	1,17	1,11	1,13	0,59	0,6	0,61
1,03	1,2	1,17	1,03	1,06	0,95	1,17	1,11	1,13	0,6	0,6	0,62
1,04	1,2	1,18	1,05	1,04	0,97	1,19	1,11	1,13	0,61	0,6	0,62
1,04	1,2	1,17	1,07	1,03	0,97	1,18	1,13	1,15	0,61	0,62	0,62
1,05	1,2	1,17	1,06	1,03	0,97	1,21	1,14	1,15	0,61	0,62	0,63
1,05	1,21	1,16	1,04	1,05	0,96	1,21	1,13	1,15	0,62	0,62	0,63
1,03	1,19	1,16	1,04	1,06	0,95	1,21	1,14	1,16	0,62	0,61	0,63
1,05	1,19	1,15	1,05	1,04	0,95	1,19	1,14	1,16	0,61	0,61	0,63
1,05	1,19	1,16	1,08	1,03	0,96	1,19	1,13	1,16	0,61	0,61	0,62
1,04	1,2	1,18	1,06	1,05	0,98	1,22	1,13	1,16	0,62	0,62	0,63
1,06	1,19	1,18	1,06	1,04	0,98	1,22	1,14	1,16	0,61	0,62	0,63
1,05	1,19	1,18	1,05	1,04	0,99	1,21	1,14	1,16	0,61	0,62	0,64
1,06	1,2	1,18	1,06	1,04	0,98	1,23	1,15	1,16	0,62	0,62	0,63
1,06	1,22	1,18	1,06	1,06	0,95	1,22	1,15	1,17	0,61	0,62	0,63
1,06	1,2	1,19	1,04	1,04	0,99	1,22	1,16	1,16	0,6	0,61	0,62
1,07	1,21	1,18	1,05	1,05	0,94	1,21	1,14	1,18	0,6	0,61	0,62
1,06	1,19	1,18	1,02	1,04	0,98	1,2	1,15	1,16	0,6	0,61	0,62
1,06	1,2	1,16	1,05	1,05	0,94	1,21	1,14	1,17	0,59	0,6	0,62
1,04	1,2	1,17	1,03	1,05	0,97	1,22	1,16	1,17	0,6	0,6	0,62
1,06	1,19	1,17	1,07	1,03	0,96	1,2	1,16	1,17	0,6	0,61	0,61
1,04	1,2	1,16	1,03	1,05	0,95	1,21	1,15	1,17	0,61	0,6	0,62
1,06	1,18	1,15	1,04	1,01	0,91	1,2	1,13	1,15	0,6	0,6	0,61
1,03	1,17	1,15	1,04	1	0,96	1,19	1,15	1,16	0,6	0,61	0,62
1,03	1,17	1,16	1,04	1	0,95	1,2	1,15	1,16	0,6	0,61	0,62
1,04	1,17	1,16	1,02	1,02	0,95	1,21	1,14	1,16	0,61	0,61	0,62
1,04	1,19	1,16	1,03	1,04	0,93	1,2	1,15	1,17	0,6	0,61	0,63

1,03	1,19	1,16	1,02	1,04	0,94	1,21	1,14	1,18	0,6	0,6	0,63
1,02	1,18	1,16	1,03	1,02	0,96	1,21	1,16	1,16	0,6	0,61	0,62
1,07	1,17	1,15	1,06	1,02	0,93	1,21	1,15	1,17	0,6	0,61	0,63
1,04	1,18	1,17	1,02	1,03	0,97	1,21	1,15	1,16	0,6	0,6	0,62
1,05	1,17	1,14	1,05	1,01	0,95	1,21	1,15	1,16	0,59	0,6	0,62
1,04	1,18	1,15	1,03	1,03	0,94	1,21	1,14	1,17	0,59	0,6	0,62
1,03	1,18	1,14	1,02	1,03	0,94	1,22	1,15	1,17	0,61	0,6	0,62
1,04	1,19	1,15	1,03	1,05	0,92	1,21	1,14	1,16	0,6	0,6	0,61
1,09	1,21	1,2	1,04	1,01	0,95	1,19	1,14	1,14	0,6	0,61	0,62
1,1	1,23	1,21	1,07	1,01	0,95	1,18	1,14	1,15	0,61	0,61	0,62
1,08	1,24	1,19	1,03	1,04	0,95	1,21	1,13	1,15	0,61	0,61	0,62
1,09	1,21	1,19	1,06	1,02	0,95	1,19	1,15	1,16	0,6	0,61	0,61
1,07	1,2	1,16	1,04	1,03	0,93	1,19	1,13	1,16	0,61	0,61	0,63
1,05	1,2	1,15	1,02	1,03	0,94	1,22	1,14	1,16	0,63	0,63	0,64
1,03	1,19	1,16	1,03	1,02	0,95	1,21	1,14	1,16	0,63	0,62	0,64
1,04	1,19	1,16	1,04	1,01	0,95	1,21	1,15	1,16	0,61	0,63	0,63
1,04	1,17	1,15	1,02	1,01	0,95	1,22	1,14	1,16	0,62	0,62	0,63
1,03	1,17	1,15	1,04	1,01	0,95	1,22	1,15	1,17	0,62	0,62	0,64
1,04	1,17	1,15	1,01	1,03	0,95	1,21	1,14	1,16	0,61	0,63	0,63
1,02	1,17	1,14	1,04	1,01	0,95	1,2	1,14	1,16	0,62	0,62	0,62
1,03	1,17	1,15	1,03	1,01	0,96	1,22	1,14	1,16	0,62	0,62	0,63
1,03	1,18	1,16	1,05	1,01	0,95	1,21	1,14	1,16	0,62	0,62	0,63
1,04	1,18	1,16	1,04	1,02	0,97	1,22	1,14	1,16	0,62	0,62	0,63
1,03	1,17	1,14	1,05	1,04	0,95	1,23	1,15	1,18	0,63	0,62	0,63
1,03	1,17	1,14	1,04	1,02	0,96	1,22	1,13	1,16	0,62	0,62	0,63
1,02	1,16	1,13	1,05	1,03	0,94	1,2	1,13	1,17	0,61	0,62	0,63
1,02	1,17	1,12	1,03	1,03	0,93	1,2	1,12	1,16	0,61	0,62	0,63
1,04	1,17	1,12	1,04	1,02	0,94	1,2	1,12	1,16	0,61	0,61	0,63
1,04	1,17	1,13	1,02	1,02	0,94	1,21	1,12	1,15	0,62	0,61	0,62
1,02	1,18	1,13	1,03	1,02	0,94	1,2	1,13	1,16	0,61	0,62	0,63
1,03	1,17	1,13	1,04	1,01	0,94	1,19	1,12	1,14	0,6	0,62	0,62
1,03	1,18	1,15	1,03	1,01	0,95	1,19	1,11	1,12	0,61	0,61	0,62
1,03	1,17	1,14	1,02	1,01	0,96	1,19	1,12	1,14	0,61	0,61	0,62
1,01	1,17	1,13	1,04	1,01	0,95	1,2	1,13	1,13	0,61	0,61	0,62
1,03	1,17	1,13	1,04	1,02	0,93	1,18	1,12	1,14	0,61	0,6	0,62
1,04	1,17	1,14	1,03	1,01	0,92	1,16	1,1	1,13	0,6	0,6	0,62
1,04	1,17	1,13	1,04	1	0,93	1,16	1,1	1,12	0,6	0,6	0,6
1,02	1,16	1,12	1,03	1,01	0,91	1,15	1,09	1,12	0,6	0,59	0,61
1,03	1,14	1,12	1,03	1	0,93	1,17	1,1	1,12	0,6	0,6	0,61
1,01	1,16	1,12	1,03	1,01	0,94	1,17	1,09	1,11	0,6	0,6	0,6
1,02	1,16	1,12	1,03	1,02	0,94	1,17	1,09	1,11	0,6	0,6	0,6
1,01	1,16	1,13	1,04	1,02	0,95	1,17	1,09	1,1	0,6	0,59	0,6
1	1,14	1,11	1,04	1,01	0,94	1,18	1,1	1,11	0,59	0,6	0,6
1,02	1,15	1,11	1,03	1,03	0,96	1,16	1,09	1,11	0,59	0,6	0,6
0,99	1,14	1,11	1,04	1,01	0,95	1,17	1,1	1,11	0,6	0,6	0,6
1	1,15	1,1	1,03	1,03	0,96	1,16	1,09	1,11	0,59	0,6	0,6
1	1,15	1,11	1,04	1,04	0,94	1,16	1,09	1,11	0,58	0,6	0,6
1,01	1,15	1,12	1,03	1,03	0,96	1,15	1,09	1,1	0,6	0,59	0,6

1,02	1,15	1,11	1,07	1,01	0,95	1,16	1,1	1,11	0,59	0,59	0,6
1,01	1,15	1,13	1,04	1,01	0,97	1,15	1,1	1,1	0,59	0,59	0,59

Αρμονικές Τάσης								
5η			**11η**			**13η**		
1η Φάση	**2η Φάση**	**3η Φάση**	**1η Φάση**	**2η Φάση**	**3η Φάση**	**1η Φάση**	**2η Φάση**	**3η Φάση**
1,13	1,33	1,35	0,91	1,04	1,05	0,56	0,67	0,63
1,12	1,35	1,35	0,92	1,04	1,05	0,56	0,67	0,64
1,15	1,34	1,37	0,91	1,05	1,04	0,57	0,67	0,63
1,15	1,34	1,37	0,92	1,04	1,05	0,56	0,67	0,64
1,15	1,34	1,38	0,91	1,05	1,04	0,57	0,67	0,64
1,13	1,35	1,36	0,92	1,04	1,05	0,56	0,68	0,63
1,14	1,34	1,38	0,9	1,05	1,04	0,56	0,67	0,64
1,14	1,36	1,36	0,91	1,05	1,04	0,55	0,68	0,63
1,14	1,34	1,37	0,91	1,03	1,04	0,57	0,67	0,63
1,14	1,36	1,37	0,91	1,04	1,04	0,55	0,67	0,62
1,16	1,36	1,37	0,9	1,04	1,04	0,56	0,67	0,64
1,16	1,36	1,38	0,91	1,03	1,03	0,57	0,67	0,63
1,15	1,37	1,38	0,9	1,04	1,03	0,56	0,67	0,63
1,16	1,36	1,39	0,91	1,05	1,03	0,56	0,67	0,63
1,16	1,36	1,39	0,91	1,04	1,04	0,56	0,68	0,62
1,15	1,36	1,39	0,9	1,04	1,03	0,56	0,67	0,62
1,15	1,37	1,39	0,91	1,05	1,03	0,56	0,68	0,62
1,16	1,38	1,38	0,89	1,03	1,03	0,55	0,66	0,62
1,15	1,37	1,4	0,91	1,05	1,05	0,57	0,68	0,63
1,14	1,37	1,38	0,91	1,04	1,03	0,56	0,68	0,62
1,14	1,36	1,38	0,91	1,04	1,03	0,56	0,66	0,63
1,14	1,36	1,37	0,91	1,04	1,03	0,56	0,66	0,64
1,14	1,34	1,38	0,9	1,04	1,02	0,56	0,67	0,64
1,14	1,34	1,36	0,9	1,04	1,04	0,57	0,68	0,63
1,13	1,35	1,35	0,91	1,03	1,04	0,55	0,68	0,64
1,14	1,34	1,37	0,9	1,04	1,03	0,55	0,68	0,63
1,13	1,35	1,37	0,9	1,04	1,03	0,56	0,67	0,64
1,13	1,35	1,36	0,9	1,04	1,03	0,56	0,66	0,63
1,14	1,34	1,36	0,9	1,04	1,03	0,56	0,68	0,63
1,13	1,34	1,37	0,91	1,04	1,04	0,55	0,68	0,63
1,14	1,34	1,36	0,91	1,03	1,05	0,56	0,67	0,64
1,13	1,33	1,36	0,91	1,05	1,05	0,56	0,67	0,64
1,12	1,34	1,35	0,91	1,05	1,05	0,55	0,67	0,64
1,13	1,33	1,36	0,92	1,05	1,05	0,57	0,67	0,64
1,14	1,32	1,35	0,91	1,05	1,05	0,57	0,67	0,64
1,13	1,33	1,34	0,92	1,06	1,06	0,57	0,67	0,64
1,12	1,34	1,34	0,92	1,04	1,06	0,57	0,68	0,64
1,13	1,32	1,34	0,92	1,05	1,06	0,57	0,68	0,63
1,12	1,31	1,35	0,92	1,05	1,05	0,57	0,67	0,64
1,12	1,33	1,34	0,91	1,05	1,06	0,56	0,68	0,63

1,13	1,32	1,34	0,91	1,05	1,06	0,56	0,68	0,64
1,12	1,32	1,36	0,91	1,05	1,05	0,57	0,67	0,64
1,14	1,33	1,36	0,91	1,05	1,05	0,57	0,68	0,65
1,14	1,33	1,36	0,9	1,04	1,04	0,57	0,67	0,64
1,14	1,33	1,36	0,91	1,05	1,05	0,58	0,68	0,65
1,12	1,33	1,35	0,93	1,04	1,04	0,57	0,68	0,63
1,12	1,32	1,33	0,93	1,06	1,05	0,57	0,68	0,65
1,12	1,33	1,34	0,94	1,06	1,07	0,57	0,69	0,65
1,12	1,34	1,35	0,96	1,08	1,1	0,58	0,7	0,66
1,13	1,32	1,35	0,95	1,09	1,08	0,58	0,69	0,66
1,13	1,32	1,36	0,95	1,1	1,09	0,59	0,69	0,66
1,12	1,33	1,35	0,97	1,11	1,09	0,58	0,71	0,66
1,12	1,34	1,36	0,96	1,09	1,1	0,58	0,7	0,65
1,14	1,34	1,35	0,96	1,1	1,11	0,59	0,7	0,67
1,14	1,33	1,35	0,97	1,1	1,09	0,59	0,7	0,66
1,13	1,32	1,36	0,97	1,1	1,11	0,58	0,71	0,67
1,12	1,33	1,35	0,98	1,12	1,11	0,6	0,71	0,67
1,13	1,34	1,35	0,98	1,11	1,13	0,6	0,71	0,68
1,13	1,34	1,35	0,99	1,11	1,12	0,61	0,72	0,67
1,12	1,34	1,35	0,97	1,11	1,11	0,6	0,72	0,67
1,14	1,33	1,36	0,98	1,12	1,11	0,61	0,7	0,67
1,13	1,32	1,36	0,98	1,12	1,12	0,6	0,72	0,68
1,13	1,34	1,37	0,99	1,1	1,1	0,61	0,71	0,68
1,15	1,34	1,38	0,98	1,1	1,1	0,61	0,72	0,68
1,14	1,36	1,37	0,98	1,1	1,11	0,6	0,73	0,68
1,13	1,35	1,37	0,97	1,1	1,09	0,61	0,72	0,68
1,14	1,36	1,37	0,96	1,09	1,09	0,6	0,71	0,68
1,13	1,36	1,37	0,98	1,11	1,1	0,61	0,73	0,68
1,16	1,35	1,38	0,98	1,1	1,08	0,61	0,7	0,68
1,14	1,35	1,38	0,99	1,09	1,09	0,62	0,71	0,67
1,13	1,34	1,37	0,97	1,11	1,1	0,6	0,72	0,67
1,13	1,34	1,37	0,99	1,1	1,1	0,61	0,72	0,68
1,13	1,33	1,35	0,98	1,12	1,11	0,61	0,72	0,68
1,12	1,31	1,35	0,98	1,1	1,09	0,6	0,7	0,66
1,11	1,32	1,33	0,98	1,1	1,1	0,58	0,71	0,67
1,12	1,31	1,35	0,98	1,1	1,1	0,59	0,71	0,66
1,13	1,31	1,35	0,98	1,11	1,1	0,6	0,7	0,66
1,11	1,33	1,34	0,98	1,1	1,11	0,58	0,71	0,67
1,11	1,32	1,35	0,97	1,1	1,09	0,58	0,71	0,66
1,11	1,33	1,33	0,98	1,1	1,09	0,59	0,7	0,67
1,11	1,33	1,34	0,98	1,09	1,1	0,59	0,7	0,66
1,11	1,32	1,33	0,98	1,1	1,1	0,59	0,7	0,67
1,12	1,31	1,35	0,98	1,1	1,12	0,59	0,7	0,67
1,12	1,31	1,35	0,97	1,1	1,1	0,59	0,71	0,66
1,12	1,33	1,35	0,98	1,11	1,11	0,58	0,7	0,67
1,13	1,32	1,35	0,97	1,11	1,11	0,58	0,71	0,66
1,13	1,33	1,34	0,97	1,1	1,11	0,58	0,71	0,66
1,13	1,32	1,35	0,97	1,09	1,12	0,58	0,71	0,68
1,12	1,33	1,35	0,97	1,09	1,11	0,6	0,71	0,66
1,13	1,32	1,34	0,98	1,09	1,11	0,6	0,71	0,68

1,12	1,33	1,34	0,97	1,11	1,11	0,59	0,72	0,67
1,12	1,33	1,35	0,98	1,1	1,11	0,6	0,71	0,67
1,11	1,32	1,35	0,97	1,12	1,11	0,59	0,72	0,67
1,12	1,32	1,35	0,98	1,09	1,11	0,59	0,72	0,67
1,12	1,34	1,35	0,97	1,1	1,12	0,6	0,71	0,68
1,13	1,34	1,37	0,97	1,09	1,11	0,59	0,7	0,68
1,15	1,34	1,36	0,98	1,1	1,12	0,61	0,71	0,68
1,15	1,34	1,36	0,99	1,11	1,13	0,6	0,72	0,67
1,14	1,33	1,36	0,98	1,11	1,14	0,6	0,72	0,68
1,13	1,34	1,35	0,98	1,12	1,13	0,6	0,71	0,69
1,12	1,33	1,35	0,98	1,13	1,14	0,6	0,71	0,68
1,12	1,33	1,35	1	1,13	1,13	0,59	0,72	0,68
1,11	1,33	1,34	0,97	1,11	1,11	0,59	0,7	0,67
1,12	1,33	1,34	0,98	1,11	1,11	0,59	0,71	0,67
1,11	1,32	1,33	0,97	1,13	1,13	0,6	0,72	0,68
1,12	1,31	1,34	0,98	1,13	1,13	0,6	0,71	0,68
1,11	1,31	1,34	0,98	1,11	1,13	0,59	0,71	0,68
1,12	1,3	1,34	0,99	1,13	1,14	0,61	0,72	0,68
1,12	1,31	1,34	0,98	1,13	1,13	0,61	0,71	0,68
1,12	1,32	1,34	0,98	1,12	1,14	0,59	0,72	0,68
1,11	1,31	1,34	0,98	1,12	1,14	0,6	0,72	0,68
1,13	1,31	1,34	0,98	1,14	1,14	0,6	0,72	0,69
1,12	1,31	1,35	1	1,13	1,16	0,61	0,72	0,69
1,12	1,33	1,34	1	1,15	1,16	0,61	0,73	0,69
1,12	1,32	1,34	1	1,15	1,15	0,62	0,72	0,69
1,11	1,31	1,34	0,99	1,14	1,16	0,6	0,71	0,69
1,11	1,32	1,34	1	1,14	1,16	0,6	0,72	0,69
1,11	1,32	1,34	1,01	1,14	1,15	0,6	0,72	0,69
1,12	1,32	1,35	1	1,16	1,15	0,61	0,72	0,69
1,13	1,32	1,34	1	1,15	1,15	0,6	0,73	0,69
1,13	1,32	1,34	1	1,14	1,16	0,6	0,73	0,69
1,12	1,33	1,35	1	1,16	1,15	0,61	0,72	0,69
1,13	1,32	1,36	1,01	1,17	1,17	0,61	0,73	0,69
1,13	1,32	1,34	1,02	1,17	1,18	0,6	0,73	0,69
1,11	1,33	1,34	1,03	1,17	1,18	0,59	0,73	0,68
1,12	1,32	1,33	1,04	1,16	1,18	0,61	0,73	0,68
1,11	1,32	1,33	1,04	1,17	1,18	0,6	0,73	0,68
1,11	1,32	1,33	1,03	1,17	1,18	0,6	0,72	0,68
1,12	1,31	1,34	1,02	1,16	1,18	0,61	0,71	0,67
1,11	1,31	1,34	1,02	1,17	1,19	0,6	0,72	0,69
1,1	1,31	1,32	1,02	1,19	1,19	0,62	0,74	0,7
1,1	1,3	1,33	1,03	1,17	1,19	0,62	0,73	0,69
1,11	1,29	1,33	1,03	1,19	1,18	0,61	0,73	0,69
1,1	1,31	1,32	1,04	1,18	1,17	0,62	0,73	0,7
1,13	1,31	1,34	1,03	1,17	1,19	0,61	0,73	0,69
1,11	1,3	1,34	1,03	1,17	1,19	0,6	0,73	0,69
1,11	1,3	1,34	1,02	1,17	1,18	0,6	0,72	0,68
1,11	1,31	1,32	1,02	1,18	1,18	0,6	0,72	0,68
1,11	1,31	1,33	1,02	1,17	1,19	0,61	0,73	0,69
1,1	1,3	1,33	1,02	1,18	1,18	0,6	0,73	0,68

1,11	1,31	1,33	1,03	1,17	1,18	0,61	0,73	0,68
1,1	1,31	1,33	1,02	1,18	1,18	0,62	0,72	0,69
1,11	1,29	1,34	1,01	1,17	1,17	0,61	0,71	0,68
1,13	1,31	1,34	1,02	1,17	1,18	0,62	0,74	0,69
1,12	1,33	1,34	1,03	1,16	1,17	0,62	0,72	0,69
1,11	1,32	1,34	1,02	1,18	1,17	0,63	0,73	0,7
1,12	1,33	1,33	1,02	1,16	1,18	0,61	0,73	0,68
1,11	1,32	1,33	1,02	1,16	1,18	0,61	0,74	0,7
1,11	1,32	1,34	1,02	1,17	1,17	0,63	0,74	0,71
1,11	1,3	1,34	1,01	1,17	1,17	0,62	0,73	0,71
1,1	1,31	1,34	1,01	1,16	1,17	0,61	0,74	0,69
1,11	1,31	1,33	1,01	1,16	1,16	0,61	0,73	0,7
1,12	1,3	1,34	1,01	1,17	1,16	0,61	0,74	0,69
1,12	1,31	1,32	1,02	1,15	1,17	0,62	0,73	0,68
1,11	1,3	1,33	1,02	1,15	1,16	0,61	0,72	0,69
1,12	1,3	1,33	1	1,16	1,16	0,61	0,73	0,7
1,12	1,31	1,35	1,01	1,17	1,16	0,6	0,73	0,7
1,13	1,31	1,34	1	1,16	1,16	0,6	0,72	0,69
1,12	1,3	1,33	1,01	1,18	1,19	0,62	0,73	0,7
1,1	1,3	1,33	1,01	1,18	1,18	0,62	0,72	0,7
1,11	1,3	1,32	1,01	1,17	1,19	0,61	0,74	0,69
1,1	1,29	1,33	1	1,17	1,17	0,62	0,74	0,69
1,1	1,3	1,31	1,01	1,16	1,18	0,61	0,74	0,69
1,11	1,31	1,31	1	1,16	1,17	0,61	0,72	0,7
1,1	1,3	1,33	1,02	1,16	1,18	0,61	0,74	0,7
1,11	1,3	1,33	1	1,15	1,17	0,62	0,73	0,69
1,11	1,29	1,33	1	1,14	1,15	0,61	0,72	0,69
1,11	1,3	1,32	1	1,16	1,17	0,62	0,73	0,69
1,1	1,29	1,32	1	1,15	1,16	0,62	0,73	0,69
1,11	1,29	1,32	1	1,14	1,16	0,61	0,72	0,68
1,11	1,29	1,32	1	1,14	1,15	0,6	0,72	0,69
1,1	1,3	1,31	0,99	1,13	1,15	0,61	0,72	0,69
1,11	1,28	1,32	0,99	1,13	1,15	0,6	0,71	0,69
1,1	1,29	1,32	0,99	1,13	1,16	0,61	0,72	0,69
1,11	1,28	1,32	0,98	1,13	1,13	0,61	0,71	0,68
1,1	1,3	1,31	0,98	1,12	1,12	0,61	0,71	0,67
1,11	1,29	1,33	0,97	1,12	1,12	0,6	0,7	0,67
1,1	1,28	1,31	0,98	1,12	1,13	0,6	0,71	0,67
1,1	1,3	1,31	0,98	1,11	1,13	0,6	0,71	0,67
1,1	1,28	1,31	0,99	1,11	1,13	0,61	0,71	0,68
1,08	1,3	1,31	0,98	1,11	1,12	0,59	0,71	0,66
1,1	1,29	1,32	0,98	1,12	1,11	0,59	0,71	0,67
1,1	1,3	1,31	0,97	1,11	1,11	0,6	0,7	0,67
1,09	1,31	1,32	0,97	1,11	1,11	0,59	0,7	0,67
1,11	1,29	1,32	0,98	1,1	1,11	0,6	0,7	0,66

5.7.4 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν εξαχθεί τα εξής συμπεράσματα:

- Αρχικά όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1 η ολική αρμονική παραμόρφωση THD της τάσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% (ενώ για του ρεύματος δεν υπάρχουν σαφή όρια). Όπως παρατηρούμε από τις μετρήσεις υπάρχουν στιγμές που το THD της τάσης ξεπερνά το όριο του 5% αγγίζοντας την τιμή του 7% ενώ όσον αφορά το ρεύμα φθάνει στο 12%.

- Επίσης, όπως φάνηκε από τους πίνακες όπου παρουσιάστηκαν οι αριθμητικές τιμές των αρμονικών, τόσο στις αρμονικές ρεύματος όσο και της τάσης, οι τρείς φάσεις έχουν διαφορετικές τιμές ακόμη και σε διαστήματα όπου στα παλμογραφήματα δεν διακρίνεται κάποια διαφορά. Οι ασύμμετρες αυτές παραμορφώσεις μεταξύ των τριών φάσεων (που μεταβάλλονται με τον χρόνο) αποδίδονται, εν γένει, στα μη γραμμικά μονοφασικά φορτία (κυρίως φωτιστικά στοιχεία τύπου LED) τα οποία κατανέμονται στις τρεις φάσεις και λειτουργούν, προφανώς, ετεροχρονισμένα.

- Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα μεταξύ των κυριαρχουσών αρμονικών ($3^η$, $5^η$, $7^η$, $9^η$, $11^η$, $13^η$), υπάρχουν διαφοροποιήσεις στη χρονική εξέλιξη ως προς το ποια είναι η μεγαλύτερη και σε ποια από τις τρεις φάσεις.

- Ακόμη ειδικά στο ρεύμα παρατηρούνται μεγάλες ποσοστιαίες μεταβολές με την πάροδο του χρόνου. Έτσι ενώ η παραμόρφωση τάσης μπορεί να μεταβληθεί πολύ λίγο, η αντίστοιχη του ρεύματος μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη.

- Εν κατακλείδι, η εισαγωγή ενεργών φίλτρων εκτιμάται ότι μπορεί να προσφέρει επίλυση των ανωτέρω προβλημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Συμπερασματικά από το κεφάλαιο 1 η ποιότητα ισχύος ορίζεται το σύνολο των φυσικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής παροχής κάτω υπό κανονικές συνθήκες τροφοδότησης, που δεν διαταράσσουν ή διακόπτουν τις διαδικασίες παραγωγής και λειτουργίας. Το πρόβλημα στην ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος υπάρχει όταν διαταραχθεί η κυματομορφή της τάσης, η κυματομορφή της έντασης ή η συχνότητα της τάσης. Μια από αυτές στις διαταραχές σύμφωνα με την συντονιστική επιτροπή των προδιαγραφών του Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) της International Electrotechnical Commission (IEC) είναι η περίπτωση των αρμονικών.

Με αποτέλεσμα τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από μη γραμμικά φορτία εισάγονται πίσω στα συστήματα τροφοδοσίας. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να αλληλοεπιδράσουν δυσμενώς με ένα ευρύ φάσμα εξοπλισμού συστήματος ισχύος, κυρίως πυκνωτές, μετασχηματιστές και κινητήρες, προκαλώντας επιπλέον απώλειες, υπερθέρμανση και υπερφόρτωση. Αυτά τα αρμονικά ρεύματα μπορούν επίσης να προκαλέσουν παρεμβολές σε γραμμές τηλεπικοινωνιών και σφάλματα στη μέτρηση ισχύος. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα στο σύστημα, οι αρμονικές μπορούν να περνούν απαρατήρητες για αρκετά χρόνια εκτός αν τύχει να γίνει κάποια προκαθορισμένη μέτρηση στην θερμοκρασία της συσκευής ή στην κυματομορφή τάσης που τροφοδοτείται.

Υπάρχουν πολλές παραδοσιακές και σύγχρονες λύσεις για την αντιμετώπιση των αρμονικών και την ποιότητα ισχύος. Μερικές από αυτές τις λύσεις διερευνούνται στο φορτίο προς ελαχιστοποιήστε την αρμονική εκπομπή ενώ οι άλλοι προτείνουν τη χρήση εξωτερικού φιλτραρίσματος εξοπλισμοί που εμποδίζουν την εξάπλωση αρμονικών στο δίκτυο. Σε αυτή την διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με τα φίλτρα κάνοντας μία μικρή περιγραφή στα παθητικά φίλτρα αλλά και μια εκτενέστερη στα ενεργά φίλτρα.

Τα ενεργά φίλτρα είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία για την εξάλειψη αρμονικών παραμορφώσεων που βασίζεται σε προηγμένες ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος. Τα ενεργά φίλτρα είναι διαθέσιμα από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και τώρα είναι σχετικά συνηθισμένα σε βιομηχανικές εφαρμογές τόσο για την αντιστάθμιση των αρμονικών όσο και για την αντιστάθμιση άεργου ισχύος (δηλαδή, διόρθωση του παράγοντα ηλεκτρονικής ισχύος).

Όσον αφορά την ναυτιλία, λόγω της παγκόσμιας ανησυχίας για την προστασία του περιβάλλοντος έχουν οδηγήσει τον IMO και ΕΕ σε νέους κανονισμούς για πιο πράσινες μεταφορές. Με αποτέλεσμα πλοία και λιμάνια να κάνουν κάποιες εργασίες μετασκευής για γίνουν πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Έτσι εκτός από τυχόν προβλήματα στην απόκτηση επιπλέον χώρου στο πλοίο και στην εκπλήρωση όλων των απαιτήσεων ασφαλείας από άποψη ενέργειας, αυτές οι προκλήσεις συνίστανται καλύπτοντας σωστά τις αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας είτε εισάγοντας την αποβολή φορτίου (μέσω προτιμησιακού χρονοδιάγραμμα ταξιδιού) ή εγκαθιστώντας πρόσθετες πηγές ενέργειας, όπως γεννήτριες καταστρώματος. Αυτές οι τροπολογίες στα υποσυστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας συνεπάγονται πράγματι μια πορεία δράσεων που σχετίζονται με τον κίνδυνο και την ασφάλεια ανάλυση του ανακαινισμένου ενεργειακού συστήματος. Ένα από τα ζητήματα που δημιουργήθηκαν είναι η διεξαγωγή μελέτης αρμονικής παραμόρφωσης (IACS, 2016). Τα περισσότερα από τα νέα συστήματα λειτουργούν σε συνδυασμό με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που επιτυγχάνουν βέλτιστη ροπή έναντι ελέγχου ταχύτητας σε ελαχιστοποιημένες απώλειες. Ωστόσο, αυτοί οι μετατροπείς προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στις κυματομορφές ρεύματος και τάσης που μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Τέλος η περιπτωσιακή μελέτη που έχει παρουσιασθεί είχε ως σκοπό τον εντοπισμό των ανωτέρω προβλημάτων της αρμονικής ποιότητας ισχύος με αποτέλεσμα να εκτιμάτε ότι η εισαγωγή κάποιου ενεργού φίλτρου επιλύει αυτά τα προβλήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ

1. Ιωάννης Προυσαλίδης, "Βασικές Αρχες της Ηλεκτροτεχνίας" Οκτώμβριος 2014
2. "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, 2010.
3. "Control Of Harmonics In Electrical Power Systems" American Bureau of Shipping ABS MAY 2006
4. H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", IEEE Press, 2007
5. R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, "Electrical Power System Quality"
6. T. Hoevenaars, Ian C. Evans, A. Lawson "New Marine Harmonic Standards" January 2010
7. Espen Skjong, Miguel Ochoa-Gimenez, Marta Molinas , Tor Arne Johansen, "Management of Harmonic Propagation in a Marine Vessel by use of Optimization" 2015
8. "Harmonic Filtering" NHP Electrical Engineering Products Pty Ltd
9. H. Akagi "Modern active filters and traditional passive filters" 2006
10. J. Mindykowski2 , E. Szmit1 , T. Tarasiuk, "Electric power quality and ship's safety" January 2004
11. Janusz Mindykowski , "Power quality on ships: today and tomorrow's challenges" December 2014
12. João Afonso, Carlos Couto, Júlio Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory" September 2000
13. Anju Jacob, Babitha T Abraham, Nisha Prakash, Riya Philip, "A Review of Active Power Filters In Power System Applications" June 2014
14. M.El-Habrouk, M.K.Darwish and PMehta, "Active power filters: A review" Octomber 2000
15. R. Senthil kumar, R. Surya Prakash, B. Yokesh Kiran, Anshuman Sahana "Reduction and Elimination of Harmonics using Power Active Harmonic Filter" , July 2019
16. Ankita P. Bagde, Rupali B. Ambatkar, Rupali G. Bhure, Prof. Bhushan S.

Rakhonde , “Power Quality Improvement By Series Active Power Filter- A Review” January 2017

17. Edson H. Watanabe, Maurício Aredes, Hirofumi Akagi, “The P-Q Theory For Active Filter Control: Some Problems And Solutions “ March 2004
18. Moinuddin K Syed, Dr. Bv Sanker Ram “Instantaneous Power Theory Based Active Power Filter: A Matlab/ Simulink Approach“ 2008
19. Xiao-Yan Xu, Janusz Mindykowski, C. L. Philip Chen, “Study on Hybrid Filtering Solution for Marine Electric Network” 2010
20. Reyes S. Herrera and Patricio Salmerón “Instantaneous Reactive Power Theory: A Reference in the Nonlinear Loads Compensation “ June 2009
21. E. H. Watanabe Senior Member, IEEE, J. L. Afonso Member IEEE, J. G. Pinto , Student Member IEEE, L. F. C. Monteiro Member, IEEE, M. Aredes Member IEEE and H. Akagi5 , Fellow IEEE “Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids” June 15-18 2010
22. https://electrical-engineering-portal.com/harmonic-filters
23. https://www.metroid.net.au/engineering/harmonic-filtering/
24. https://www.electrical-installation.org/enwiki/Harmonic_filtering
25. https://www.nhp.com.au/
26. https://www.ecmweb.com/content/article/20887330/mitigating-harmonics-in-industrial-environments
27. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/series-active-filter