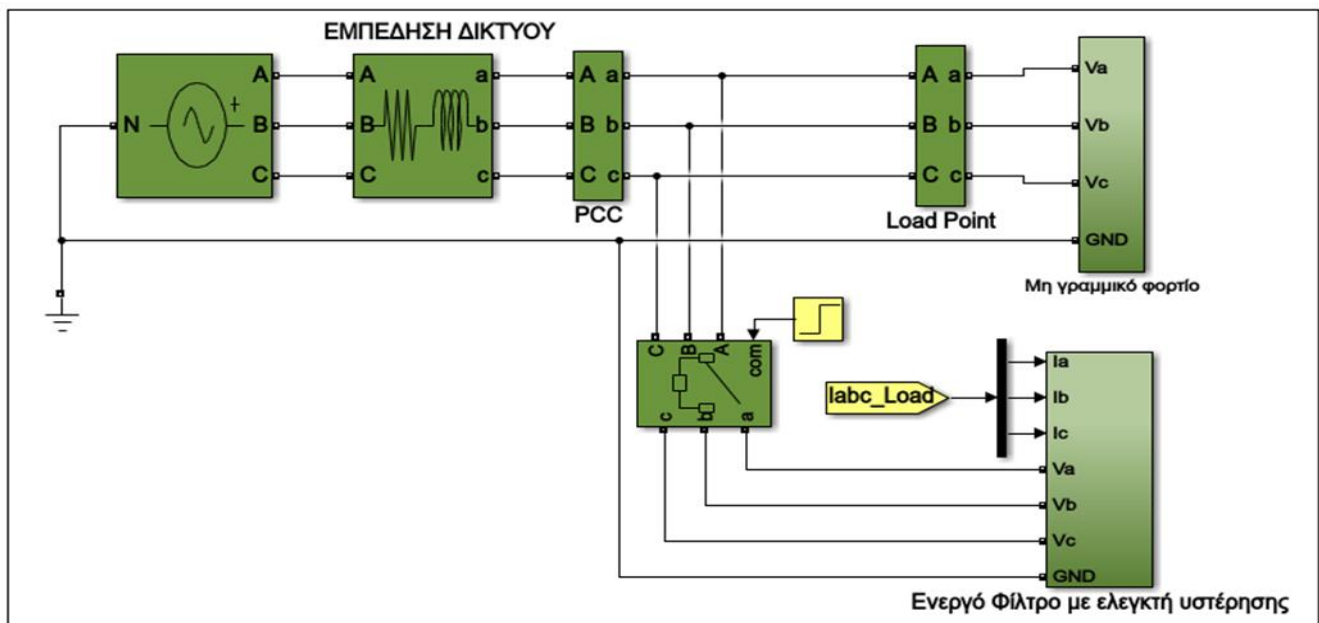


#### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### «ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΤΡΙΤΟΓΕΝΗ ΤΟΜΕΑ»



**Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

**Γεώργιος Σκουμής Α.Μ. 82**

**Επιβλέπων**

**Γεώργιος Ιωαννίδης, Καθηγητής, Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών  
Μηχανικών**

**Αθήνα, Ιούνιος 2019**

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b> | <b>«Σχεδίαση και Προσομοίωση Παράλληλων Ενεργών Φίλτρων για τον Περιορισμό Αρμονικών σε Κτίρια Τριτογενή Τομέα»</b> |
| <b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>             | <b>Γεώργιος Σκουμής Α.Μ. 82</b>   |
| <b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>            | <b>Γεώργιος Ιωαννίδης , Καθηγητής Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών</b>                                       |
| <b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>      | <b>2018-19</b>  |

## Σύνοψη

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Σχεδίαση και προσομοίωση παράλληλων ενεργών φίλτρων για τον περιορισμό αρμονικών σε κτίρια τριτογενή τομέα» έχει εκπονηθεί από τον Σκουμή Γεώργιο (Α.Μ.:82), στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη της συμπεριφοράς ενός μη γραμμικού φορτίου, πριν και μετά την σύνδεση ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου για την εξάλειψη των αρμονικών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων, υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή κυρίου Γ. Ιωαννίδη.

Τα εργαλεία μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι η εμπειρική προσέγγιση μέσω προσομοίωσης ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου με την βοήθεια του λογισμικού Matlab/ Simulink. Η διπλωματική διαρθρώνεται σε πέντε τμήματα. Στα τρία πρώτα κεφάλαια γίνεται μία θεωρητική προσέγγιση στην ποιότητα ισχύος, στα πρότυπα αρμονικών παραμορφώσεων και στο κύριο μέρος που είναι τα φίλτρα εξάλειψης αρμονικών. Στα δύο τελευταία κεφάλαια παρουσιάζεται η προσομοίωση των παράλληλων ενεργών φίλτρων και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα:

Στο 1ο κεφάλαιο ορίζεται η έννοια της ποιότητας ισχύος και αναφέρονται οι διαταραχές που μπορούν να συμβούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο και μπορούν να το επηρεάσουν.

Στο 2ο κεφάλαιο αναφέρονται τα διεθνή και Ελληνικά πρότυπα που ορίζουν τα όρια των διαταραχών αυτών, ώστε να λειτουργεί ένα δίκτυο όπως αυτό ορίζεται.

Στο 3ο κεφάλαιο ολοκληρώνεται το θεωρητικό μέρος της εργασίας, αναλύοντας τα είδη των φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των αρμονικών.

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται σχεδίαση και προσομοίωση ενός ενεργού παράλληλου φίλτρου χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον του Simulink, του λογισμικού Matlab.

Στο 5ο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

**Λέξεις Κλειδιά :** Αρμονικές, Μοντελοποίηση, Ποιότητα Ισχύος, Παθητικά και Ενεργά Φίλτρα.

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b><i>POST-GRADUATE THESIS:</i></b> | <b>« Design and simulation of parallel active filters for the limitation of harmonics in buildings of tertiary sector »</b> |
| <b><i>STUDENT:</i></b>              | <b>George Skoumis A.M. 82</b>   |
| <b><i>SUPERVISOR:</i></b>           | <b>George Ioannidis, Professor Department of Electrical and Electronics Engineering</b>                                     |
| <b><i>ACADEMIC YEAR:</i></b>        | <b>2018-19</b>  |

## Summary

The present dissertation entitled “Design and simulation of parallel active filters for the limitation of harmonics in buildings of tertiary sector” is prepared by Skoumis George (Registry Number:82), within the framework of the Postgraduate Studies Program of the Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, of the University of West Attica. The dissertation’s main aim is to highlight the behavior of a non-linear load, before and after the connection of a parallel active filter for the elimination of the harmonics and analysis of results, under the guidance of the teaching professor Mr. G. Ioannidis.

The methodology tools that were used include the empirical approach through simulation of a parallel active filter by means of the Matlab/ Simulink software. The dissertation is structured in five sections. The first three chapters contain a theoretical approach to the power quality, harmonic distortion standards and the main part, which contains the harmonics elimination filters. The last two chapters present the simulation of a parallel active filter and, lastly, the dissertation’s conclusions are set out. Specifically:

In the 1st chapter, the meaning of the power quality is defined and disorders, which may occur in a grid and have an impact on it, are mentioned.

In the 2nd chapter, the international and Greek standards are mentioned, which define the limits of such disorders, so that a grid is functioning as defined.

In the 3rd chapter, the theoretical part of the dissertation finishes with the analysis of the types of filters used for the elimination of the harmonics.

In the 4th chapter, an active parallel filter is constructed and simulated by means of the Simulink through its Matlab platform.

In the 5th and last chapter, the present dissertation’s conclusions are presented.

**Keywords** Harmonic, Modeling, Power Quality, Filters, passive and active filters

Copyright © Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, Σχολής Μηχανικών, Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας:

Και πρώτα απ' όλα, τον υπεύθυνο Καθηγητή Κ. Γ. Ιωαννίδη, για τη συνεχή καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη, τις ουσιώδεις συμβουλές, καθώς και την αδιάκοπη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους μου και τους συναδέλφους μου και ιδιαίτερα τον συμφοιτητή μου Γ. Καββαδά για την πολύτιμη στήριξη και βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|   |    |
|---|----|
| <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....   | 1  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ</b> .....                 | 4  |
| 1.1. Γενικά για την Ποιότητα Ισχύος .....                           | 4  |
| 1.2. Μεταβολές της Τάσης .....                                      | 6  |
| 1.3. Φλίκερ (Flicker) Διακύμανση Τάσης (Voltage Fluctuations).....  | 7  |
| 1.4. Βυθίσεις Τάσης (Voltage dip).....                              | 8  |
| 1.5. Θόρυβος (Noise).....   | 9  |
| 1.6. Μεταβατικές Υπερτάσεις.....                                    | 10 |
| 1.7. Εγκοπές Τάσης (Notching) .....                                 | 11 |
| 1.8. Διακοπές Τάσης .....   | 12 |
| 1.9. Παραμόρφωση Κυματομορφής Παρουσία Συνεχούς Τάσης.....          | 13 |
| 1.10. Διαταραχές Συχνότητας .....                                   | 13 |
| 1.11. Ασυμμετρία Φάσεων .....                                       | 15 |
| 1.12. Αρμονικές .....   | 16 |
| 1.12.1. Γενικά για τις Αρμονικές .....                              | 16 |
| 1.12.2. Ενδιάμεσες Αρμονικές.....                                   | 18 |
| 1.12.3. Αιτίες Δημιουργίας Αρμονικών.....                           | 19 |
| 1.12.4. Πηγές Αρμονικών Διαταραχών .....                            | 20 |
| 1.12.5. Συνέπειες από τη Δημιουργία Αρμονικών.....                  | 22 |
| 1.12.6. Αντιμετώπιση Αρμονικών .....                                | 26 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ</b> ..... | 28 |
| 2.1. Εισαγωγή στα Πρότυπα Αρμονικών.....                            | 28 |
| 2.2. Πρότυπο IEEE – 519 .....                                       | 29 |
| 2.3. Πρότυπα IEC .....  | 32 |
| 2.3.1. Πρότυπο IEC 61000-3-2.....                                   | 32 |
| 2.3.2. Πρότυπο IEC 61000-3-4.....                                   | 33 |
| 2.3.3. Πρότυπο IEC 61000-2-4.....                                   | 36 |
| 2.3.4. Πρότυπο IEC 61000-2-1.....                                   | 38 |
| 2.3.5. Πρότυπα ΕΛΟΤ .....   | 39 |
| 2.3.6. Πρότυπο EN 50160 .....                                       | 39 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΦΙΛΤΡΑ</b> .....                          | 46 |
| 3.1. Γενικά για τα Φίλτρα .....                                     | 46 |
| 3.2. Αρμονικά Φίλτρα .....  | 47 |
| 3.2.1. Παθητικά Αρμονικά Φίλτρα .....                               | 49 |
| 3.3. Ενεργά Αρμονικά Φίλτρα .....                                   | 51 |
| 3.3.1. Ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος .....                           | 54 |
| 3.3.2. Ενεργά φίλτρα πηγής τάσης .....                              | 56 |
| 3.3.3. Παράλληλα ενεργά φίλτρα.....                                 | 58 |
| 3.3.4. Μετασχηματισμός Clarke ( $\alpha\beta 0$ ).....              | 60 |
| 3.3.5. Θεωρία στιγμιαίας ισχύος (p-q theory) .....                  | 63 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.6. Ανάλυση θεωρίας p-q.....   | 63         |
| 3.3.6.1. Ύπαρξη ομοπολικής συνιστώσας.....                              | 67         |
| 3.3.6.2. Ύπαρξη Παραμορφώσεων στις Τάσεις και στα Ρεύματα.....          | 68         |
| 3.3.6.3. Στρατηγικές αντιστάθμισης .....                                | 70         |
| 3.3.7. Έλεγχος παράλληλων ενεργών φίλτρων.....                          | 72         |
| 3.3.8. Ενεργά φίλτρα Σειράς.....  | 84         |
| 3.3.9. Υβριδικά φίλτρα.....   | 86         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....</b>                          | <b>90</b>  |
| 4.1. Εισαγωγή.....  | 90         |
| 4.2. Ενεργό Παράλληλο Φίλτρο τριών αγωγών με ελεγκτή υστέρησης .....    | 90         |
| 4.3. Ενεργό Παράλληλο Φίλτρο τριών αγωγών με ελεγκτή PWM .....          | 97         |
| 4.4. Εφαρμογή Παράλληλου Ενεργού Φίλτρου σε Κτίριο Τριτογενή Τομέα..... | 100        |
| <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>  | <b>109</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>                                     | <b>111</b> |

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 1893, οι μηχανικοί ήρθαν αντιμέτωποι με το πρόβλημα θέρμανσης μιας μηχανής στο Hartford του Connecticut. Για να προσδιοριστεί η αιτία και για να λυθεί το πρόβλημα, εκείνοι οι μηχανικοί έκαναν αρμονικές αναλύσεις των διάφορων ηλεκτρικών κυματομορφών σε όλο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο η μηχανή ήταν συνδεδεμένη. Η τεχνολογία των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν πολύ νέα το 1893, και αυτή ήταν η πρώτη φορά που ένα πρακτικό-«ηλεκτρικό» πρόβλημα εξετάστηκε χρησιμοποιώντας την αρμονική ανάλυση ως εργαλείο. Τελικά, η πηγή της θέρμανσης της μηχανής αποδόθηκε στον συντονισμό των γραμμών μεταφοράς. Αυτό το αποτέλεσμα διήγειρε ευρείας κλίμακας συζητήσεις και ανησυχίες για τέτοιους συντονισμούς μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του ηλεκτρικού συστήματος. Τρία χρόνια νωρίτερα, οι ηλεκτρολόγοι στο Portland του Oregon, είχαν ασχοληθεί με ένα διαφορετικού τύπου πρόβλημα γραμμών μεταφοράς, που οφείλεται ενδεχομένως στις αρμονικές. Κανένα στοιχείο όμως δεν είναι γνωστό μέχρι σήμερα που να αποδίδει σε αυτούς τους ηλεκτρολόγους την πρώτη θεώρηση αρμονικής ανάλυσης. Εκείνη την εποχή αντιθέτως οι κατασκευαστές στην Ευρώπη δεν αντιμετώπισαν φαινόμενα συντονισμού των γραμμών μεταφοράς επειδή δεν χρησιμοποιούσαν υψηλή συχνότητα (125, 133, ή 140 Hz) στα συστήματα μεταφοράς ισχύος. Αυτό το πρόβλημα ήταν καθαρά αμερικάνικο (Arriilaga, et al., 1985).

Τα προβλήματα που συνδέονται με τις αρμονικές των κυματομορφών της τάσης ή και του ρεύματος έχουν «βασανίσει» τους ενεργειακούς μηχανικούς από την αρχή. Αρχικά, δεν είχε γίνει αντιληπτό ότι αυτές όντως προκαλούν προβλήματα. Στη συνέχεια όμως, οι αρμονικές έχουν αναφερθεί ως πηγή για πολλά και μεγάλα προβλήματα, αν και η μορφή με την οποία αυτές εκδηλώνονται και επιλύονται συνεχώς αλλάζει. Υπάρχει ένα συγκεκριμένο στερεότυπο για τις αρμονικές. Κάθε φορά που μια νέα εκδήλωση του φαινόμενου των αρμονικών εμφανίζεται, φέρνει μια νέα εποχή, με νέα συμπτώματα, νέες τιμές σχετικά με τις επιτρεπόμενες ανοχές στα όρια, νέες μεθόδους μέτρησης, και περισσότερη συζήτηση για όλα αυτά τα θέματα. Αν και οι μορφές εκδήλωσης του φαινόμενου μπορούν να αλλάξουν, οι θεμελιώδεις αρχές των αρμονικών παραμένουν αμετάβλητες. Με την εξέταση ιστορικών προτύπων με τα οποία οι μηχανικοί θεωρούν και προσεγγίζουν τα ζητήματα των αρμονικών, ίσως μπορούμε να ευελπιστούμε σε βελτιώσεις στο μέλλον (Arriilaga, et al., 1985).

Ο Frederic Bedell δημοσίευσε την ιστορία του εναλλασσόμενου ρεύματος το 1942. Όντας ένας από τους πρωτοπόρους, ήταν ο κατάλληλος για αυτήν την εργασία. Η εργασία του είναι μάλλον συμβατική, αρχίζοντας με τον William Stanley το 1886. Οι Αμερικανοί μηχανικοί συχνά θεωρούν



τον William Stanley ως δημιουργό των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος, αν και η συγκεκριμένη θεωρία πρέπει να περιορίζεται στο γεωγραφικό χώρο της Βόρειο Αμερικής. Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί πάντως ότι πολλοί άλλοι συνεισέφεραν σημαντικά στο θέμα των αρμονικών, στην Αμερική αλλά και τον υπόλοιπο κόσμο (Arriilaga, et al., 1985).

Το 1925, η αρμονική ανάλυση ήταν μια τυπική διαδικασία που χρησιμοποιούνταν από τους μηχανικούς για να προσεγγίσουν τα προβλήματα, αλλά που θεωρήθηκε πιο πολύ ως ένα μαθηματικό στοιχείο παρά κάτι χρήσιμο. Τεχνικά έγγραφα εκείνης της εποχής επικέντρωναν σε νέα προβλήματα, αποτελέσματα και φαινόμενα ενώ η περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε γράφονταν στο τέλος σε ένα παράρτημα. Σήμερα, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Πολλά έγγραφα γράφονται για να περιγράψουν μόνο μια νέα μέθοδο λύσης ενός παλαιού προβλήματος (Arriilaga, et al., 1985).

Στις μέρες μας, η βιβλιογραφία είναι πλήρης άρθρων σχετικά με την υπέρταση και τα ανακλώμενα κύματα που συνδέονται με την τεχνική PWM που εφαρμόζεται στα IGBT. Η σημερινή κατάσταση με τα drives από IGBT είναι συγκρίσιμη με αυτή που αντιμετώπισε ο Steinmetz το 1893. Υπάρχουν όμως και μερικές διαφορές.. Το 1893, δεν υπήρχαν παλμογράφοι ή συσκευές ανάλυσης φάσματος και drives με IGBT που χρησιμοποιούσαν την τεχνική PWM ήταν άγνωστα. Επίσης, η τάξη των αρμονικών που ενδιέφερε τότε τους μηχανικούς ήταν 13, και όχι 100 που είναι σήμερα αφού η συχνότητα λειτουργίας των IGBT είναι 5kHz ή και υψηλότερη (Arriilaga, et al., 1985).

Στις μέρες μας τα μη γραμμικά φορτία συνεχώς αυξάνονται. Εκτιμάται ότι, κατά τα επόμενα 10 χρόνια, περισσότερο από το 60% των φορτίων θα είναι μη γραμμικά. Ένας αυξανόμενος αριθμός φορτίων καταναλωτών είναι ευαίσθητος στην κακή ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας και εκτιμάται ότι τα προβλήματα ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας κοστίζουν τις βιομηχανίες δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια το χρόνο. Αν και η εκτεταμένη χρήση του αυτοματισμού των καταναλωτών και των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγικότητα, αυτά τα φορτία αποτελούν πηγή ηλεκτρικού θορύβου και αρμονικών και είναι λιγότερο ανθεκτικά στην κακή ποιότητα ισχύος. Για παράδειγμα, οι ρυθμιστές ταχύτητας (ASD) είναι λιγότερο ανθεκτικοί σε βυθίσεις τάσης, σε σύγκριση με τον κινητήρα επαγωγής. και μια βύθιση τάσης 10% ορισμένης χρονικής διάρκειας μπορεί να προκαλέσει διακοπή του ASD. Οι ASD παράγουν αρμονικές στις γραμμές και μια πηγή που περιέχει αρμονικές επηρεάζει τη λειτουργία τους, οδηγώντας σε περαιτέρω δημιουργία αρμονικών. Αυτό σημαίνει ότι τα μη γραμμικά φορτία που αποτελούν πηγή δημιουργίας αρμονικών είναι σχετικά λιγότερο ανθεκτικά στην κακή ποιότητα ισχύος που τα ίδια προκαλούν (Chattopadhyay, et al., 2010).

Η παγκόσμια αγορά φίλτρων αρμονικών αναμένεται να ξεπεράσει τα 1,1 δισεκατομμύρια δολάρια στις ΗΠΑ μέχρι το 2024 σύμφωνα με τον ιστότοπο [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com). Η αυξανόμενη ζήτηση για ποιοτικά συστήματα διανομής ενέργειας σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για χρήση μη γραμμικών φορτίων αναμένεται να οδηγήσει σε ανάπτυξη της αγοράς στο εγγύς μέλλον (Chattopadhyay, et al., 2010).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

### 1.1. Γενικά για την Ποιότητα Ισχύος

Υπό την ευρύτερη έννοιά της, η ποιότητα ισχύος είναι ένα σύνολο συνθηκών και περιορισμών που επιτρέπουν στα ηλεκτρικά συστήματα να λειτουργούν απρόσκοπτα και όπως αυτά προορίζονται. Μια ηλεκτρική κατανάλωση χωρίς την κατάλληλη ισχύ μπορεί να υπολειτουργεί, να φθαρεί πρόωρα ή και να μην λειτουργεί καθόλου (Thompson, 2007).

Η ποιότητα ισχύος (Power Quality) αφορά ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Καλύπτει φαινόμενα ήδη γνωστά, τα οποία όμως, αποκτούν διαφορετική και μεγαλύτερη σημασία στα μοντέρνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυξανόμενη χρήση ηλεκτρονικών και ηλεκτρονικών ισχύος και γενικότερα συσκευών που είναι ευαίσθητες, αλλά συγχρόνως δημιουργούν και διαταραχές, η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας και οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις του συστήματος καθιστούν την ποιότητα ισχύος σημαντική. Τόσο η ποιότητα της τάσης (voltage quality) καθώς και η ποιότητα ρεύματος (current quality) συνιστούν παράγοντες που επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του δικτύου και έχουν μεγάλη οικονομική σημασία (Thompson, 2007).

Οι εταιρίες ηλεκτρισμού, σε όλο τον κόσμο, καλούνται να αποδείξουν ότι η παρεχόμενη ισχύς ικανοποιεί τις προϋποθέσεις εκείνες που εγγυώνται τη λειτουργία των πελατών-φορτίων τους χωρίς προβλήματα. Παράλληλα οι καταναλωτές προσπαθούν να εξασφαλίσουν τις καλύτερες συνθήκες για τα φορτία τους ώστε να περιορίσουν οικονομικές απώλειες που προκαλούνται από προβλήματα στην παροχή ηλεκτρική ισχύος. Προδιαγραφές συντάσσονται από τους αρμόδιους οργανισμούς και λειτουργούν προς το παρόν, ως προτεινόμενα όρια. Η πρόβλεψη πάντως είναι ότι στο άμεσο μέλλον θα ισχύσουν ως δεσμευτικοί περιορισμοί για όλους τους εμπλεκόμενους με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Thompson, 2007).

Το δίκτυο λειτουργεί ρυθμίζοντας τις παραμέτρους εκείνες που εξασφαλίζουν την αδιάκοπη και οικονομική λειτουργία του (π.χ. ισχύς, τάση, συχνότητα). 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. (Thompson, 2007).

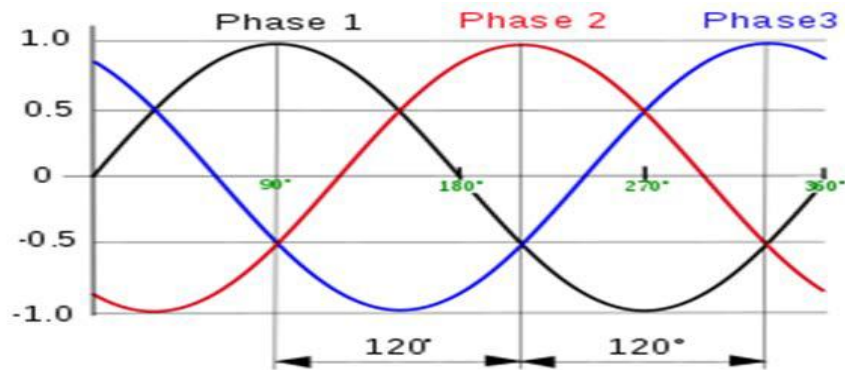
Ιδανικά η ηλεκτρική ισχύς θα είχε ημιτονοειδή μορφή με πλάτος κι συχνότητα που δίνονται από τα εθνικά πρότυπα ή της προδιαγραφές του συστήματος. Στη πραγματικότητα αυτό το ιδανικό δε θα μπορούσε να υπάρξει ποτέ. Μερικές από τι παρεκκλίσεις που συναντώνται ακολουθούν: (Akagi, et al., 2007).

- ✓ Μεταβολές της Τάσης
- ✓ Φλίκερ (Flicker)
- ✓ Βυθίσεις Τάσης
- ✓ Θόρυβος
- ✓ Μεταβατικές Υπερτάσεις
- ✓ Εγκοπές Τάσης
- ✓ Διακοπές Τάσης
- ✓ Παραμόρφωση Κυματομορφής Τάσης
- ✓ Συχνότητα
- ✓ Ασυμμετρία Φάσεων
- ✓ Αρμονικές

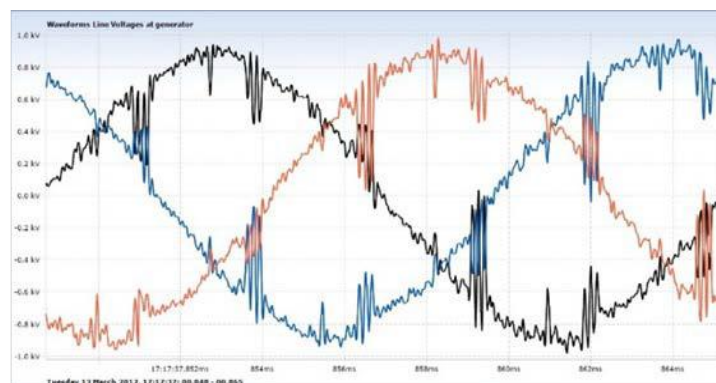
## 1.2. Μεταβολές της Τάσης

Αύξηση ή μείωση της τάσης συνήθως λόγω της μεταβολής του φορτίου του συστήματος διανομής. Μετράτε για περίοδο μιας εβδομάδας και θα πρέπει ο μέσος όρος του 95% των τιμών ( 10λεπτο) να βρίσκεται στο φάσμα  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής

Η ιδανική μορφή της τάσης θα ήταν ένα καθαρό συνημίτονο με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Όταν μιλάμε για προβλήματα ποιότητας ισχύος, εννοούμε κάθε διαταραχή στην τάση, η οποία υπονομεύει την λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης τάσης που επηρεάζονται από τις διαταραχές είναι η συχνότητα, το πλάτος, η κυματομορφή της τάσης ή του ρεύματος και η συμμετρία των τριών φάσεων (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 1.1. Ιδανική τριφασική τροφοδοσία δικτύου (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 1.2. Παραμορφωμένη τριφασική τροφοδοσία δικτύου (Akagi, et al., 2007).

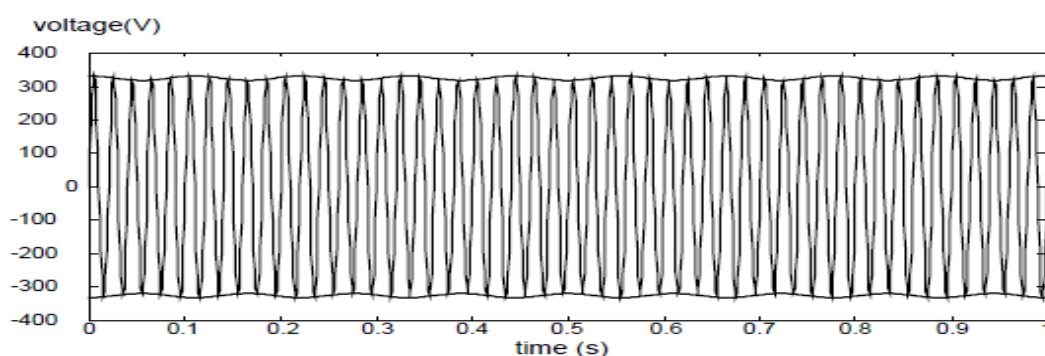
### 1.3. Φλίκερ (Flicker) Διακύμανση Τάσης (Voltage Fluctuations)

Το Flicker, ή αλλιώς η γρήγορη διακύμανση της τάσης που οδηγεί σε τρεμόπαιγμα στο φως, είναι μία οπτική ενόχληση λόγω αστάθειας της έντασης του φωτός (τρεμόπαιγμα). 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 τη 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) (Akagi, et al., 2007).

Η γρήγορη μεταβολή του μεγέθους της τάσης ονομάζεται διακύμανση τάσης (voltage fluctuation), ενώ το οπτικό ερέθισμα όπως αυτό γίνεται αντιληπτό από τον εγκέφαλό μας ονομάζεται "τρεμόπαιγμα" του φωτός (light flickering) (Akagi, et al., 2007).

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 στη θεμελιώδη (Akagi, et al., 2007).

Η αφαίρεση του προβληματικού φορτίου, ή η εγκατάσταση UPS στη γραμμή ισχύος, είναι μέθοδοι για την επίλυση αυτού του προβλήματος (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 1.3 Διακύμανση της τάσης που οδηγεί σε τρεμόπαιγμα στο φως (Akagi, et al., 2007).

## 1.4. Βυθίσεις Τάσης (Voltage dip)

Βύθιση τάσης είναι η μείωση της ενεργού τιμής της τάσης μεταξύ 0.1 και 0.9 pu<sup>1</sup>, 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 μεγάλων ασύμμετρων ρευμάτων που προκαλούνται για παράδειγμα κατά την ενεργοποίηση του (Νικόλαου, 2013).

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) (Νικόλαου, 2013).

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 υπέρ ρεύματος, ασφάλειες κτλ) καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών διακοπής του ρεύματος, όπως οι διακόπτες ισχύος, ασφάλειες κτλ. (Νικόλαου, 2013).

Από την πλευρά της εταιρίας ηλεκτρισμού, προσπάθεια μείωσης του αριθμού βυθίσεων τάσης συνεπάγεται προσπάθεια μείωσης του αριθμού σφαλμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με συχνότερη συντήρηση και επιθεώρηση του δικτύου και του εξοπλισμού. Η χρήση υπόγειων καλωδίων αντί για εναέριες γραμμές μειώνει την συχνότητα σφαλμάτων λόγω κεραυνών (Νικόλαου, 2013).

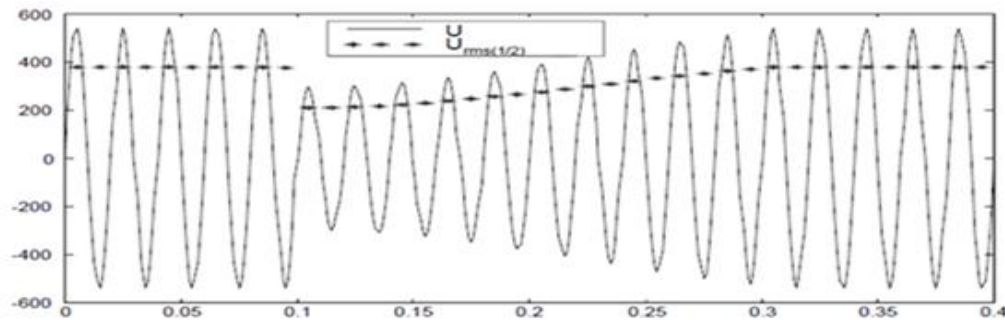
Επίσης, η βελτίωση των χρόνων λειτουργίας του συστήματος προστασίας μειώνει τη διάρκεια των βυθίσεων τάσης. Αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο συνδέεται το φορτίο με το δίκτυο μπορούν επίσης να μειώσουν την πτώση τάσης κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος (για παράδειγμα η σύνδεση από διαφορετικά σημεία του δικτύου) (Νικόλαου, 2013).

Οι βυθίσεις τάσης είναι ο κυριότερος λόγος δυσλειτουργιών των ηλεκτρικών συσκευών χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται επιπτώσεις στις διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος, στη λειτουργία των κινητήρων και συστημάτων ελέγχου (PLC) (Νικόλαου, 2013).

---

<sup>1</sup> Ανά μονάδα τιμή (per unit value) οποιαδήποτε φυσικού μεγέθους, ορίζεται από το λόγο της απόλυτης – πραγματικής τιμής του μεγέθους αυτού προς την τιμή βάσης του μεγέθους.

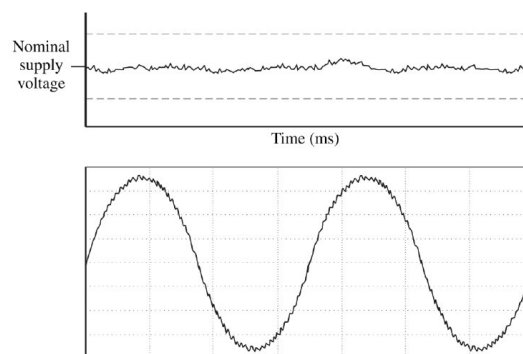
Από την πλευρά των καταναλωτών, βοήθεια μπορεί να αναζητηθεί σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (για παράδειγμα οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας - UPS) ή υποστήριξης της τάσης (DVR). Παρακάτω παρουσιάζεται κυματομορφή τάσης όπου διακρίνεται καθαρά μια βύθιση τάσης: (Νικόλαου, 2013).



Σχήμα 1.4. Κυματομορφή Βύθιση Τάσης (Νικόλαου, 2013).

## 1.5. Θόρυβος (Noise)

Ως θόρυβος ορίζονται ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα με ευρυζωνικό φασματικό περιεχόμενο μικρότερο από 200 kHz τα οποία υπερτίθενται στην τάση ή το ρεύμα του συστήματος. Θόρυβος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προκληθεί από κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος, κυκλώματα ελέγχου, εξοπλισμό ηλεκτρικού τόξου κ.ά. Τα σχετικά με το θόρυβο προβλήματα επιδεινώνονται αν η γείωση είναι ακατάλληλη, καθώς αποτυγχάνει η απομόνωση του θορύβου από το ηλεκτρικό σύστημα (Akagi, et al., 2007).



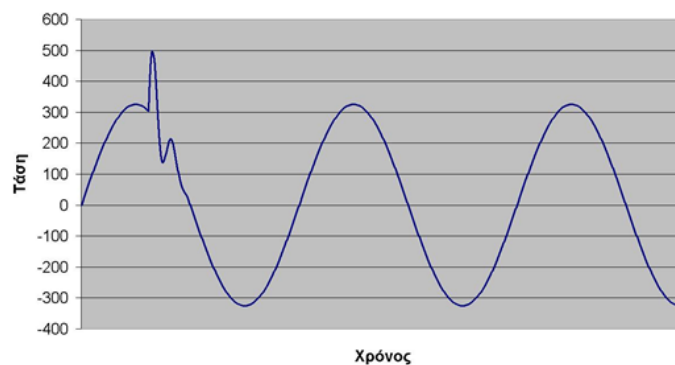
Σχήμα 1.5 Θόρυβος (Akagi, et al., 2007).

Ο θόρυβος επηρεάζει κυρίως μικροϋπολογιστές και PLC. Το πρόβλημα του θορύβου μπορεί να μετριαστεί χρησιμοποιώντας φίλτρα και μετασχηματιστές απομόνωσης (Akagi, et al., 2007).



## 1.6. Μεταβατικές Υπερτάσεις

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 αποσβεννύμενη ταλάντωση (oscillatory transient) (Akagi, et al., 2007).



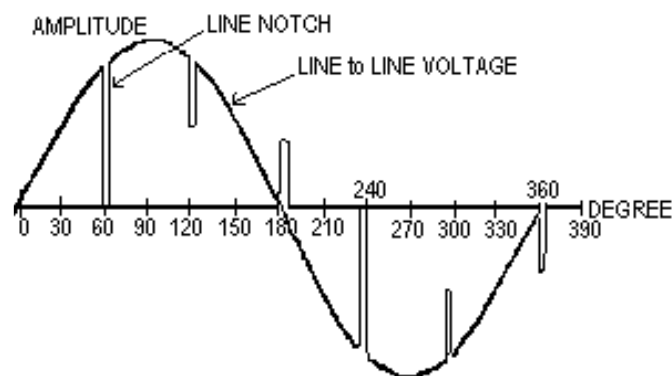
**Σχήμα 1.6** Μεταβατική Υπέρταση (Akagi, et al., 2007).

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 nsec. Οι κρουστικές υπερτάσεις μπορούν να διεγείρουν τα κυκλώματα συντονισμού ισχύος του συστήματος και να παράγουν υπερτάσεις με αποσβεννύμενη ταλάντωση. Οι υπερτάσεις με αποσβεννύμενη 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 αποσβεννύμενη ταλάντωση είναι μια τάση ή ένα ρεύμα των οποίων η στιγμιαία τιμή αλλάζει πολικότητα ταχύτατα. Οι υπερτάσεις με αποσβεννύμενη 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 (Akagi, et al., 2007).

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 (Akagi, et al., 2007).

## 1.7. Εγκοπές Τάσης (Notching)

Οι εγκοπές (notching) 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 (notching) συμβαίνουν περιοδικά και άρα εμφανίζονται συνεχώς, μπορούν να περιγραφούν 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 περιγραφεί με εξοπλισμό μετρήσεων που χρησιμοποιείται κανονικά για την ανάλυση αρμονικών. Οι εγκοπές-notching μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στη μόνωση μετασχηματιστών και γεννητριών και σε αυξημένη ευαισθησία εξοπλισμό μετρήσεων (Νικόλαου, 2013).



Σχήμα 1.7. Εγκοπές τάσης (Νικόλαου, 2013).

## 1.8. Διακοπές Τάσης

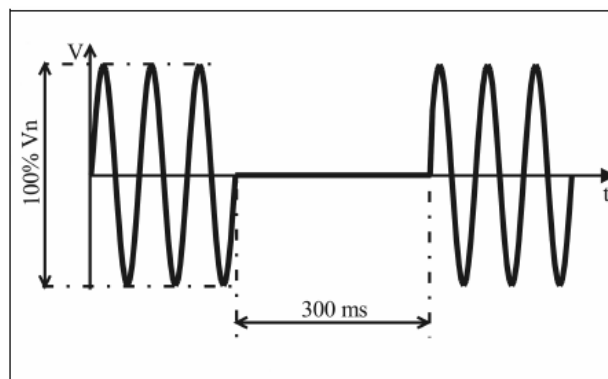
Σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές οι διακοπές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- 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 έπαψε να υπάρχει με την λειτουργία του συστήματος προστασίας και χρειάζεται αποκατάσταση επιτόπου), είτε λόγω προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης στο δίκτυο (Akagi, et al., 2007).

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 τη 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 (Akagi, et al., 2007).

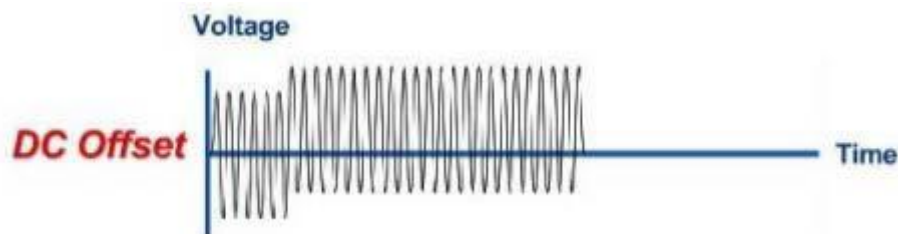
Σε εργοστασιακό περιβάλλον μία διακοπή μπορεί να προκαλέσει καταστροφική διακοπή της παραγωγικής αλυσίδας αυξάνοντας τον αριθμό των προϊόντων που απορρίπτονται ή των υλικών που απομακρύνονται. Σε μερικές περιπτώσεις, οι διακοπές μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο να καταστραφούν οι συσκευές ή ακόμα και τον τραυματισμό του προσωπικού (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 1.8 Διακοπές Τάσης (Akagi, et al., 2007).

## 1.9. Παραμόρφωση Κυματομορφής Παρουσία Συνεχούς Τάσης

Συνεχές ρεύμα (DC) μπορεί να επαχθεί σε ένα AC σύστημα διανομής, συχνά λόγω της βλάβης ανορθωτών στους διάφορους μετατροπείς AC σε DC. Το DC ρεύμα μπορεί να διαπεράσει το AC σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και να προσθέσει ανεπιθύμητο ρεύμα σε συσκευές που ήδη λειτουργούν στην ονομαστική τους τιμή. Η υπερθέρμανση και ο κορεσμός των μετασχηματιστών μπορεί να είναι το αποτέλεσμα των κυκλοφορούντων DC ρευμάτων. Όταν ένας μετασχηματιστής έρχεται σε κορεσμό, όχι μόνο ζεσταίνεται, αλλά επίσης δεν είναι σε θέση να τροφοδοτήσει με πλήρη ισχύ το φορτίο. Η επακόλουθη αλλοίωση της κυματομορφής μπορεί να δημιουργήσει περαιτέρω αστάθεια στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του φορτίου (Akagi, et al., 2007).



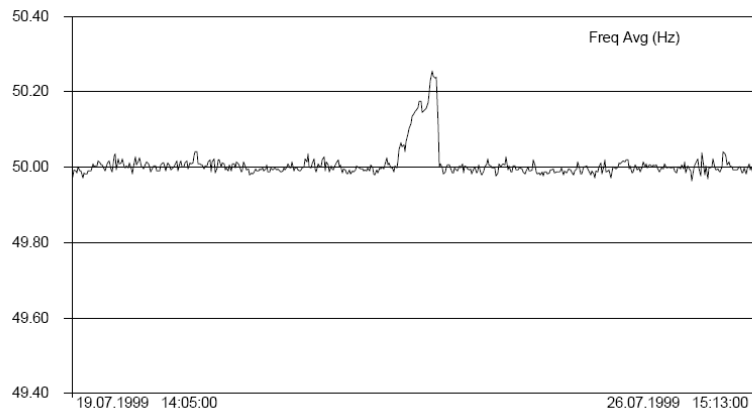
Σχήμα 1.9. Παραμόρφωση κυματομορφής παρουσία συνεχούς τάσης (Akagi, et al., 2007).

## 1.10. Διαταραχές Συχνότητας

Η μέτρηση της συχνότητας τροφοδοσίας πραγματοποιείται συχνά με βάση την ανίχνευση των περασμάτων της τάσης από το μηδέν (zero crossing detection). Εξαιτίας των μεταβατικών φαινομένων και των αρμονικών πρέπει να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές απόρριψης του πολλαπλού περάσματος από το μηδέν (Μάνιας, 2014).

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου παρατίθεται μία εικόνα που παρουσιάζει μία μικρή διαταραχή στην συχνότητα.

Το Σχήμα 1.10, παρουσιάζει την μέτρηση της συχνότητας τροφοδοσίας για διάστημα μεγαλύτερο από μια εβδομάδα. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων μία καταιγίδα προκάλεσε σφάλμα σε μια γραμμή των 35kV. Η διακύμανση είναι εμφανής κατά την απομονωμένη λειτουργία (Μάνιας, 2014).



Σχήμα 1.10. Καταγραφή από ένα πραγματικό δίκτυο ( Μάνιας, 2014).

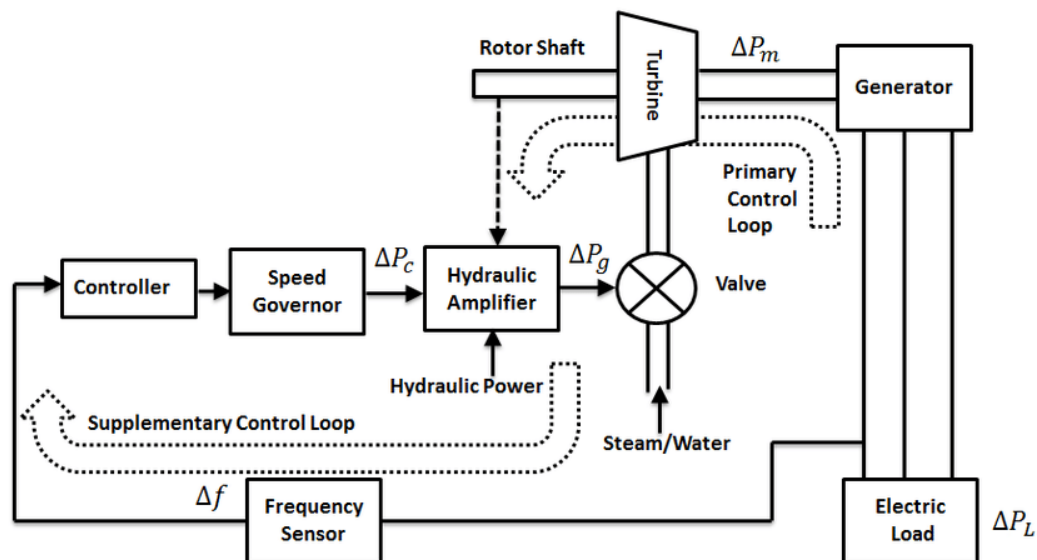
### **Αιτίες Διαταραχής**

Η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής των δρομέων των γεννητριών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συχνότητα τροφοδοσίας είναι η συχνότητα των ηλεκτρικών ταλαντώσεων του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, αυτή είναι 50 Hz (Akagi, et al., 2007).

Εάν η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης δεν τηρείται, η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας θα έχει αυξομειώσεις, λόγω των αλλαγών στην περιστροφική ταχύτητα των δρομέων των γεννητριών. Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η ταχύτητα της γεννήτριας, ή η συχνότητα του συστήματος αυξάνουν, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ελαττώνονται. Το ποσό της απόκλισης και η διάρκειά της συχνότητας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου και την απόκριση του ελέγχου αυτόματης παραγωγής στις αλλαγές των φορτίων. Οι διακυμάνσεις στη συχνότητα του δικτύου, είναι της τάξης του 1 %. Πολύ γρήγορες διακυμάνσεις της συχνότητας θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρό μηχανικό πρόβλημα, αλλά σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως τα σημερινά, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας παραμένει μέτριος ακόμη και για μεγάλες διαταραχές. Γενικότερα, όσο μεγαλύτερο είναι το σύστημα, τόσο λιγότερες είναι οι διακυμάνσεις στη συχνότητα (Akagi, et al., 2007).

Για να διατηρούν την ονομαστική τους τιμή η συχνότητα και οι τάσεις των ζυγών είναι απαραίτητος ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής, είναι ένα έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να διατηρεί την ονομαστική συχνότητα σε ολόκληρο το

σύστημα και να κρατάει την ισχύ στις διασυνδεδεμένες γραμμές στις τιμές των προδιαγραφών. Παρακάτω στο σχήμα (1.11) παρουσιάζεται το block διάγραμμα για τον αυτόματο έλεγχο της συχνότητας (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 1.11. Block διάγραμμα για τον αυτόματο έλεγχο της συχνότητας (Akagi, et al., 2007).

## 1.11. Ασυμετρία Φάσεων

Σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα παροχής, οι φασικές τάσεις των τριών γραμμών είναι ίσες σε μέγεθος και διαφέρουν ανά φάση μεταξύ τους κατά  $120^\circ$  (το ίδιο συμβαίνει και για τις πολικές με διαφορετικά μέτρα και γωνίες από τις φασικές, αλλά ίσα μεταξύ τους και γωνίες μεγαλύτερες κατά  $30^\circ$  από τις αντίστοιχες φασικές). Ασυμετρία τάσεως εμφανίζεται όταν, είτε υπάρχει διαφορά στην ενεργό τιμή της τάση μεταξύ των φάσεων, είτε επειδή η γωνία μεταξύ των φάσεων αποκλίνει από τις  $120^\circ$  ( Μάνιας, 2014).



α. Συμμετρικό Διάγραμμα

β. Ασύμμετρο Διάγραμμα

Σχήμα 1.12. Διαγράμματα τριφασικού συστήματος παροχής ( Μάνιας, 2014).

Η ασυμμετρία των φάσεων επηρεάζει κυρίως τους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες στους οποίους προκαλεί υπερθέρμανση και επίσης επηρεάζει τον εξοπλισμό προστασίας των κυκλωμάτων. Επιπλέον της μειωμένης απόδοσης, της υπερθέρμανσης και της μείωσης του χρόνου ζωής της μόνωσης, οι επαγωγικοί κινητήρες που λειτουργούν σε κατάσταση ασυμμετρίας θα κάνουν πολύ θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, λόγω των κραδασμών από την στροφορμή και την ταχύτητα. Προφανώς σε τέτοιες περιπτώσεις η στροφορμή και ταχύτητα θα είναι μικρότερη της κανονικής ( Μάνιας, 2014).

Η επίτευξη μηδενικού βαθμού ασυμμετρίας μεταξύ των φάσεων σε ένα σύστημα διανομής είναι προφανώς αδύνατη. Παρόλα αυτά, υπάρχουν τεχνικές βελτίωσης της συμμετρικότητας τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και σε επίπεδο κατανάλωσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του συντελεστή ασυμμετρίας της φάσεων και των επιπτώσεών της ( Μάνιας, 2014).

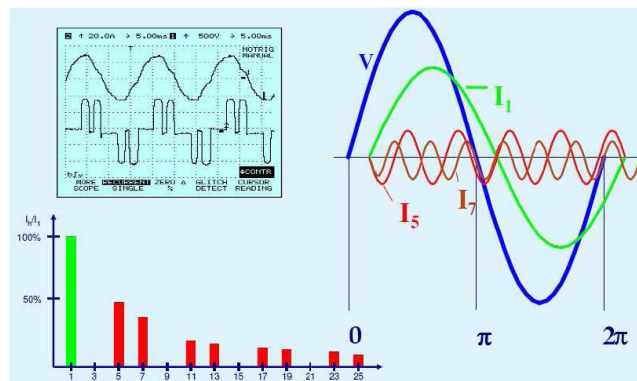
## **1.12. Αρμονικές**

### **1.12.1. Γενικά για τις Αρμονικές**

Η ύπαρξη αρμονικών στη τάση και την ένταση (υπέρθυση συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους - 50 Hz) οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων, φορτίων δηλαδή, όπου το ρεύμα έχει διαφορετική κυματομορφή από αυτήν της τάσης. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που παράγονται σε ένα σημείο μεταδίδονται και μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα σε άλλα φορτία (Πληθάρας, 2012).

### **Ορισμός**

Οποιαδήποτε περιοδική απόκλιση από την καθαρά ημιτονική μορφή της τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα άθροισμα από καθαρά συνημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Η ονομαστική συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα. Μία ημιτονική κυματομορφή με συχνότητα  $k$  φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη (το  $k$  είναι ακέραιος αριθμός) καλείται αρμονική διαταραχή. Ο λόγος μεταξύ της αρμονικής συχνότητας και της θεμελιώδης συχνότητας ( $k$ ) καλείται τάξη της αρμονικής (Πληθάρας, 2012).



**Σχήμα 1.13.** Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος, όπου διακρίνονται οι αρμονικές 1<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 7<sup>ης</sup> τάξης (Πληθάρας, 2012).

Η παρουσία αρμονικών υπολογίζεται μέσω του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) (total harmonic distortion). Αρμονικές της τάσης καταγράφονται με τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THDU). Ο THDU είναι ο λόγος της ενεργού τιμής της αρμονικής τάσης προς την ενεργό τιμή της τάσης της θεμελιώδους συχνότητας, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (Πληθάρας, 2012).

Ο THD συχνά δίνεται σαν ποσοστό.

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{K=2}^{40} V^2 * K}{V_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{K=2}^{40} C_{V_K}^2}{C_{V_1}^2}} \quad (1.1)$$

Όπου  $V_K = \sqrt{\frac{C_{V_K}}{\sqrt{2}}}$  η ενεργός τιμή της τάσης της αρμονικής τάξεως k, η  $V_1$  ενεργός τιμή της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας,  $C_{V_K}$  το πλάτος της τάσης της αρμονικής τάξεως k και  $C_{V_1}$  το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας (Πληθάρας, 2012).

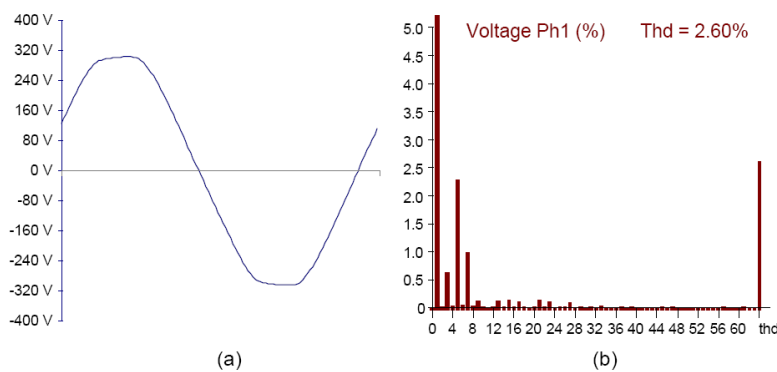
Στο Σχήμα (1.14) παρουσιάζεται μία τυπική κυματομορφή παρεχόμενης τάσης σε μία κατοικημένη περιοχή ή ένα ελαφρά (από άποψη ηλεκτρικών φορτίων) εργοστασιακό περιβάλλον. Συσκευές διακοπτικής λειτουργίας προκαλούν μία επιπεδοποίηση της κορυφής της κυματομορφής (Πληθάρας, 2012).



Στο διάγραμμα του Σχήματος (b) φαίνεται το φάσμα της συχνότητας και δείχνει την παραμόρφωση της μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής που προκύπτει από τις αρμονικές της τάσης. Κάθε αρμονική μπορεί να εκφραστεί με το πλάτος της ( $c_k$ ) την ενεργό τιμή της τάσης ( $U_k$ ) και μία ποσοστιαία τιμή ( $u_k$ ). Η ποσοστιαία αναπαράσταση είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα σε θέματα ποιότητας ισχύος (Πληθάρας, 2012).

Για τις ανάγκες μέτρησης της ποιότητας ισχύος η μέγιστη τάξη της μετρούμενης αρμονικής θα μπορούσε να μειωθεί στην 50η τάξη, πράγμα που σημαίνει 2500Hz για ένα δίκτυο συχνότητας 50Hz. Διαφορά φάσης μεταξύ των αρμονικών και της θεμελιώδους τάσης δεν θεωρείται σαν πρόβλημα της ποιότητας ισχύος (Πληθάρας, 2012).

Παρόλα αυτά, διαφορά φάσης μεταξύ αρμονικών ρευμάτων και τάσεων της ίδιας τάξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια γεννήτρια αρμονικής παραμόρφωσης. (Πληθάρας, 2012)



**Σχήμα 1.14** Φασματική απεικόνιση μιας συνήθους κυματομορφής τάσης, καλούμενης κι ως Πριονισμένης κορυφής (Πληθάρας, 2012).

### 1.12.2. Ενδιάμεσες Αρμονικές

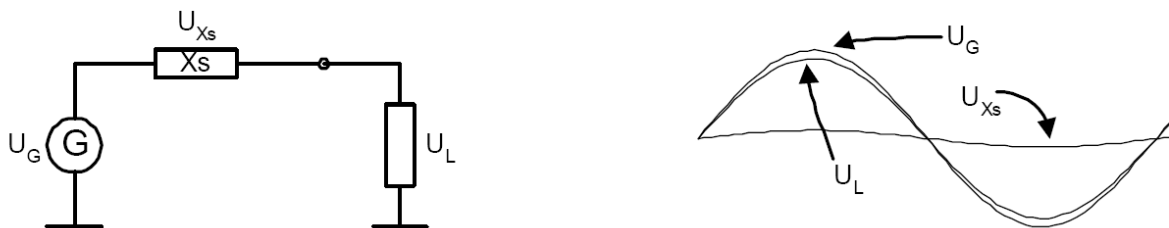
Τάσεις ή ρεύματα που έχουν συχνότητα η οποία δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας με την οποία το σύστημα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί (50 ή 60 Hz) καλούνται ενδιάμεσες αρμονικές. Οι ενδιάμεσες αρμονικές είτε έχουν διακριτές συχνότητες είτε εμφανίζονται σε ζώνη συχνοτήτων και μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα όλων των τάξεων τάσης. Οι συνήθεις πηγές της διαταραχής των ενδιάμεσων αρμονικών είναι στατικοί μετατροπείς συχνότητας, κυκλομετατροπείς (cycloconverters), επαγωγικοί κινητήρες και συσκευές

εκκενώσεως τόξου. Οι επιπτώσεις των ενδιάμεσων αρμονικών δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητές για αυτό και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. Έχει αποδειχθεί πάντως ότι επηρεάζουν τις γραμμές μεταφοράς και προκαλούν οπτική αστάθεια (Flicker) σε οθόνες και αλλά οπτικά μέσα, όπως σωλήνες καθοδικών ακτινών (CRTs) (Πληθάρας, 2012).

### 1.12.3. Αιτίες Δημιουργίας Αρμονικών

Στο Σχήμα (1.15) φαίνεται η αρχή της δημιουργίας των αρμονικών. Κοιτώντας το κύκλωμα από την πλευρά του καταναλωτή το ισοδύναμο κύκλωμα του υπόλοιπου δικτύου (ισοδύναμο Thevenin) μπορεί να αναπαρασταθεί από μία γεννήτρια  $G$  με αντίδραση  $X_s$  (σε περίπτωση άπειρου δικτύου δεν θα υπήρχε αντίδραση και οποιαδήποτε μεταβολή και αν γινόταν στο ρεύμα δεν θα ήταν αντιληπτή στο φορτίο). Η τάση της γεννήτριας θεωρείται σαν μία καθαρά ημιτονοειδής τάση με ονομαστική ενεργό τιμή. Η τάση στα άκρα του φορτίου του καταναλωτή διαφέρει από την τάση της γεννήτριας στην πτώση τάσης στην αντίδραση  $X_s$  του ισοδύναμου κυκλώματος (Νικόλαου, 2013).

Στην περίπτωση ενός γραμμικού φορτίου το ρεύμα και κατ' επέκταση η πτώση τάσης στην αντίδραση θα είναι επίσης ημιτονοειδής. Η τάση στα άκρα του καταναλωτή θα έχει και αυτή ημιτονοειδή μορφή τάσης με λίγο μειωμένο πλάτος, αλλά την ίδια φάση με αυτή της πηγής.



**Σχήμα 1.15** Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος με γραμμικό φορτίο, όπου με  $G$  συμβολίζονται τα στοιχεία της γεννήτριας, με  $s$  οι αντιδράσεις των ισοδυνάμων Thevenin και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή (Νικόλαου, 2013).

Μη γραμμικά φορτία (ανορθωτές, οδηγοί ταχύτητας μηχανών, φωτισμός φθορίου, υπολογιστές, τηλεοράσεις) απορροφούν ρεύμα με μεγάλο συντελεστή THDI (αισθητά μη ημιτονοειδής μορφή τάσης). Για λόγους καλύτερης ανάλυσης, τα μη γραμμικά φορτία θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν σαν γραμμικά φορτία μαζί με μία γεννήτρια αρμονικών (Νικόλαου, 2013).

Οι αρμονικές του ρεύματος προκαλούν μία μη-ημιτονοειδή πτώση τάσης στην αντίδραση του ισοδύναμου κυκλώματος  $X_s$  και κατ' επέκταση μία μη-ημιτονοειδή παραμόρφωση στην

παρεχόμενη τάση από την πηγή, όπως αυτή φαίνεται στα άκρα του φορτίου. Μη-γραμμικά φορτία διαταράσσουν την παρεχόμενη τάση κατά τέτοιο τρόπο που μόνο αρμονικές περιττής τάξης μπορούν να μετρηθούν με μετρητικά όργανα (Νικόλαου, 2013).



**Σχήμα 1.16** Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος με μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $G$  συμβολίζονται τα στοιχεία της γεννήτριας, με  $s$  οι αντιδράσεις των ισοδυνάμων Thevenin και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή (Νικόλαου, 2013).

Αν το φορτίο είναι μη-συμμετρικά ελεγχόμενο, τότε η θετική ημιπερίοδος του ρεύματος μπορεί να διαφέρει από την αρνητική με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν άρτιας τάξης αρμονικές και επίσης DC συνιστώσα. Αυτή η κατάσταση προκαλεί κορεσμό και υπερθερμάνσεις στον πυρήνα των μετασχηματιστών (Νικόλαου, 2013).

#### 1.12.4. Πηγές Αρμονικών Διαταραχών

Μερικές από τις πηγές των αρμονικών που εμφανίζονται στα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι (Νικόλαου, 2013):

- *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 υπερσχύουν οι συχνότητες του 1/3 ή 1/5 της βασικής και εμφανίζεται σαν υφαρμονικό φαινόμενο με υπερτάσεις, μεγάλα ρεύματα, παραμόρφωση κυματομορφών κλπ.

- *Μη γραμμικότητες δικτύου*: Προκύπτουν από φορτία όπως ανορθωτές, μετατροπείς, κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου, μηχανήματα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου, λαμπτήρες αερίου, ελεγκτές τάσης, μετατροπείς συχνότητας κ.ά (Νικόλαου, 2013).
- *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* (π.χ. μαγνητο-υδροδυναμική μετατροπή, κύτταρα καυσίμου, κλπ), που απαιτούν μετατροπείς από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα.
- *Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)* που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων και μεγάλων ροπών, κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές (Νικόλαου, 2013)

### 1.12.5. Συνέπειες από τη Δημιουργία Αρμονικών

Ο εξοπλισμός αποκρίνεται διαφορετικά κατά την εφαρμογή σε αυτόν αρμονικής τάσης και εξαρτάται σημαντικά από την μέθοδο λειτουργίας. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι περισσότεροι τύποι οικιακών θερμοσιφώνων και θερμοστρών δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου.

Από την άλλη, τα τυλίγματα των επαγωγικών κινητήρων υπερθερμαίνονται από τις αρμονικές, προκαλώντας με αυξημένο ρυθμό μείωση της αποδοτικότητας των μονώσεων, όπως και μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να δώσουν αντιστοίχως μεγαλύτερα ρεύματα από αυτά της θεμελιώδους συνιστώσας και για αυτό μπορεί εύκολα να υποτιμηθεί ο βαθμός αύξησης της θερμότητας στον κινητήρα (στην αρχική μελέτη θεωρήθηκε ότι θα φτάσει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο με αποτέλεσμα καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα). Η λειτουργία κάποιων συσκευών βασίζεται σε μία ακριβή κυματομορφή τάσης με ελάχιστες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα αυτές οι συσκευές να δυσλειτουργούν παρουσία αρμονικών. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν εξοπλισμοί που περιλαμβάνουν θυρίστορ όπως ρυθμιστές μεταβλητής έντασης φωτισμού και μηχανές συγκόλλησης (Arrillaga, et al., 2000).

Πολλές από τις αρμονικές που διαρρέουν το δίκτυο οφείλονται στην παραμόρφωση που εισάγουν μονοφασικά φορτία, όπως παρατηρείται σε κτίρια που στεγάζουν γραφεία, και μπορεί να προκαλέσουν διαρροή ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό που ξεπερνούν την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Σε συνθήκες χωρίς αρμονικές, ο ουδέτερος μεταφέρει πολύ μικρά ρεύματα, και κατά συνέπεια έχει γίνει πλέον πρακτική να τοποθετούνται αγωγοί στον ουδέτερο που να μπορούν να μεταφέρουν ολόκληρο ή πιθανά το μισό από την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Με αυξημένα επίπεδα αρμονικών ελλοχεύει ο κίνδυνος υπερφόρτισης του ουδέτερου με δύο πιθανές επιπτώσεις (Arrillaga, et al., 2000).:

- 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 (Arrillaga, et al., 2000).

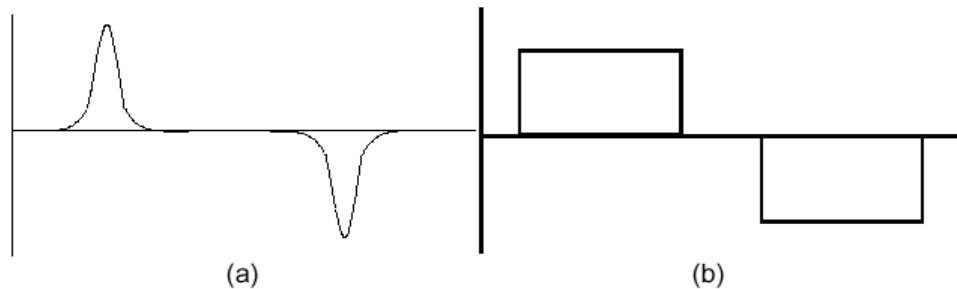
Στο σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, οι μετασχηματιστές των υποσταθμών και οι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι αυτοί που επηρεάζονται περισσότερο. Οι μετασχηματιστές επηρεάζονται από παραμορφωμένη κυματομορφή ρεύματος που μπορεί να προκαλέσει επιπλέον θέρμανση και να οδηγήσει σε μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι πυκνωτές επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη κυματομορφή της τάσης, που αν είναι σημαντικά παραμορφωμένη μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση του διηλεκτρικού μέσου στον πυκνωτή, με κίνδυνο να οδηγήσει σε έκρηξη.

Οι περισσότεροι μηχανικοί στις εργοστασιακές εγκαταστάσεις ενδιαφέρονται μόνο για προβλήματα στην παρεχόμενη ισχύ τα οποία γίνονται άμεσα αντιληπτά, αφού οδηγούν σε άμεση δυσλειτουργία ή αστοχία του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει παρατηρηθεί ότι η επίδραση των αρμονικών στον εξοπλισμό μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση και μείωση της διάρκειας ζωής (ή την διάρκεια ασφαλούς λειτουργίας, δηλαδή μετά απαιτείται συντήρηση ή επισκευή) σε μέγεθος μέχρι και το μισό της αναμενόμενης, με προφανείς οικονομικές επιπτώσεις. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα στο σύστημα, οι αρμονικές μπορούν να περνούν απαρατήρητες για αρκετά χρόνια εκτός αν τύχει να γίνει κάποια προκαθορισμένη μέτρηση στην θερμοκρασία της συσκευής ή στην κυματομορφή τάσης που τροφοδοτείται (Arrillaga, et al., 2000).

Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να τονισθεί ότι στις πηγές αρμονικών ανήκει και το ίδιο το σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όμως η επίδραση αυτή δεν είναι τόσο σημαντική στην δημιουργία όσο στη διάδοση ή στη διατήρηση των ήδη υπαρχόντων αρμονικών στο δίκτυο. Σε αυτό συνεισφέρει το γεγονός ότι για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και για τους μικρούς, υπάρχουν συγκεκριμένα όρια που πρέπει να τηρούνται και έτσι έχουν αναπτύξει μεθόδους εξάλειψης των αρμονικών στην τάση. Το ίδιο συμβαίνει και με μερικούς από τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, αλλά όχι συστηματικά και μετά από παρατήρηση δημιουργίας σημαντικών προβλημάτων στους γειτονικούς καταναλωτές. Έτσι δεν είναι τυχαίο ότι πριν τη δεκαετία του '60 η αρμονική παραμόρφωση ήταν ελάχιστη (έκτοτε το δίκτυο αναπτύχθηκε πολύ, αλλά πολλές φορές άναρχα) (Arrillaga, et al., 2000).

Στις μέρες μας, ένας διαφορετικός τύπος φορτίου καταναλωτών, με χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, έχει γίνει αρκετά δημοφιλής. Αυτά τα καλούμενα και ως «φορτία εισαγωγής διαταραχών» απορροφούν ρεύματα που δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.17 (α) και (β). ο πρώτος τύπος ρεύματος απορροφάται από ηλεκτρονικό εξοπλισμό γραφείου, όπως κομπιούτερ, φαξ και άλλες οικιακές συσκευές με ηλεκτρονικό έλεγχο, όπως οι πιο πολύπλοκοι

τύποι πλυντηρίων. Ο δεύτερος τύπος ρεύματος απορροφάται από συστήματα οδήγησης κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην γραμμή παραγωγής μιας βιομηχανίας ή στους ανεγκυστήρες (Arrillaga, et al., 2000).



**Σχήμα 1.17** Κυματομορφές ρεύματος που απορροφά (a) ένας προσωπικός υπολογιστής και (b) ένας κινητήρας με inverter (Arrillaga, et al., 2000).

Αυτές οι μορφές ρεύματος μπορούν να αναλυθούν σε ένα συνδυασμό άλλων ημίτονων, ένα για την θεμελιώδη συχνότητα και τα άλλα για συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Έτσι η κυματομορφή (α) αποτελείται από συνημίτονα συχνότητας 50, 150, 250 Hz κ.ο.κ. ( $2n-1$ , όπου  $n$  είναι η τάξη της αρμονικής, άρα περιττές αρμονικές), ενώ η κυματομορφή (b) μπορεί να αναλυθεί σε συνημίτονα συχνότητας 50, 250, 350Hz κ.ο.κ. (άρα αρμονικές τάξης που δεν είναι πολλαπλάσια του 3). Το πλάτος και η συχνότητα των υψίσυχνων συνιστωσών είναι χαρακτηριστική του τύπου του φορτίου που προκαλεί την διαταραχή και επομένως μπορεί να αναγνωριστεί με αυτόν τον τρόπο. Η συνιστώσα της παραμόρφωσης μπορεί και κινείται μέσα στο δίκτυο και προσθέτει υψίσυχνες πτώσεις τάσης που επηρεάζουν και τον γειτονικό εξοπλισμό (Arrillaga, et al., 2000).

Έτσι μπορεί κανείς να δει το φαινόμενο της αρμονικής διαταραχής σαν ένα φαινόμενο, όπου οι πελάτες επηρεάζουν ο ένας τον άλλο μέσω της κοινής τους σύνδεσης με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η παρουσία σύνθετης αντίστασης από την πλευρά του συστήματος είναι αναπόφευκτη (δηλαδή δεν γίνεται κάθε φορτίο να βλέπει ότι είναι συνδεδεμένο με ένα άπειρο σύστημα χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια σύνθετη αντίδραση μεταξύ των δύο, ώστε οποιαδήποτε διαταραχή στο ρεύμα να μην έχει επίπτωση στην τάση). Επομένως η αύξηση των πελατών με ηλεκτρονικά ισχύος στον εξοπλισμό τους, έχει σαν αποτέλεσμα την αναπόφευκτη αύξηση της αρμονικής διαταραχής του συστήματος. Επειδή υπερβολική αρμονική παραμόρφωση έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η απόδοση κάποιων τύπων συσκευών, είναι σημαντικό να είναι δυνατός ο υπολογισμός του επιπέδου της αρμονικής παραμόρφωσης και η προσπάθεια μείωσης τους σε κάποιες περιπτώσεις (Arrillaga, et al., 2000).

Στην συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες επιπτώσεις των αρμονικών διαταραχών στα φορτία (Arrillaga, et al., 2000):

- Οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός κίνησης υπερθερμαίνονται λόγω της επιπρόσθετης φόρτισης που υφίστανται. Επίσης, καταπονούνται μηχανικά με αποτέλεσμα να υπάρχουν σε αυξημένο βαθμό δονήσεις και θόρυβος κατά τη λειτουργία τους (Arrillaga, et al., 2000).
- Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν δεν είναι πλέον ίσο με μηδέν (περίπτωση συμμετρικών φορτίων). Τα ρεύματα των διαφόρων συχνοτήτων προστίθενται και αποτελούν υπολογίσιμη ποσότητα, ενώ οι τιμές τάσης μεταξύ ουδετέρου – γης είναι μη αποδεκτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδετέρου να μην είναι εντός των αποδεκτών ορίων τις περισσότερες φορές (Arrillaga, et al., 2000).
- Υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών κινδυνεύουν να καταστραφούν, σε περιπτώσεις όπου ο κλάδος στον οποίο συνδέονται, εμφανίζει ίδια συχνότητα με κάποιες από τις αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του συγκεκριμένου κλάδου ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα να αυξάνει κατά πολύ το ρεύμα που τον διαρρέει. Έτσι το πλάτος των αρμονικών αυξάνεται (ηλεκτρική ταλάντωση), αυξάνεται η ενεργός τάση και ένταση, οι πυκνωτές υπερθερμαίνονται και ενδέχεται είτε να καταστραφεί το διηλεκτρικό τους υλικό είτε να λιώσουν οι ασφάλειες τους με αποτέλεσμα να τίθενται εκτός λειτουργίας (Arrillaga, et al., 2000).
- Τα μέσα ζεύξης και προστασίας φθείρονται και είναι πιθανό να λειτουργήσουν ανεπιθύμητα, ιδιαίτερα αν η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται σε θερμικά μοντέλα ή για τον υπολογισμό της ενεργούς τιμής της έντασης χρησιμοποιείται το πλάτος της κυματομορφής της, το οποίο είναι στην περίπτωση αυτή παραμορφωμένο (Arrillaga, et al., 2000).
- Η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των γεννητριών καθίσταται αναξιόπιστη.
- Σημειώνονται λανθασμένες καταγραφές ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.
- Γίνεται σπατάλη ενέργειας με αποτέλεσμα οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υψηλότεροι.



- Μειώνεται η εφεδρεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια και τους ηλεκτρικούς πίνακες, είναι σημαντικά μεγαλύτερα λόγω των αρμονικών.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε επιβάρυνση της ηλεκτρικής εγκατάστασης η οποία ισοδυναμεί με οικονομικό κόστος που προκύπτει από την (Arrillaga, et al., 2000):

- Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας άρα την πληρωμή υψηλότερων λογαριασμών.
- Αδικοιολόγητες διακοπές στην παραγωγή – χαμένοι χρόνοι – πρόσθετο κόστος (Arrillaga, et al., 2000).
- Ταχύτερη φθορά του εξοπλισμού η οποία έχει ως αποτέλεσμα επιπρόσθετες επενδύσεις
- Υψηλότερο κόστος συντήρησης και επισκευών
- Μειωμένη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος ή της παρεχόμενης υπηρεσίας (Arrillaga, et al., 2000).

#### 1.12.6. Αντιμετώπιση Αρμονικών

Βελτίωση του προβλήματος που προκαλείται από την αρμονική παραμόρφωση συχνά συναντάται ως συνώνυμο της μείωσης της παραμόρφωσης των αρμονικών τάσης και ρεύματος. Παρόλα αυτά το πρόβλημα μπορεί επίσης να λυθεί με βελτίωση της ατρωσίας του εξοπλισμού (Arrillaga, et al., 2000).

Ένας πιο συνηθής τρόπος αποκοπής των αρμονικών προβλημάτων είναι η εγκατάσταση φίλτρων, συνήθως σε σειρά, που στρέφουν τα ανεπιθύμητα αρμονικά ρεύματα πίσω στο φορτίο. Τα αρμονικά ρεύματα παραμένουν υψηλά, αλλά δεν διαδίδονται μέσω του φορτίου και δεν προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στην τάση. Το μειονέκτημα αυτών των αποκαλούμενων ‘παθητικών’ φίλτρων, όπως είναι για παράδειγμα ο κίνδυνος υπερφόρτισης και η εισαγωγή νέων συχνοτήτων συντονισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη των αποκαλούμενων ‘ενεργών’ φίλτρων, όπου το ρεύμα ελέγχεται πλήρως και προσαρμόζεται στην υπάρχουσα παραμόρφωση τάσης και ρεύματος. Άλλες τεχνικές μετριασμού συμπεριλαμβάνουν βελτιώσεις στο δίκτυο (διαχωρισμός ευαίσθητων και ‘μολυσματικών’ φορτίων) και βελτιώσεις στα φορτία. Τα τελευταία

εμπεριέχουν καλύτερη ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος (μειωμένη εκπομπή), αλλά παρουσιάζουν αυξημένη ατρωσία σε παραμορφώσεις της τάσης (Arrillaga, et al., 2000).

Μειωμένη εκπομπή θεωρείται από πολλούς σαν η ενδεδειγμένη μακροπρόθεσμη λύση. Καθώς το πλήθος των προβλημάτων που οφείλονται στις αρμονικές παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, η προσπάθεια διατήρησης της παραμόρφωσης σε αυτά τα επίπεδα, ή η επίτρεψη μικρής αύξησης αυτής μπορεί να αποτελέσει τη φτηνότερη λύση (Arrillaga, et al., 2000).

Ένας σημαντικός παράγοντας στην ταξινόμηση των αρμονικών προβλημάτων είναι ο ορισμός των ορίων της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος. Τα όρια της παραμόρφωσης από αρμονική τάση αναφέρονται σε πολλά εθνικά και διεθνή πρότυπα, τα οποία κυρίως αποτελούν μία καταγραφή σε κανόνες της ήδη υπάρχουσας παραμόρφωσης. Τα IEC πρότυπα θέτουν όρια βάσει του μεγέθους της εκπομπής κάθε εξοπλισμού, την ώρα που τα IEEE θέτουν όρια για την εκπομπή κάθε καταναλωτή. Σύμφωνα με τα πρότυπα της IEEE η ευθύνη είναι στον καταναλωτή, ο οποίος και ενδέχεται να αγοράσει φίλτρα αντί να αγοράσει καλύτερο εξοπλισμό. Αντίθετα, σύμφωνα με τα IEC πρότυπα η ευθύνη είναι στον καταναλωτή των ‘μολυσματικών’ συσκευών (μπορούμε να πούμε πως μολυσματικό είναι το φορτίο που μολύνει το δίκτυο με αρμονικές). Η διαφοροποίηση πηγάζει από τον στόχο των κειμένων: τα πρότυπα της IEEE στοχεύουν στην κανονικοποίηση της σύνδεσης μεγάλων εργοστασιακών καταναλωτών, ενώ τα πρότυπα της IEC αναφέρονται κυρίως σε μικρούς καταναλωτές που δεν έχουν δυνατότητα επιλογής μεθόδων αντιμετώπισης των προβλημάτων (Arrillaga, et al., 2000).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

### 2.1. Εισαγωγή στα Πρότυπα Αρμονικών

Λόγω των προβλημάτων που δημιουργούν οι αρμονικές, είναι χρήσιμο να μετριοούνται και να περιορίζονται. Για τον λόγο αυτό διάφοροι ευρωπαϊκοί και διεθνείς οργανισμοί μελέτησαν τα όρια για την παρεμβολή αρμονικών στο δίκτυο ώστε η παρεχόμενη ισχύς να είναι καλής ποιότητας. Έτσι έχουν εκδοθεί διάφορα πρότυπα, που καθορίζουν τα όρια αναφορικά με τα πλάτη των αρμονικών ρευμάτων και τις αρμονικές παραμορφώσεις των τάσεων σε διάφορες αρμονικές συχνότητες (Dorf & Bishop, 2001).

Οι κυριότεροι οργανισμοί (διεθνείς ή ευρωπαϊκοί) που διαμορφώνουν τα πρότυπα που αφορούν την ποιότητα ισχύος είναι (Dorf & Bishop, 2001) :

1. IEC (International Electrotechnical Commission).
2. ISO (International Organization for Standardization).
3. CEN (European Committee for Standardization).
4. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization).
5. IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) (Dorf & Bishop, 2001).

Για τα όρια των συστημάτων των πελατών και των συστημάτων διανομής έχουμε τα πρότυπα IEC 61000-2-2, IEEE 519-2014 (αντικατέστησε το πρότυπο IEEE 519-1992) , IEC 61000-3-6 ,G5/4 (UK). Για τα όρια του εξοπλισμού έχουμε τα πρότυπα IEC 61000-3-2 (για ρεύματα <16 A ) , IEC 61000-3 (για ρεύματα >16 A , IEC 61000-3-12 ( για ρεύματα 16-75A). Για τη μέτρηση των αρμονικών ακολουθούμε τις πρακτικές του προτύπου IEC 61000-4-7 1m(Dorf & Bishop, 2001).

## 2.2. Πρότυπο IEEE – 519

Το πρότυπο IEEE-519 που εκδόθηκε το 2014 καθιέρωσε τα όρια των αρμονικών τάσης στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ισχύος, καθώς επίσης και των αρμονικών του ρεύματος εντός των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Εφόσον οι αρμονικές τάσης δημιουργούνται από τη διέλευση των αρμονικών ρεύματος διαμέσου των εμπεδήσεων του συστήματος διανομής, ελέγχοντας τα ρεύματα, ή τις εμπεδήσεις του συστήματος εντός μιας εγκατάστασης μπορούμε να ελέγξουμε τα επίπεδα των αρμονικών τάσης. Στο προαναφερόμενο πρότυπο, καθορίζονται τα επιθυμητά όρια της αρμονικής παραμόρφωσης με βάση τη φύση του ηλεκτρικού συστήματος διανομής (Akagi, et al., 2007).

### PCC – Σημείο κοινής ζεύξης ( Point of common coupling)

Το PCC ορίζεται ως το ηλεκτρικό σημείο σύνδεσης ή το σημείο προσαρμογής μεταξύ του συστήματος διανομής της εταιρίας παροχής ενέργειας και του συστήματος διανομής της βιομηχανικής εγκαταστάσεως του χρήστη. Σύμφωνα με το πρότυπο, για βιομηχανικούς χρήστες, οι οποίοι τροφοδοτούνται μέσω Μ/Σ, το PCC ορίζεται στην μεριά της υψηλής τάσης του Μ/Σ. Αντίθετα για εμπορικούς χρήστες (εμπορικά κέντρα, γραφεία, κλπ) το PCC ορίζεται συνήθως στη μεριά της χαμηλής τάσης του Μ/Σ. Η λανθασμένη επιλογή του σημείου αυτού πολλές φορές οδηγεί σε λάθος εφαρμογή των πινάκων του standard IEEE-519 (Dorf & Bishop, 2001).

Τα επιθυμητά όρια αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης παρουσιάζονται στον πίνακα του standard IEEE-519 που ακολουθεί (Akagi, et al., 2007):

**Πίνακας 2.1:** Όρια παραμόρφωσης τάσης.

| Bus voltage $V$ at PCC    | Individual harmonic (%) | Total harmonic distortion THD (%) |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| $V \leq 1.0$ kV           | 5.0                     | 8.0                               |
| $1$ kV $< V \leq 69$ kV   | 3.0                     | 5.0                               |
| $69$ kV $< V \leq 161$ kV | 1.5                     | 2.5                               |
| $161$ kV $< V$            | 1.0                     | 1.5                               |

-Το 99% των ημερήσιων τιμών πολύ μικρού χρόνου (3 δευτερόλεπτα) πρέπει να είναι μικρότερες από 1,5 επί τις τιμές που δίδονται στον πίνακα 2.1.

- Το 95% των εβδομαδιαίων τιμών μικρού χρόνου (10 λεπτά) θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Όλες οι τιμές πρέπει να είναι σε ποσοστό της ονομαστικής τάσης στη θεμελιώδη συχνότητα στο PCC. Ο πίνακας 2.1 ισχύει για τις αρμονικές τάσεις των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας (*Akagi, et al., 2007*).

### **Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης για συστήματα ονομαστικής ονομαστικής ισχύος 120V μέχρι 69 kV**

Τα όρια σε αυτή την υποενότητα ισχύουν για χρήστες συνδεδεμένους σε συστήματα όπου η ονομαστική τάση στο PCC είναι από 120 V έως 69 kV. Στο PCC, οι χρήστες θα πρέπει να περιορίσουν τα αρμονικά τους ρεύματα ως εξής :

-Το 99% των ημερήσιων τιμών πολύ μικρού χρόνου (3 δευτερόλεπτα) πρέπει να είναι μικρότερες από 2 επί τις τιμές που δίδονται στον πίνακα 2.2.

- Το 99% των εβδομαδιαίων τιμών μικρού χρόνου (10 λεπτά) θα πρέπει να είναι μικρότερες από 1.5 επί τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2.2.

- Το 95% των εβδομαδιαίων τιμών μικρού χρόνου (10 λεπτά) θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2 :** Όρια παραμόρφωσης ρεύματος (*Dorf & Bishop, 2001*).

| <b>Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας μέχρι 69kV</b> |                 |                  |                  |                  |                     |      |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| <b>Περιττές Αρμονικές</b>   |                 |                  |                  |                  |                     |      |
| $I_{sc}/I_L$  | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD  |
| < 20 <sup>c</sup>   | 4.0             | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3                 | 5.0  |
| 20 < 50   | 7.0             | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5                 | 8.0  |
| 50 < 100  | 10.0            | 4.5              | 4.0              | 1,5              | 0.7                 | 12.0 |
| 100 < 1000  | 12.0            | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0                 | 15.0 |
| > 1000  | 15.0            | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4                 | 20.0 |

- $I_{sc}$  είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο PCC.

- $I_L$  είναι η θεμελιώδης συνιστώσα του μεγίστου ζητούμενου ρεύματος φορτίου στο σημείο PCC. Υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των μεγίστων μηνιαίων ζητούμενων ρευμάτων των τελευταίων δώδεκα μηνών.
- $I_{sc}/I_L$  είναι ο λόγος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο PCC προς την θεμελιώδη συνιστώσα του μεγίστου ρεύματος φορτίου στο ίδιο σημείο. Αποτελεί το μέτρο έκφρασης της ‘στιβαρότητας’ του συστήματος στο σημείο αυτό.

Όλες οι μετρήσεις, οι οποίες χρειάζονται να γίνουν για τον έλεγχο των τιμών τόσο του ρεύματος όσο και της τάσης, πραγματοποιούνται στο PCC (Dorf & Bishop, 2001).

Στη συνέχεια, στους πίνακες 2.3 και 2.4, παρουσιάζονται τα όρια αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας από 69kV έως 161kV και από 161kV και άνω, όπως έχουν καθοριστεί στον πίνακα 3 και 4, αντίστοιχα του συγκεκριμένου standard.

**Πίνακας 2.3.** Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας από 69kV έως 161kV (Dorf & Bishop, 2001).

| <b>Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας από 69kV έως 161kV</b> |                 |                  |                  |                  |                     |      |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| <b>Περιττές Αρμονικές</b>   |                 |                  |                  |                  |                     |      |
| ISC/IL  | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD  |
| < 20c   | 4.0             | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3                 | 5.0  |
| 20 < 50   | 7.0             | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5                 | 8.0  |
| 50 < 100  | 10.0            | 4.5              | 4.0              | 1,5              | 0.7                 | 12.0 |
| 100<1000  | 12.0            | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0                 | 15.0 |
| > 1000  | 15.0            | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4                 | 20.0 |

**Πίνακας 2.4.** Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας μεγαλύτερη των 161kV (Dorf & Bishop, 2001).

| <b>Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, για συστήματα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας μεγαλύτερη των 161kV</b> |                 |                  |                  |                  |                     |      |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| <b>Περιττές Αρμονικές</b>   |                 |                  |                  |                  |                     |      |
| $I_{sc}/I_L$  | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD  |
| < 25 <sup>c</sup>   | 1.0             | 0.5              | 0.38             | 0.15             | 0.1                 | 1.5  |
| 20 < 50   | 2.0             | 1.0              | 0.75             | 0.3              | 0.15                | 2.5  |
| ≥ 50  | 3.0             | 1.5              | 1.15             | 0.45             | 0.22                | 3.75 |

## 2.3. Πρότυπα IEC

### 2.3.1. Πρότυπο IEC 61000-3-2

Ο κανονισμός IEC 61000-3-2 αφορά όρια εκπομπής αρμονικών ρεύματος και εφαρμόζεται σε όλες τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές με ρεύμα εισόδου μικρότερο από 16A ανά φάση, οι οποίες συνδέονται στον πίνακα διανομής χαμηλής τάσης.

Στον κανονισμό αυτό οι συσκευές κατατάσσονται σε τέσσερις διαφορετικές κλάσεις οι οποίες έχουν διαφορετικά όρια.

**Κλάση Α:** Συμμετρικός τριφασικός εξοπλισμός και όλος ο εξοπλισμός που δεν ανήκει στις επόμενες κλάσεις.

**Κλάση Β:** Φορητά εργαλεία και οι μη επαγγελματικές συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης. Εξοπλισμός φωτισμού (Dorf & Bishop, 2001).

Προσωπικοί υπολογιστές με τις οθόνες τους, ραδιοφωνικοί και τηλεοπτικοί δέκτες με ισχύ εισόδου  $P \leq 600W$  (Dorf & Bishop, 2001).

**Πίνακας 2.5.** Κλάσεων Προτύπου EN 61000-3-2 Ed.2:2000 (Dorf & Bishop, 2001).

| EN 61000-3-2 Ed.2:2000              |                                 |                                 |                                 |                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Τάξη<br>αρμονικής<br>(h)            | Μέγιστο ρεύμα<br>Κλάση A<br>(A) | Μέγιστο ρεύμα<br>Κλάση B<br>(A) | Μέγιστο ρεύμα<br>Κλάση C<br>(A) | Μέγιστο ρεύμα<br>Κλάση D<br>(mA/Watt) |
| 2                                   | 1,08                            | 1,62                            | 2                               | -                                     |
| 3                                   | 2,3                             | 3,45                            | 30*λ                            | 3,4                                   |
| 4                                   | 0,43                            | 0,645                           | -                               | -                                     |
| 5                                   | 1,14                            | 1,71                            | 10                              | 1,9                                   |
| 6                                   | 0,3                             | 0,45                            | -                               | -                                     |
| 7                                   | 0,77                            | 1,155                           | 7                               | 1                                     |
| 8≤h≤40<br>(Άρτια )                  | 0,23(8/h)                       | 0,345(8/h)                      | -                               | -                                     |
| 9                                   | 0,4                             | 0,6                             | 5                               | 0,5                                   |
| 11                                  | 0,33                            | 0,495                           | 3                               | -                                     |
| 13                                  | 0,21                            | 0,315                           | 3                               | 0,35                                  |
| 15 ≤h ≤39<br>(Περιπτή )             | 0,15(15/h)                      | 0,225(15/h)                     | 3                               | (3,85/h)                              |
| λ = Συντελεστής ισχύος της συσκευής |                                 |                                 |                                 |                                       |

### 2.3.2. Πρότυπο IEC 61000-3-4

Αναφέρεται σε όρια εκπομπής αρμονικών ρεύματος για ηλεκτρικά συστήματα τροφοδοσίας χαμηλής τάσεως, και εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο των 16A ( $I > 16A$ ).

Με τον όρο χαμηλή τάση, εννοούνται:

- 240V 1Φ, δυο ή τριών αγωγών, 50Hz ή 60Hz.
- 600V 3Φ, τριών ή τεσσάρων αγωγών, 50Hz ή 60Hz

Τα όρια αυτά δίνονται στους παρακάτω πίνακες (Dorf & Bishop, 2001).



**Πίνακας 2.6** Όρια μονοφασικού, διφασικού και ασύμμετρου τριφασικού εξοπλισμού πρότυπου EN 61000-3-4 (Dorf & Bishop, 2001).

| EN 61000-3-4  |   |   |      |    |    |    |    |     |
|---|---|---|------|----|----|----|----|-----|
| Μονοφασικός, διφασικός και ασύμμετρος τριφασικός εξοπλισμός |   |   |      |    |    |    |    |     |
| Ελάχιστο<br>Rsce  | Επιτρεπόμενοι<br>συντελεστές<br>παραμόρφωσης<br>αρμονικών ρεύματος<br>% | Επιτρεπόμενες αρμονικές ρεύματος ανά τάξη lh/l <sub>1</sub> % |      |    |    |    |    |     |
|   |   | THD   | PWHD | l3 | l5 | l7 | l9 | l11 |
| 66  | 25  | 25  | 23   | 11 | 8  | 6  | 5  | 4   |
| 120   | 29  | 29  | 25   | 12 | 10 | 7  | 6  | 5   |
| 175   | 33  | 33  | 29   | 14 | 11 | 8  | 7  | 6   |
| 250   | 39  | 39  | 34   | 18 | 12 | 10 | 8  | 7   |
| 350   | 46  | 46  | 40   | 24 | 15 | 12 | 9  | 8   |
| 450   | 51  | 51  | 40   | 30 | 20 | 14 | 12 | 10  |
| 600   | 57  | 57  | 40   | 30 | 20 | 14 | 12 | 10  |

Οι τιμές των άρτιων αρμονικών δεν θα πρέπει να ξεπερνούν το 16%. Γραμμικός συσχετισμός μεταξύ διαδοχικών τιμών Rsce είναι επιτρεπτός (Dorf & Bishop, 2001).

Στην περίπτωση μη συμμετρικού τριφασικού εξοπλισμού, οι παραπάνω τιμές ισχύουν για κάθε φάση.

PWHD: Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης μερικής βαρύτητας

$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} h \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.1.)$$

Όπου

- I<sub>1</sub>: Ονομαστικό ρεύμα της θεμελιώδους συχνότητας
- I<sub>h</sub>: Ρεύμα αρμονικής τάξης

**Πίνακας 2.7.** Όρια Συμμετρικού τριφασικού εξοπλισμού πρότυπου EN 61000-3-4(Dorf & Bishop, 2001).

| EN 61000-3-4                      |   |      |   |    |     |     |
|-----------------------------------|---|------|---|----|-----|-----|
| Συμμετρικός τριφασικός εξοπλισμός |   |      |   |    |     |     |
| Ελάχιστο<br>Rsce                  | Επιτρεπόμενοι<br>συντελεστές<br>παραμόρφωσης<br>αρμονικών ρεύματος<br>% |      | Επιτρεπόμενες αρμονικές ρεύματος ανά<br>τάξη Ih/I1% |    |     |     |
|                                   | THD   | PWHD | I5  | I7 | I11 | I13 |
| 66                                | 16  | 25   | 14  | 11 | 10  | 8   |
| 120                               | 18  | 29   | 16  | 12 | 11  | 8   |
| 175                               | 25  | 33   | 20  | 14 | 12  | 8   |
| 250                               | 35  | 39   | 30  | 18 | 13  | 8   |
| 350                               | 48  | 46   | 40  | 25 | 15  | 10  |
| 450                               | 58  | 51   | 50  | 35 | 20  | 15  |
| 600                               | 70  | 57   | 60  | 40 | 25  | 18  |

Όπου:

- Rsce: Λόγος βραχυκυκλώματος
- $R_{sce} = S_{sc} / (3S_{eq})$  για μονοφασικό εξοπλισμό
- $R_{sce} = S_{sc} / (2S_{eq})$  για ενδοφασικό (διφασικό) εξοπλισμό
- $R_{sce} = S_{sc} / S_{eq}$  για τριφασικό εξοπλισμό (συμμετρικό ή μη)
- $S_{sc} = \text{Τριφασική φαινομενική ισχύς βραχυκυκλώματος} = U^2 \text{ nominal} / Z$
- U: Ονομαστική τάση συστήματος
- Z: Σύνθετη αντίσταση στο σημείο κοινής ζεύξης
- Seq: Διφασική τάση
- $S_{eq} = U_p I_{eq}$  για μονοφασικό εξοπλισμό

- $U_p$ : Μονοφασική τάση
- $Seq_u = \sqrt{3}U_i I_{eq_u}$  για συμμετρικό τριφασικό εξοπλισμό
- $Seq_u = 3U_p I_{eq_u max}$  για ασύμμετρο τριφασικό εξοπλισμό (Dorf & Bishop, 2001).

### 2.3.3. Πρότυπο IEC 61000-2-4

Αφορά τα επίπεδα συμβατότητας αρμονικών τάσης σε βιομηχανικούς χώρους και μη δημόσια ηλεκτρικά συστήματα διανομής για τάσης  $\leq 35kV$  και συχνότητα 50Hz ή 60Hz.

Κλάσεις ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος

- Κλάση 1: Η κλάση εφαρμόζεται σε προστατευμένες τροφοδοσίες και έχει επίπεδα συμβατότητας χαμηλότερα από αυτά των δημοσίων δικτύων. Σχετίζεται με τη χρήση εξοπλισμού πολύ ευαίσθητου σε διαταραχές τροφοδοσίας, όπως για παράδειγμα όργανα εργαστηρίων, εξοπλισμό αυτοματισμών και προστασίας, ηλεκτρονικούς υπολογιστές κτλ (Dorf & Bishop, 2001).
- Κλάση 2: Η κλάση αυτή αφορά σημεία κοινής ζεύξης φορτίου με δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και σημεία ζεύξης μέσα σε βιομηχανική εγκατάσταση. Τα επίπεδα συμβατότητας αυτής της κλάσης είναι γενικώς τα ίδια με αυτά των δημοσίων δικτύων. Ως εκ τούτου τμήματα που σχεδιάζονται για τροφοδοσία από δημόσια δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την κλάση βιομηχανικού περιβάλλοντος (Dorf & Bishop, 2001).
- Κλάση 3: Η κλάση αυτή αφορά μόνο σημεία ζεύξης εντός του βιομηχανικού χώρου. Έχει υψηλότερα επίπεδα συμβατότητας από αυτά της κλάσης 2 για μερικά φαινόμενα διαταραχών. Έτσι για παράδειγμα αυτή η κλάση μπορεί να ληφθεί υπόψη όταν κάποιες από τις ακόλουθες συνθήκες είναι παρούσες. Ένα μεγάλο μέρος του φορτίου τροφοδοτείται από μετατροπείς (Dorf & Bishop, 2001).

Η τροφοδοσία μερικών φορτίων που προκαλούν υψηλές διαταραχές όπως οι κλίβανοι εκκένωσης τόξου αλλά και οι μεγάλοι μετατροπείς ενδέχεται να προκαλούν διαταραχές σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά της κλάσεως 3. Σε αυτήν την περίπτωση τα επίπεδα συμβατότητας πρέπει να συμφωνούνται (Dorf & Bishop, 2001).

**Πίνακας 2.8.** Κλάση 1 Πρότυπου IEC 61000-2-4 (Dorf & Bishop, 2001).

| IEC 61000-2-4 Κλάση 1  |                                  |  |                        |                        |                                  |
|--|----------------------------------|--|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Περιττές αρμονικές<br>μη πολλαπλάσιες του 3  |                                  | Περιττές αρμονικές<br>πολλαπλάσιες του 3 |                        | Άρτιες αρμονικές       |                                  |
| Τάξη<br>αρμονικής<br>h   | Τάση<br>αρμονικής<br>%           | Τάξη<br>αρμονικής<br>h                   | Τάση<br>αρμονικής<br>% | Τάξη<br>αρμονικής<br>h | Τάση αρμονικής<br>%              |
| 5  | 3                                | 3  | 3                      | 2                      | 2                                |
| 7  | 3                                | 9  | 1,5                    | 4                      | 1                                |
| 11   | 3                                | 15                                       | 0,3                    | 6                      | 0,5                              |
| 13   | 3                                | 21                                       | 0,2                    | 8                      | 0,5                              |
| 17   | 2                                | 21 < h ≤ 45                              | 9,2                    | 10                     | 0,5                              |
| 17 < h ≤ 48  | $2,27 \cdot \frac{17}{h} - 0,27$ |  |                        | 10 < h ≤ 50            | $0,25 \cdot \frac{10}{h} + 0,25$ |
| Το αντίστοιχο επίπεδο συμβατότητας για την ολική αρμονική παραμόρφωση είναι THD = 5% |                                  |  |                        |                        |                                  |

**Πίνακας 2.9.** Κλάση 2 Πρότυπου IEC 61000-2-4 (Dorf & Bishop, 2001).

| IEC 61000-2-4 Κλάση 2  |                                  |  |                        |                        |                                  |
|--|----------------------------------|--|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Περιττές αρμονικές<br>μη πολλαπλάσιες του 3  |                                  | Περιττές αρμονικές<br>πολλαπλάσιες του 3 |                        | Άρτιες αρμονικές       |                                  |
| Τάξη<br>αρμονικής<br>h   | Τάση<br>αρμονικής<br>%           | Τάξη<br>αρμονικής<br>h                   | Τάση<br>αρμονικής<br>% | Τάξη<br>αρμονικής<br>h | Τάση αρμονικής<br>%              |
| 5  | 6                                | 3  | 5                      | 2                      | 2                                |
| 7  | 5                                | 9  | 1,5                    | 4                      | 1                                |
| 11   | 3,5                              | 15                                       | 0,4                    | 6                      | 0,5                              |
| 13   | 3                                | 21                                       | 0,3                    | 8                      | 0,5                              |
| 17   | 2                                | 21 < h ≤ 45                              | 0,2                    | 10                     | 0,5                              |
| 17 < h ≤ 48  | $2,27 \cdot \frac{17}{h} - 0,27$ |  |                        | 10 < h ≤ 50            | $0,25 \cdot \frac{10}{h} + 0,25$ |
| Το αντίστοιχο επίπεδο συμβατότητας για την ολική αρμονική παραμόρφωση είναι THD = 8% |                                  |  |                        |                        |                                  |

**Πίνακας 2.10.** Κλάση 3 Πρότυπου IEC 61000-2-4 (Dorf & Bishop, 2001).

| IEC 61000-2-4 Κλάση 3                    |                                |                                       |                  |                  |                  |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Περιπτώς αρμονικές μη πολλαπλάσιες του 3 |                                | Περιπτώς αρμονικές πολλαπλάσιες του 3 |                  | Άρτιες αρμονικές |                  |
| Τάξη αρμονικής h                         | Τάση αρμονικής %               | Τάξη αρμονικής h                      | Τάση αρμονικής % | Τάξη αρμονικής h | Τάση αρμονικής % |
| 5  | 8                              | 3                                     | 6                | 2                | 3                |
| 7  | 7                              | 9                                     | 2,5              | 4                | 1,5              |
| 11                                       | 3                              | 15                                    | 2                | 6                | 1                |
| 13                                       | 4,5                            | 21                                    | 1,75             | 8                | 1                |
| 17                                       | 4                              | 21 < h ≤ 45                           | 1                | 10               | 1                |
| 17 < h ≤ 48                              | $4,5 \cdot \frac{17}{h} - 0,5$ |                                       |                  | 10 < h ≤ 50      | 1                |

Το αντίστοιχο επίπεδο συμβατότητας για την ολική αρμονική παραμόρφωση είναι THD = 10%

### 2.3.4. Πρότυπο IEC 61000-2-1

Πρόοδοι στα ηλεκτρονικά ισχύος και πρόσφατες εξελίξεις στις βιομηχανικές εφαρμογές έχουν φέρει τους μηχανικούς αντιμέτωπους με έναν νέο τύπο φαινομένων σχετιζόμενα με τις αρμονικές, τον αποκαλούμενο "inter-harmonics" (εμβόλιμες συχνότητες, αρμονικές συχνότητες σε όχι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους).

Το IEC-61000-2-1 ορίζει τις inter-harmonics ως εξής:

"Μεταξύ των αρμονικών της τάσης και του ρεύματος, υπάρχουν και άλλες συχνότητες που μπορεί να παρατηρηθούν που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Δεν είναι αρμονικές. Μπορούν να εμφανιστούν ως ιδιαίτερες συχνότητες ή ως φάσμα συχνοτήτων" (Dorf & Bishop, 2001).

Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι inter-harmonics μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή εξοπλισμού. Δεν υπάρχουν πολλά δημοσιευμένα έγγραφα για αυτό το θέμα, επιτείνοντας την ανησυχία για τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις αρμονικές. Κατά έναν περίεργο τρόπο, μια ακριβής ερμηνεία του ορισμού του IEC των inter-harmonics παράγει ένα ασυμβίβαστο αποτέλεσμα. Η ανώτερη πλευρική ζώνη συχνοτήτων 65 Hz προερχόμενη από την διαμόρφωση κατά πλάτος με εύρος 5 Hz της θεμελιώδους συχνότητας των 60 Hz ανταποκρίνεται στον ορισμό των inter-harmonics ενώ η χαμηλότερη πλευρική ζώνη συχνοτήτων 55 Hz δεν ανταποκρίνεται στον ορισμό. Αυτή η εμπειρία δείχνει ότι πλάτη μικρά όπως 0,7% του ονομαστικού ρεύματος μπορεί να έχουν αντίθετα

αποτελέσματα στον εξοπλισμό. Οι εμπορικά διαθέσιμες συσκευές ανάλυσης φάσματος, ίσα-ίσα αντιλαμβάνονται τους φασματικούς συντελεστές σε τέτοιο επίπεδο (Dorf & Bishop, 2001).

### 2.3.5. Πρότυπα ΕΛΟΤ

- ΕΛΟΤ EN 50160:1995 Χαρακτηριστικά της τάσης που παρέχεται από τα δημόσια δίκτυα διανομής.
- ΕΛΟΤ EN 61000.03.02:1995 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) . Όρια εκπομπής για αρμονικές ρεύματος (ρεύμα εισόδου συσκευής  $\leq 16$  A ανά φάση).
- ΕΛΟΤ EN 61000.03.03:1996 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Περιορισμός των διακυμάνσεων και τρεμοσβήματος της τάσης σε συστήματα παροχής χαμηλής τάσης για συσκευές με ονομαστικό ρεύμα  $\leq 16$  A.
- ΕΛΟΤ EN 61000.04.07:1995 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Μέθοδοι δοκιμών και μετρήσεων. Γενικές οδηγίες για τη χρήση οργάνων για μέτρηση αρμονικών και ενδιάμεσων αρμονικών σε δίκτυα τροφοδότησης και συσκευές συνδεδεμένες σε αυτά (Αλέξανδρου & Κωνσταντίνου, 2009).

### 2.3.6. Πρότυπο EN 50160

Το πρότυπο EN50160 καθορίζει τα χαρακτηριστικά της τάση του ηλεκτρικού ρεύματος που παρέχεται από τα δημόσια δίκτυα διανομής. Χρησιμοποιείται ως βάση για τις συμβάσεις χρησιμότητα-πελάτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και για συμβάσεις μικρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δημοσιεύθηκε το 1994 με μικρές αλλαγές που έχουν προστεθεί το 1999, το πρότυπο είναι υποχρεωτικό στην ΕΕ και έχει γίνει υποχρεωτικό σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες από το 2003.

Το EN50160 δεν είναι ένα πρότυπο EMC. Είναι ένα πρότυπο που καθορίζει την ποιότητα ενός προϊόν (ηλεκτροδότηση) όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της τάσης στο σημείο της τροφοδοσίας. Αυτό το πρότυπο μπορεί να αντικατασταθεί εν μέρει ή εξ ολοκλήρου με μια σύμβαση μεταξύ ενός πελάτη και προμηθευτή. Λόγω του υψηλού κόστους της παρεχόμενης ενέργειας σε αραιοκατοικημένες περιοχές, ο προμηθευτής και ο πελάτης μπορεί να συμφωνήσουν σχετικά με

τη μείωση της ποιότητας ισχύος δημιουργώντας μια χαμηλότερη τιμή για την παρεχόμενη ισχύ. Είναι ευθύνη του πελάτη να αξιολογήσει το αντίκτυπο των αυξημένων διαταραχών στον συνδεδεμένο εξοπλισμό (Dorf & Bishop, 2001).

### **Χαρακτηριστικά Τάση τροφοδοσίας**

Όλα τα όρια και οι δείκτες που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες, ορίζονται μόνο για συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Οι περιγραφικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποιότητα του ρεύματος έχουν μια εξαιρετικά τυχαία φύση, μπορούν να ποικίλουν στο χρόνο και εξαρτώνται ιδιαίτερα από την τοπολογία του συστήματος. Τα γεγονότα συμβαίνουν περιστασιακά. Είναι δεδομένο ότι μπορούν να αποδοθούν μόνο κατά προσέγγιση τα όρια στις (Dorf & Bishop, 2001):

- Απότομες αλλαγές τάσης
- Πτώσεις τάσης
- Υπερτάσεις
- Μικρές διακοπές
- Μεγάλες διακοπές
- Παροδικές υπερτάσεις

Μια άλλη κατηγορία που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση ενός φαινομένου που μπορεί να μετρηθεί για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο περιλαμβάνει τα παρακάτω φαινόμενα (Dorf & Bishop, 2001):

- Συχνότητα ισχύος
- Εύρος τάσης τροφοδοσίας

- Διακυμάνσεις τάσης τροφοδοσίας
- Τρεμόπαιγμα (flicker)
- Ασυμμετρία στην τάση τροφοδοσίας
- Αρμονικές τάσης
- Διαρμονικές τάσης
- Σήμανση τάσης δικτύου

Το πρότυπο ορίζει τρία διαστήματα ενσωμάτωσης: 3s, 10s και 10 λεπτά.

Μία περίοδος διαστήματος 120 λεπτών, χρησιμοποιείται για μακροχρόνια ένδειξη (Dorf & Bishop, 2001).

### **Συχνότητας ισχύος**

Η ονομαστική συχνότητα της τάσης, είναι 50 Hz. Το διάστημα ενσωμάτωσης είναι 10 δευτερόλεπτα.

Τα όρια για ένα διασυνδεδεμένο σύστημα MT και XT είναι:

- Για το 99,5% των τιμών που καταγράφονται κατά τη διάρκεια ενός χρόνου πρέπει να είναι  $\pm 1\%$  (49,5 ... 50,5 Hz)
- Όλες οι τιμές που καταγράφονται κατά τη διάρκεια ενός χρόνου πρέπει να είναι εντός  $+4 / -6\%$  (47 ... 52 Hz)

Τα όρια για τα απομονωμένα συστήματα (σε νησιά), MT και XT είναι:

- Για το 95% των τιμών που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας, πρέπει να είναι  $\pm 2\%$  (49 ... 50 Hz)



- Όλες οι τιμές που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια μίας εβδομάδας πρέπει να είναι  $\pm 15\%$  (42,5 ... 57,5 Hz) (Dorf & Bishop, 2001).
- **Διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας**

Η ονομαστική τάση για τα συστήματα LV (χαμηλής τάσης) 4 καλωδίων (μεταξύ φάσης και ουδέτερου), είναι 230V.

Το διάστημα για τη μέτρηση της διακύμανση τάσης τροφοδοσίας είναι 10 λεπτά.

Τα όρια για τα συστήματα LV (Χαμηλής Τάσης) είναι:

- Για το 95% των τιμών που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδα πρέπει να είναι εντός του  $\pm 10\% U_n$

Όρια για συστήματα MV(μέσης τάσης):

- Για το 95% των καταγεγραμμένων τιμών κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας πρέπει να είναι εντός του  $\pm 10\% U_n$  (Dorf & Bishop, 2001).

### **Απότομες αλλαγές τάσης**

Η παρουσία των απότομων αλλαγών της τάσης σε ένα σύστημα αξιολογούνται με χρήση περιγραφικών δεικτών (Αλέξανδρου & Κωνσταντίνου, 2009).

Για συστήματα XT:

- Γενικά δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο του  $5\% U_n$ , αλλά περιστασιακά μπορούμε να έχουμε μικρές αλλαγές, μέχρι  $10\%$  του ορίου της  $U_n$  ανά ημέρα.

Για συστήματα MT:

- Γενικά δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο του  $4\%$  της  $U_c$ , αλλά περιστασιακά μπορούν να έχουμε αλλαγές, έως  $6\%$  της  $U_n$  ανά ημέρα (Αλέξανδρου & Κωνσταντίνου, 2009).

### **Βυθίσεις τάσης τροφοδοσίας**

Η παρουσία των βυθίσεων τάσης τροφοδοσίας σε ένα σύστημα αξιολογείται με τη χρήση περιγραφικών δεικτών.

Για συστήματα Χαμηλής και μέσης τάσης:

- Ο αναμενόμενος αριθμός πτώσεων τάσης μπορεί να ποικίλει από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η πλειοψηφία των βυθίσεων έχουν διάρκεια μικρότερη από 1s και το βάθος δεν ξεπερνάει το 60%. Πολύ συχνό φαινόμενο είναι σε ορισμένες περιοχές να έχουμε πολύ συχνές βυθίσεις που να φθάνουν στο 10% -15% (Dorf & Bishop, 2001).

### **Υπερτάσεις τροφοδοσίας**

Οι αυξήσεις της τάσης τροφοδοσίας, ορίζονται από το πρότυπο EN50160 ως "συχνότητες προσωρινών υπερτάσεων".

Η παρουσία αύξησης της τάσης τροφοδοσίας σε ένα σύστημα αξιολογείται με περιγραφικούς δείκτες.

Σε συστήματα XT:

- Το σφάλμα σε ένα μετασχηματιστή μπορεί να προκαλέσει υπέρταση, που γενικά δεν υπερβαίνει το 1,5 kV στην πλευρά της XT.

Συστήματα MT:

- Μια βλάβη μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις μέχρι 1,7 U<sub>c</sub> σε συστήματα με σταθερή γείωση και μέχρι 2 U<sub>c</sub> σε συστήματα με απομονωμένη γείωση (Αλέξανδρου & Κωνσταντίνου, 2009).

### **Διακοπές ρεύματος**

Διακοπές ρεύματος συμβαίνουν όταν η τάση τροφοδοσίας πέσει κάτω από το όριο διακοπής, δηλαδή το 1% του  $U_n$ , με μέτρηση σύμφωνα με το πρότυπο EN50160.

Σύντομης διάρκειας διακοπές είναι οι διακοπές που διαρκούν λιγότερο από 3 λεπτά και μεγάλης διάρκειας διακοπές εκείνες που υπερβαίνουν τα 3 λεπτά.

Η παρουσία βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων διακοπών σε ένα σύστημα προσδιορίζεται με περιγραφικούς δείκτες (Dorf & Bishop, 2001).

Για Χαμηλής και Μέσης Τάσης συστήματα:

- Ο αναμενόμενος αριθμός για **σύντομες διακοπές** μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες διακοπές κατά τη διάρκεια ενός έτους. Περίπου το 70% των σύντομων διακοπών είναι διάρκειας μικρότερης από 1 δευτερόλεπτο.
- Ο αναμενόμενος αριθμός μακροχρόνιων διακοπών κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 50 φορές κατά τη διάρκεια ενός έτους (Dorf & Bishop, 2001).

**Σημείωση:** Οι προκαθορισμένες διακοπές δεν συμπεριλαμβάνονται στον αριθμό των αναμενόμενων διακοπών μακράς διάρκειας, καθώς έχουν ανακοινωθεί εκ των προτέρων (Dorf & Bishop, 2001).

### **Τρεμόπαιγμα (Flicker)**

Η βραχυπρόθεσμη ένδειξη τρεμοπαίγματος (flicker) ( $P_{st}$ ) υπολογίζεται σε διάστημα 10 λεπτών.

Τα Όρια για συστήματα χαμηλής και μέσης τάσης είναι:

- Μακροχρόνια ο δείκτης τρεμοπαίγματος ( $P_{lt}$ ) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%, για το 95% μιας εβδομάδας (Dorf & Bishop, 2001).

### **Ασυμμετρία στην τάση τροφοδοσίας**

Το διάστημα για τη μέτρηση ασυμμετρίας στην τάση τροφοδοσίας είναι τα 10 λεπτά.

Τα όρια για τα συστήματα ΧΤ είναι:

Το 95% των τιμών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 2% κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας. Σε ορισμένες περιοχές, η ασυμμετρία τάσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% (Αλέξανδρου & Κωνσταντίνου, 2009).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΦΙΛΤΡΑ

### 3.1. Γενικά για τα Φίλτρα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αντιμετώπιση του προβλήματος των αρμονικών ρεύματος γίνεται με την εγκατάσταση κατάλληλων φίλτρων. Η επιλογή του τύπου του φίλτρου, του μεγέθους του και της συνδεσμολογίας, γίνεται μετά από μετρήσεις αρμονικών ρεύματος και τάσης στα διάφορα φορτία της εγκατάστασης. Επιπλέον απαιτούνται υπολογισμοί, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου της εγκατάστασης με ειδικό λογισμικό. Διαφορετικά είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει καταστροφή των ίδιων των φίλτρων λόγω υπερφόρτισής τους (Fujita & Akagi, 1990).

Η επίλυση του προβλήματος των αρμονικών καθορίζεται από το εάν είναι επιθυμητά ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω (Fujita & Akagi, 1990):

1. Εξάλειψη του συντονισμού.
2. Μείωση των απωλειών στους μετασχηματιστές και τα καλώδια.
3. Αντιστάθμιση της άεργης ισχύος

Η τοποθέτηση των φίλτρων μπορεί να γίνει σε δύο σημεία, είτε τοπικά είτε κεντρικά.

*Τα τοπικά φίλτρα* εγκαθίστανται σε ένα μη γραμμικό φορτίο απορροφώντας μέρος ή σύνολο των αρμονικών και παρέχοντας παράλληλα τοπική αντιστάθμιση άεργης ισχύος (βελτιώνει τον τοπικό συντελεστή ισχύος (PF)). Αυτά τα φίλτρα είναι σταθερά και ακολουθούν την λειτουργία του αντίστοιχου μη γραμμικού φορτίου (Fujita & Akagi, 1990).

*Τα κεντρικά φίλτρα* εγκαθίστανται σε μερικούς ή γενικούς ηλεκτρικούς πίνακες και ελέγχουν τις αρμονικές και την άεργο ισχύ του φορτίου. Τα φίλτρα αυτά μπορεί να χρησιμοποιούν ρυθμιστές άεργου ισχύος. Οι συγκεκριμένες διατάξεις μετρούν την άεργο ισχύ του συστήματος και για την επίτευξη του επιθυμητού συντελεστή ισχύος, ενεργοποιούν τα πηνία των ρελέ των αντίστοιχων φίλτρων εντάσσοντας τα στο σύστημα. Πολλές φορές επιλέγεται η εισαγωγή των φίλτρων να γίνεται με βήματα (Fujita & Akagi, 1990).

Επίσης ένα σημαντικό κριτήριο για τον διαχωρισμό των φίλτρων είναι ο τρόπος σύνδεσής τους στο δίκτυο. Με βάση αυτό το κριτήριο υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες (Fujita & Akagi, 1990):

- Σειριακά Φίλτρα
- Παράλληλα Φίλτρα

Όσον αφορά τα σειριακά φίλτρα, τόσο τα ενεργά όσο και τα παθητικά, ο τρόπος καταστολής των αρμονικών είναι ο ίδιος. Αυτό γιατί τόσο τα ενεργά όσο και τα παθητικά σειριακά φίλτρα, είναι κατασκευασμένα ώστε να παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στην ροή των αρμονικών ρευμάτων, έτσι ώστε τα αρμονικά ρεύματα να περιορίζονται (Fujita & Akagi, 1990).

Αντίθετα, ο τρόπος καταστολής των αρμονικών στα παράλληλα φίλτρα, δεν είναι ο ίδιος στα παθητικά και στα ενεργά φίλτρα. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια, τα παθητικά παράλληλα φίλτρα δημιουργούν μια διαδρομή πολύ χαμηλής αντίστασης για συγκεκριμένες αρμονικές συχνότητες, ενώ τα ενεργά παράλληλα φίλτρα, καταγράφουν τις αρμονικές του δικτύου και στην συνέχεια παράγουν τις ίδιες αρμονικές και τις εισάγουν στο δίκτυο, με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , έτσι ώστε να εξαιρεθούν οι αρμονικές (Fujita & Akagi, 1990).

Τα φίλτρα απόσβεσης αρμονικών χωρίζονται επίσης σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τα στοιχεία τα οποία τα αποτελούν, σε:

- Τα παθητικά φίλτρα (passive harmonic filters)
- Τα ενεργά φίλτρα (active harmonic filters)
- Τα υβριδικά φίλτρα (hybrid harmonic filters)

### **3.2. Αρμονικά Φίλτρα**

Τα φίλτρα απόσβεσης αρμονικών είναι συστήματα τα οποία παγιδεύουν τις αρμονικές και δεν τις επιτρέπουν να διεισδύσουν στο δίκτυο. Αποτελούνται από συνδυασμό πηνίων και ειδικών πυκνωτών κατάλληλα διαστασιοποιημένων, ώστε να συντονίζονται (να ελαχιστοποιούν τη σύνθετη

αντίσταση τους) σε επιλεγμένες συχνότητες και διαχωρίζονται σε βαθμίδες. Έχουν τη δυνατότητα ελέγχου από ρυθμιστή, ο οποίος ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου είτε βάζει εντός, είτε θέτει εκτός βαθμίδες πηνίων - πυκνωτών, ούτως ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπεραντιστάθμισης (Fujita & Akagi, 1990).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα ενός αρμονικού φίλτρου:

- Μειώνει τα ρεύματα ουδετέρου
- Μειώνει τη φόρτιση των μετασχηματιστών
- Προστατεύει τα ηλεκτρικά συστήματα
- Μειώνει τους κινδύνους φωτιάς
- Προστατεύει τον ουδέτερο αγωγό
- Ενισχύει την προστασία του συστήματος
- Ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις στους μετασχηματιστές διανομής
- Αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος
- Μειώνει τις απώλειες του συστήματος
- Χαμηλώνει την κορυφή του φασικού ρεύματος και του μέσου φασικού ρεύματος
- Βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος (power factor) στα μη-γραμμικά φορτία
- Μειώνει τη ολική αρμονική παραμόρφωση
- Βελτιώνει την ισορροπία/ευστάθεια του φασικού ρεύματος
- Αυξάνει την ευστάθεια της φασικής τάσης

### 3.2.1. Παθητικά Αρμονικά Φίλτρα

Ένα παθητικό αρμονικό φίλτρο κατασκευάζεται με τη χρήση μιας διάταξης πυκνωτών, επαγωγών και αντιστάσεων. Μπορεί να πάρει την μορφή της απλής γραμμής με επαγωγική αντίσταση ή μπορεί να χρησιμοποιεί μια σειρά από παράλληλα συντονισμένα φίλτρα για να εξαλείψει αρμονικές. Τα παθητικά αρμονικά φίλτρα επίσης χωρίζονται με βάση τον τρόπο που συνδέονται στο φορτίο (Fujita & Akagi, 1990).

- Σειριακό φίλτρο: Εδώ το φίλτρο τοποθετείται σε σειρά με το φορτίο και χρησιμοποιεί παράλληλα στοιχεία (πηνία και πυκνωτές συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα). Το φίλτρο αυτό είναι στην ουσία μια διάταξη απόρριψης ρεύματος (Fujita & Akagi, 1990).
- Παράλληλο φίλτρο: Το φίλτρο τοποθετείται παράλληλα με το φορτίο και τα στοιχεία του κατασκευάζονται σε σειρά. Το φίλτρο αυτό είναι μια διάταξη «αποδοχής» ρεύματος (Fujita & Akagi, 1990).

Γενικώς τα φίλτρα αρμονικών είναι φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας επειδή συνδέονται παράλληλα με το σύστημα ισχύος και σχηματίζουν κλάδους χαμηλής αντίστασης προς την γη για ένα ή περισσότερα ρεύματα αρμονικών. Στα συστήματα ισχύος τα εν παραλλήλω συνδεδεμένα φίλτρα είναι πιο οικονομικά και πιο πρακτικά από τα εν σειρά συνδεδεμένα για τους ακόλουθους λόγους (Fujita & Akagi, 1990):

- Στα φίλτρα που συνδέονται σε σειρά, τα στοιχεία τους διαστασιολογούνται 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 (Fujita & Akagi, 1990).
- Στα φίλτρα που συνδέονται παράλληλα, τα στοιχεία τους διαστασιολογούνται με βάση την ισχύ των αρμονικών που θα αποκόψουν και λειτουργούν με μέρος της τάσης του συστήματος. Συνεπώς έχουμε πιο μικρά και οικονομικά εξαρτήματα (Fujita & Akagi, 1990).

Τα παράλληλα φίλτρα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μονοσυντονιζόμενα φίλτρα (single tuned filters)



- Πολυσυντονιζόμενα ή διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα ( double tuned filters)
- Αποσβενόμενα φίλτρα ( damped filters) πρώτης, δευτέρας, ή τρίτης τάξεως (Fujita & Akagi, 1990).

Τα συντονιζόμενα φίλτρα είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν ρεύματα σε συχνότητες ίδιες με αυτές των αρμονικών ρευμάτων που εμφανίζονται στο δίκτυο. Αποτελούνται από βαθμίδες πυκνωτών και πηνίων συνδεδεμένων εν σειρά. Η κάθε βαθμίδα έχει τη δική της συχνότητα συντονισμού και μάλιστα τέτοια που να αποκόπτει μια συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος (Fujita & Akagi, 1990).

Με τα συντονιζόμενα φίλτρα αποκοπής αρμονικών πετυχαίνεται άριστη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο καθώς αποκόπτουν ακριβώς τις αρμονικές (5η, 7η, 11η ...) που υπάρχουν σ' αυτό. Οι συχνότητες συντονισμού των συντονισμένων φίλτρων βρίσκονται πάρα πολύ κοντά στις αντίστοιχες συχνότητες των ρευμάτων που αποκόπτουν. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων να είναι υπερβολικά μικρές και έτσι να δημιουργούνται υψηλά ρεύματα αρμονικών που οδηγούν τις πυκνωτικές διατάξεις του φίλτρου σε μεγάλη καταπόνηση. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αντισταθμίζουν εύκολα την άεργο ισχύ σε δυναμικά φορτία και ενέχουν τον κίνδυνο απορρόφησης αρμονικών από τη μεριά της Υψηλής Τάσης του Μετασχηματιστή Ισχύος, τα καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικά στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και τελικά την εγκατάσταση τους στη βιομηχανία. Βασικά τους πλεονεκτήματα αποτελούν η άριστη αποκοπή των αρμονικών του δικτύου καθώς και το γεγονός ότι παράλληλα με τον καθαρισμό των αρμονικών αντισταθμίζουν και την άεργο ισχύ του δικτύου (Fujita & Akagi, 1990).

Τα Αποσβενόμενα φίλτρα ελέγχουν υψηλής τάξεως ομάδες αρμονικών και συνήθως συντονίζονται στα ζευγάρια των αρμονικών 11η,13η και 17η,19η . Τα φίλτρα αυτά παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση και συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για να φιλτράρουν αρμονικές που βρίσκονται κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα ισχύος , έτσι ώστε να έχουν χαμηλές απώλειες ισχύος (Fujita & Akagi, 1990).

Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι τα παθητικά φίλτρα είναι ευρέως διαδεδομένα αφού χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των αρμονικών ρευμάτων. Γενικά αποτελούνται από τον εν σειρά συνδυασμό πυκνωτών, πηνίων και αντιστάσεων. Τα παθητικά φίλτρα ουσιαστικά λειτουργούν σαν “καταβόθρες” αρμονικών ρευμάτων καθώς απορροφούν τα ρεύματα αυτά. Αυτό

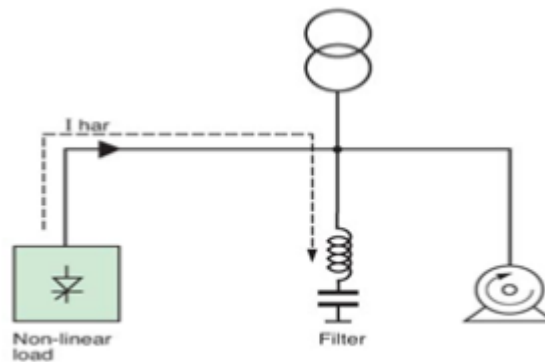
συμβαίνει διότι τα φίλτρα αυτά είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση σε μία ή σε εύρος συχνοτήτων στις οποίες είναι συντονισμένα. Έτσι για τις συχνότητες συντονισμού, το φίλτρο παρουσιάζει μικρή αντίσταση και επομένως απορροφά όλα τα ρεύματα των συχνοτήτων αυτών (Fujita & Akagi, 1990).

Τα παθητικά φίλτρα παρέχουν τη δυνατότητα περιορισμού των αρμονικών με κόστος σχετικά χαμηλό. Παρόλα αυτά η λειτουργία τους παρουσιάζει ένα πλήθος μειονεκτημάτων, ειδικά για εφαρμογές μέσης και χαμηλής τάσης. Μερικά από αυτά τα μειονεκτήματα είναι:

- Δεν παρέχουν ενίσχυση σήματος λόγω του ότι δεν διαθέτουν ενεργά στοιχεία.
- Μπορούν να φιλτράρουν μόνο τις συχνότητες για τις οποίες έχουν ρυθμιστεί αρχικά.
- Υπάρχει η περίπτωση να παρουσιαστούν συντονισμοί λόγω της αλληλεπίδρασης των στοιχείων του φίλτρου και άλλων φορτίων προκαλώντας σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα.
- Ιδιαίτερα οι εγκαταστάσεις χαμηλής και μέσης τάσης είναι ιδιαίτερα δυναμικές με την πάροδο του χρόνου οδηγώντας έτσι με την πάροδο του χρόνου σε υπερφόρτωση το ήδη εγκατεστημένο παθητικό φίλτρο (Fujita & Akagi, 1990).
- Η ικανότητα φιλτραρίσματος αρμονικών του παθητικού φίλτρου καθορίζεται από το λόγο της σύνθετης αντίστασης του παθητικού φίλτρου και του δικτύου τροφοδοσίας. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθετη αντίσταση του δικτύου πρέπει να είναι μεγαλύτερη προκειμένου τα διάφορα αρμονικά ρεύματα να ρέουν προς την πλευρά του παθητικού φίλτρου. Η παραπάνω απαίτηση όμως δεν είναι πάντα εύκολο να επιτευχθεί, με αποτέλεσμα να είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί συμμόρφωση με τους ισχύοντες κανονισμούς μόνο με τη χρήση παθητικών φίλτρων (Fujita & Akagi, 1990).

### **3.3. Ενεργά Αρμονικά Φίλτρα**

Η βασική αιτία ύπαρξης αρμονικών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η όλο και αυξανόμενη χρήση συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος όμως, μας δίνουν ταυτόχρονα τη δυνατότητα αντιμετώπισης του προβλήματος των αρμονικών. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται ενεργά φίλτρα ισχύος (active power filter) (Fujita & Akagi, 1990).



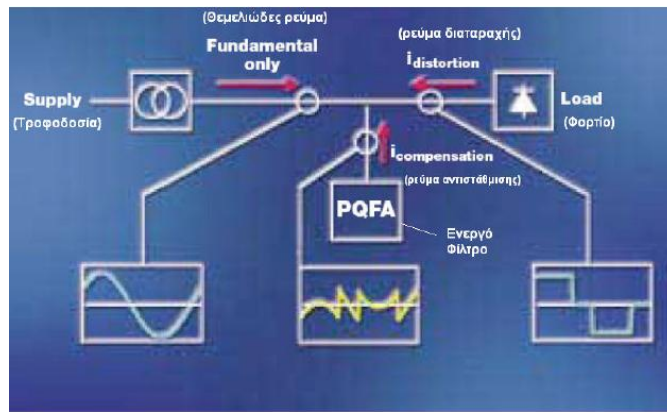
**Σχήμα. 3.1.** Παθητικό Φίλτρο Παράλληλα με Γραμμικό, ή μη Γραμμικό Φορτίο, (Fujita & Akagi, 1990).

Η βασική αρχή λειτουργίας των ενεργών φίλτρων είναι εντελώς διαφορετική από την αντίστοιχη των παθητικών φίλτρων. Συγκεκριμένα το ενεργό φίλτρο υπολογίζει τα αρμονικά ρεύματα παραμόρφωσης και παράγει ένα φάσμα αρμονικού ρεύματος αντίθετης φάσης από το ρεύμα της αρμονικής διαταραχής που υπολογίστηκε αρχικά. Το ρεύμα του ενεργού φίλτρου δημιουργείται με τη χρήση μιας διακοπτικής διάταξης, η οποία αποτελείται από transistor ή mosfet και στη συνέχεια, εισάγεται στο κύκλωμα έτσι ώστε να προστίθεται στο ρεύμα της γραμμής. Από τη στιγμή που οι αρμονικές του ρεύματος γραμμής είναι ίσες με τις αρμονικές που εισάγει το φίλτρο είναι φανερό ότι το ρεύμα της γραμμής δεν θα περιέχει πλέον αρμονικές.

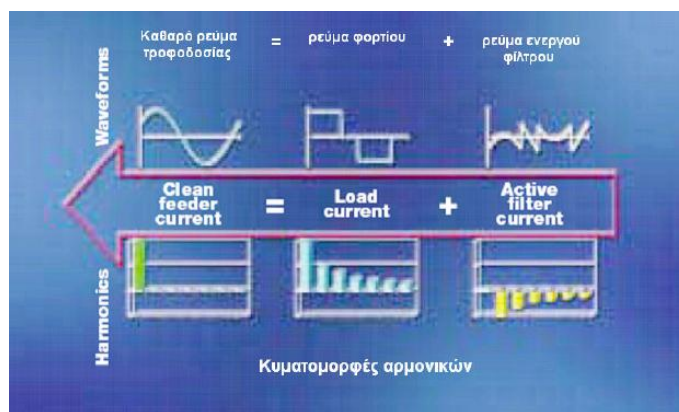
Η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος γραμμής του φορτίου αποτελείται από όλες τις αρμονικές εκτός της πρώτης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η βασική (1η) αρμονική απομονώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Στο σχήμα 3.2. απεικονίζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου όπου:

- $i_{distortion}$  είναι το ρεύμα παραμόρφωσης και
- $i_{compensation}$  είναι το ρεύμα αντιστάθμισης



Σχήμα 3.2. Αρχή λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου (Fujita & Akagi, 1990).



Σχήμα 3.3. Αρχή λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας (Fujita & Akagi, 1990).

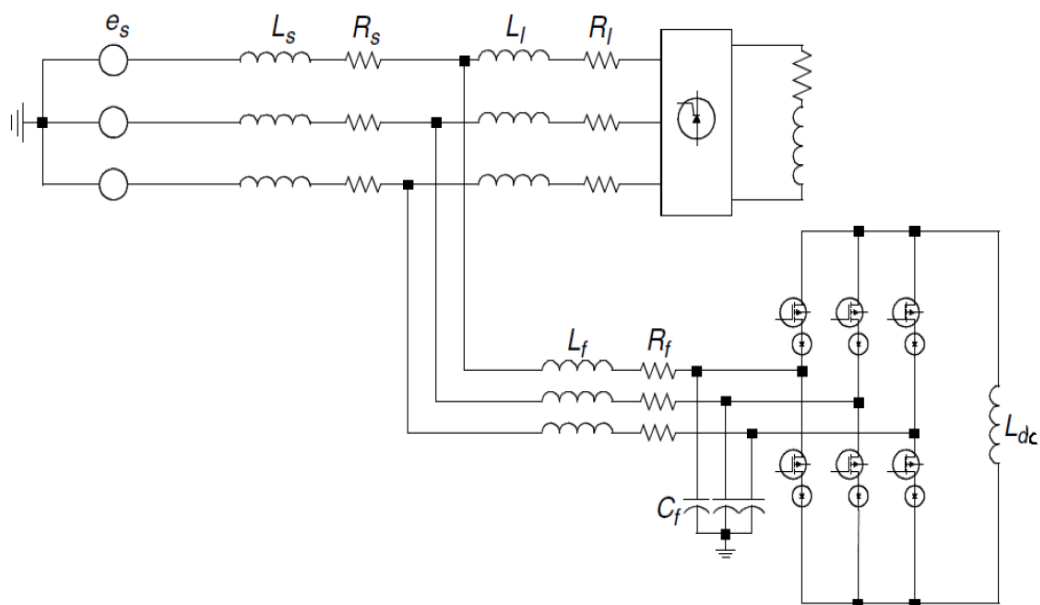
Με βάση την τοπολογία, υπάρχουν δύο είδη ενεργών φίλτρων:

- Τα ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος: Τα ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος ή Current Source Active Filters (CSAF) χρησιμοποιούν μια επαγωγή ως στοιχείο αποθήκευσης DC ενέργειας και
- Τα ενεργά φίλτρα πηγής τάσης: Στα ενεργά φίλτρα πηγής τάσης Voltage Source Active Filters (VSAF), ο πυκνωτής λειτουργεί ως στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας. Τα VSAF είναι πιο οικονομικά, ελαφρύτερα και ευκολότερα στον έλεγχο σε σύγκριση με τα CSAF (Akagi, et al., 2007)

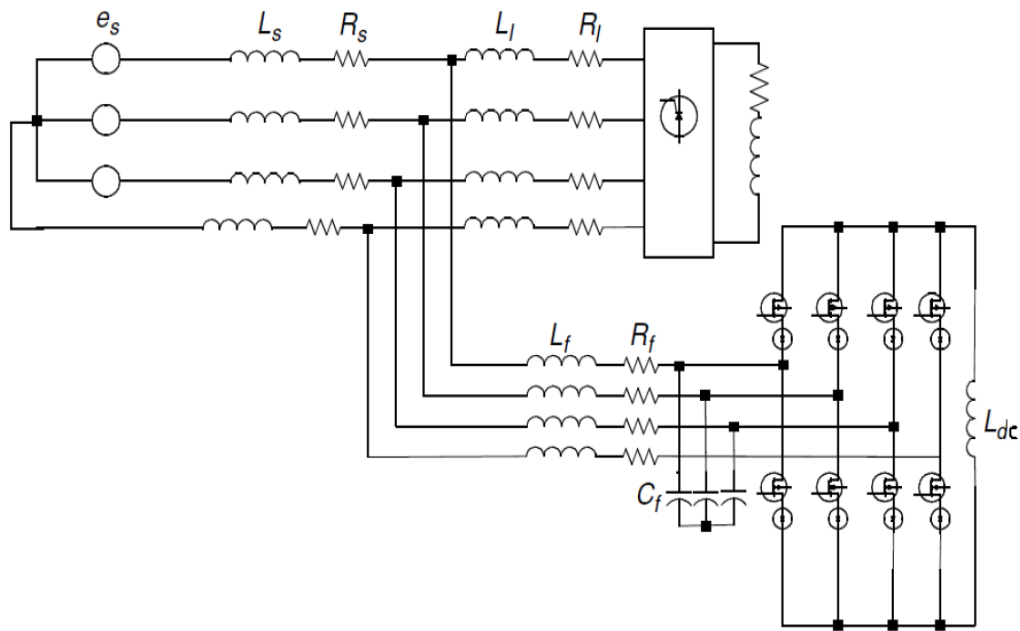
### 3.3.1. Ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος

Τα μη γραμμικά φορτία απορροφούν μη ημιτονοειδή ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα διαρρέουν την σύνθετη αντίσταση της πηγής του εναλλασσόμενου ρεύματος και προκαλούν αρμονικές τάσης που στην συνέχεια εξαπλώνονται στο δίκτυο. Τα ενεργά φίλτρα έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν ένα αρμονικό ρεύμα ίσο με το αρμονικό ρεύμα του φορτίου. Το ρεύμα αυτό εγχέεται στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) και ουσιαστικά καλύπτει τις ανάγκες του φορτίου σε αρμονικό ρεύμα. Συνεπώς, το ρεύμα της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος θα είναι απαλλαγμένο από αρμονικές.

Τα CSAF χρησιμοποιούν μια πηγή ρεύματος ως στοιχείο αποθήκευσης DC ενέργειας. Μπορούν να είναι συστήματα τριών ή τεσσάρων αγωγών χαμηλής ή υψηλής ισχύος, μονοφασικά ή τριών φάσεων. Το σχήμα 3.4. δείχνει το κύκλωμα ενός τριφασικού, τριών αγωγών CSAF. Τα  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $R_l$ ,  $L_l$ ,  $R_f$  και  $L_f$  είναι η αντίσταση και η επαγωγή της πηγής, του φορτίου και του φίλτρου, αντίστοιχα. Έχουν προταθεί και σχεδιαστεί διάφορα είδη στρατηγικών για τον έλεγχο του φίλτρου CSAF. Η μέθοδος ελέγχου ρεύματος PWM (Pulse Width Modulation) είναι η πιο δημοφιλής τεχνική (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.4. Ένα τυπικό ενεργό φίλτρο πηγής ρεύματος τριών φάσεων (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.5. Ένα τυπικό τριφασικό ενεργό φίλτρο πηγής ρεύματος τεσσάρων αγωγών (Akagi, et al., 2007).

Οι βασικές εξισώσεις του ενεργού φίλτρου έχουν ως εξής:

$$V_{fa} + R_f i_{fa} + L_f \frac{di_{fa}}{dt} = V_a \quad (3.1)$$

$$V_{fb} + R_f i_{fb} + L_f \frac{di_{fb}}{dt} = V_b \quad (3.2)$$

$$V_{fc} + R_f i_{fc} + L_f \frac{di_{fc}}{dt} = V_c \quad (3.3)$$

Στα CSAF, το DC ρεύμα της επαγωγής αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο αρμονικό ρεύμα του φορτίου. Εάν το ρεύμα της επαγωγής ( $I_{dc}$ ) είναι πολύ μικρό, ο μετατροπέας δεν μπορεί να εκτελέσει κατάλληλα την αντιστάθμιση. Το  $I_{dc}$  δεν πρέπει να είναι υπερβολικά υψηλό, εάν είναι θα υπάρχουν υπερβολικές απώλειες στο  $L_{dc}$  και ο μετατροπέας και τα παθητικά φίλτρα δεν θα μπορούν να “εξαλείψουν” τη διακοπτική συχνότητα. Δεν υπάρχει ανάγκη για την τροφοδοσία του συνεχούς ρεύματος, επειδή το ενεργό φίλτρο παράγει μόνο την άεργο ισχύ και μια μικρή τιμή του θεμελιώδους ρεύματος που απαιτείται για την αντιστάθμιση των πραγματικών απωλειών του φίλτρου (Akagi, et al., 2007).

Ο πυκνωτής  $C_f$  χρησιμοποιείται για την προστασία των διακοπών από τις υπερτάσεις και επίσης για να δημιουργήσει μαζί με το  $L_f$  το χαμηλοπερατό LC φίλτρο και να “εξαλείψει” τη διακοπτική συχνότητα. Προκειμένου να αποφύγουμε τον συντονισμό, η συχνότητα συντονισμού των  $L_f$  και

Cf θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα των αρμονικών και σημαντικά μικρότερη από τη διακοπτική συχνότητα. Η στρατηγική ελέγχου πρέπει να είναι καλά σχεδιασμένη για να αποτρέψει αυτόν τον συντονισμό (Akagi, et al., 2007).

Το  $L_{dc}$  πρέπει να επιλεγεί αρκετά μεγάλο για να περιορίσει την κυμάτωση του ρεύματος. Η μέγιστη τιμή του  $L_{dc}$  περιορίζεται από τον όγκο, το βάρος και το κόστος. Στα CSAF, η ενέργεια κυκλοφορεί μεταξύ του  $L_{dc}$  και του συστήματος. Όταν η τάση στο  $L_{dc}$  είναι θετική, το ρεύμα του  $L_{dc}$  μειώνεται και όταν η τάση δια μέσου του  $L_{dc}$  είναι αρνητική, το ρεύμα του  $L_{dc}$  αυξάνεται. Αυτή η αύξηση και μείωση προκαλεί κυμάτωση στο ρεύμα του  $L_{dc}$ . Ας υποθέσουμε ότι  $\Delta I$  είναι η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου  $L_{dc}$ . Έτσι έχουμε (Akagi, et al., 2007).

:

$$\Delta W_{L_{dc}} = \frac{1}{2} L_{dc} ((I_{dc} + \Delta I)^2 - (I_{dc} - \Delta I)^2) = 2I_{dc} L_{dc} \Delta I \quad (3.4)$$

όπου  $W_{L_{dc}}$  είναι η μεταβολή της ενέργειας στην επαγωγή  $L_{dc}$ . Ως αποτέλεσμα, έχουμε (Akagi, et al., 2007):

$$L_{dc} = \frac{\Delta W_{L_{dc}}}{2\Delta I I_{dc}} \quad (3.5)$$

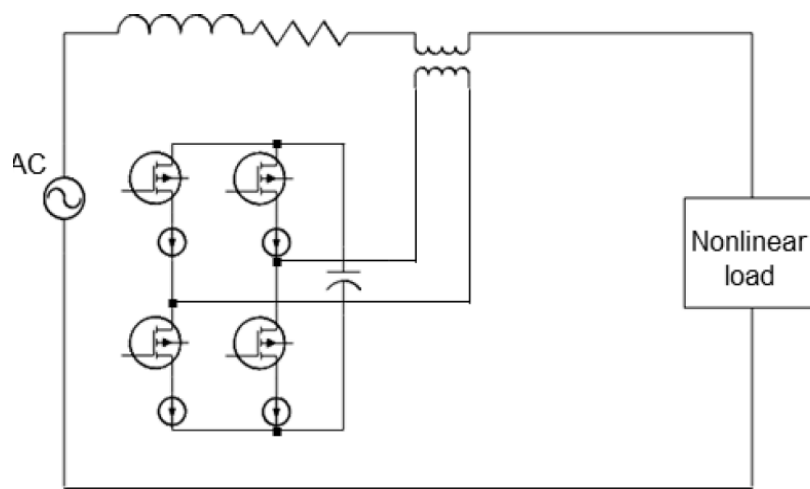
### 3.3.2. Ενεργά φίλτρα πηγής τάσης

Ο πιο διαδεδομένος τύπος ενεργού φίλτρου είναι το ενεργό φίλτρο τύπου αντιστροφέα πηγής τάσης, το οποίο έχει σχεδιαστεί, βελτιωθεί και χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια και βρίσκεται τώρα στο εμπορικό στάδιο. Αυτά τα φίλτρα είναι ελαφρύτερα, λιγότερο δαπανηρά και πιο εύκολα στον έλεγχο σε σύγκριση με αυτά που χρησιμοποιούν πηγή ρεύματος. Οι απώλειές τους είναι μικρότερες από τα CSAF και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοπολογίες πολλαπλών και πολλών βαθμίδων (Akagi, et al., 2007).

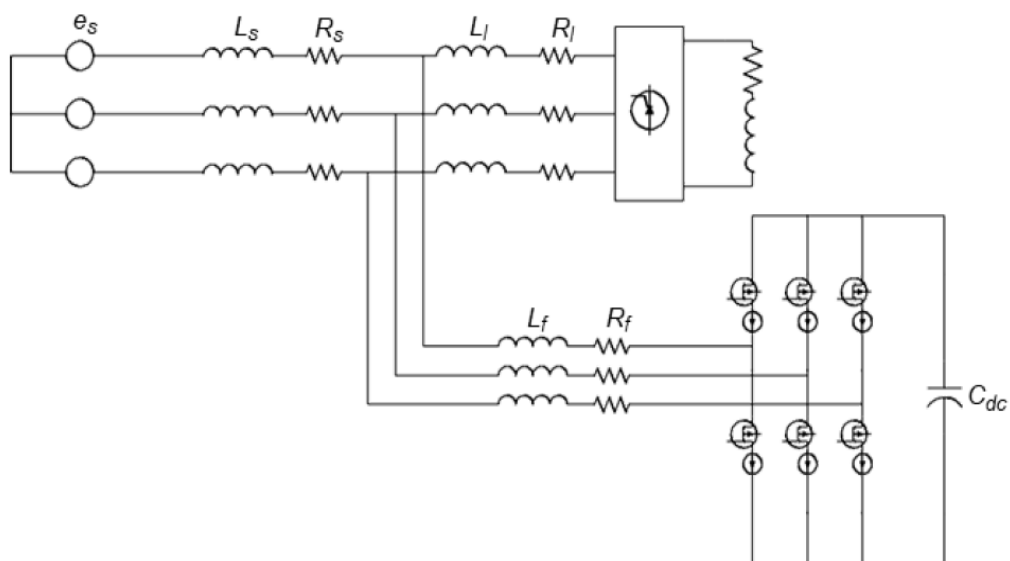
Τα VSAF χρησιμοποιούν έναν πυκνωτή ως στοιχείο αποθήκευσης dc ενέργειας. Παρουσιάζονται σε μονοφασικά ή τριφασικά συστήματα, τριών ή τεσσάρων αγωγών. Αυτός ο τύπος ενεργού φίλτρου είναι κατάλληλος για συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS). Στα συστήματα UPS, είναι διαθέσιμη η αποθήκευση ενέργειας Dc και ο μετατροπέας DC / AC υπάρχει ήδη. Μια στρατηγική ελέγχου είναι απαραίτητη μόνο για τη μετατροπή του UPS σε ενεργό φίλτρο όταν η

πηγή βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες. Τα σχήματα 3.6 και 3.7 δείχνουν ένα μονοφασικό και τριφασικό VSAF. Τα  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $R_l$ ,  $L_l$ ,  $R_f$  και  $L_f$  είναι η αντίσταση και η επαγωγή της πηγής, του φορτίου και των πλευρών του φίλτρου αντίστοιχα. Διαφορετικά είδη τεχνικών ελέγχου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των VSAF. Αυτές οι τεχνικές ελέγχου περιλαμβάνουν τη στιγμιαία θεωρία p-q, τη σύγχρονη μέθοδο πλαισίου αναφοράς d-q και τη μέθοδο σύγχρονης ανίχνευσης (Akagi, et al., 2007).

Στα VSAF, η DC τάση του πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση γραμμής. Για τη σωστή λειτουργία του ενεργού φίλτρου, κάθε στιγμή, η τάση του πυκνωτή συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να είναι 1,5 φορές μεγαλύτερη από μέγιστη τάση γραμμής.



Σχήμα 3.6. Ένα μονοφασικό ενεργό φίλτρο σειράς πηγής τάσης (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.7. Ένα τριφασικό ενεργό φίλτρο πηγής τάσης (Akagi, et al., 2007).



Όταν το παράλληλο τριφασικό VSAF αντισταθμίζει τις αρμονικές ρεύματος ενός τριφασικού, εξαπαλμικού AC / DC ανορθωτή, για τον έλεγχο του ενεργού φίλτρου κατά τη διάρκεια της μεταγωγής του ανορθωτή, η τάση του πυκνωτή dc,  $V_C$  μπορεί να βρεθεί από την ακόλουθη εξίσωση (Akagi, et al., 2007):

$$V_C \geq \sqrt{\sqrt{3}\pi V} \sqrt{\cos^2(a) + [(k+1)\sin(a) + \delta\kappa]^2} \quad (3.6)$$

$$k = \frac{L_f}{L_s + L_l}, \delta = \sqrt{6}(L_s - L_l)/\pi V \omega \quad (3.7)$$

Όπου  $V$  είναι η τιμή RMS της τάσης γραμμής και  $a$  η γωνία έναυσης των ημιαγωγών του ανορθωτή (Akagi, et al., 2007).

Το  $L_f$  λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ του φίλτρου και του συστήματος. Ένα ενεργό φίλτρο δίνει το ρεύμα του στο σύστημα δια μέσω της επαγωγής. Για καλύτερη δυνατότητα ελέγχου του ενεργού φίλτρου, αυτή η επαγωγή δεν θα πρέπει να είναι μεγάλη. Από την άλλη, το  $L_f$ , ως πρώτη τάξης παθητικό φίλτρο, εξαλείφει τη συχνότητα μεταγωγής, η οποία παράγεται από τον μετατροπέα. Με βάση αυτή τη λειτουργία, το  $L_f$  δεν πρέπει να είναι μικρό. Επομένως, πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός για την κατάλληλη τιμή του  $L_f$  (Akagi, et al., 2007).

Ο πυκνωτής συνεχούς ρεύματος,  $C_{dc}$ , πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να περιορίζει την κυμάτωση της τάσης. Για λόγους ελέγχου, η κυμάτωση σε αυτόν τον πυκνωτή πρέπει να είναι μικρή. Γενικά, το ελάχιστο  $C_{dc}$  μπορεί να βρεθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{dc} = \frac{P_h}{\omega V_C \Delta V_C} \quad (3.8)$$

όπου  $P_h$  είναι η μέγιστη ισχύς των αρμονικών, η οποία πρέπει να παραδοθεί σε κάθε μισή περίοδο, και  $\Delta V_C$  είναι η από κορυφή σε κορυφή κυμάτωση της τάσης στον πυκνωτή (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.3. Παράλληλα ενεργά φίλτρα

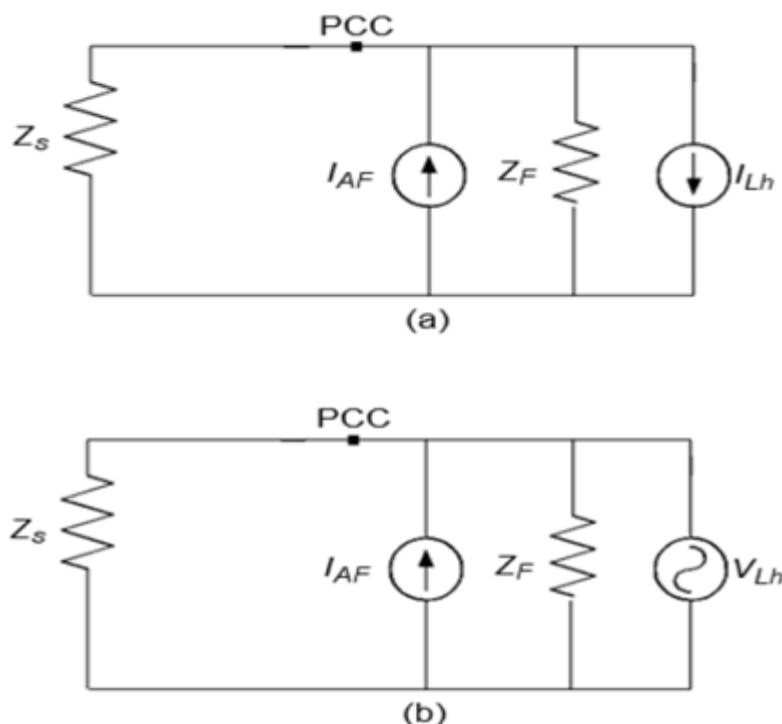
Ο πιο δημοφιλής τύπος ενεργών φίλτρων είναι το παράλληλο ενεργό φίλτρο. Τα ενεργά φίλτρα διανομής μπορούν να είναι μονοφασικά ή τριφασικά, πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος. Το σχήμα 3.8 δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κυκλώματος με ενεργό φίλτρο, πηγή και φορτίο σε περιπτώσεις όπου το φίλτρο χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση του αρμονικού ρεύματος και

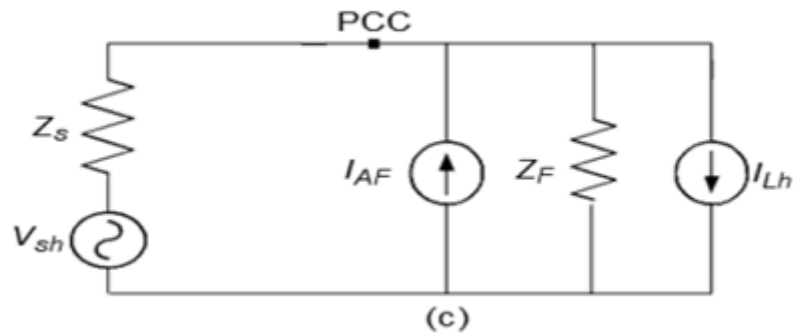
τάσης. Στο σχήμα 3.8 (a) το ενεργό φίλτρο αντισταθμίζει το αρμονικό ρεύμα ενός μη γραμμικού φορτίου. Το σχήμα 3.8 (b) δείχνει ότι το παράλληλο ενεργό φίλτρο δεν μπορεί να αντισταθμίσει τις αρμονικές τάσης του φορτίου. Το σχήμα 3.8 (c) δείχνει ότι το ενεργό φίλτρο μπορεί να αντισταθμίσει τις αρμονικές ρεύματος του φορτίου και την αρμονική τάση της πηγής. Στο σχήμα 3.7, τα  $Z_s$  και  $Z_F$  είναι αντιστάσεις της πηγής και του παράλληλου παθητικού φίλτρου, αντίστοιχα. Τα  $I_{Lh}$ ,  $V_{Lh}$  και  $V_{sh}$  είναι οι αρμονικές ρεύματος του φορτίου, οι αρμονικές τάσης του φορτίου και της πηγής, αντίστοιχα. Το  $I_{AF}$  είναι το ρεύμα του παράλληλου ενεργού φίλτρου (Akagi, et al., 2007).

Για την πλήρη αντιστάθμιση των αρμονικών στο σημείο της σύζευξης (PCC) στο Σχήμα 3.8 (a), πρέπει να έχουμε: (Akagi, et al., 2007).

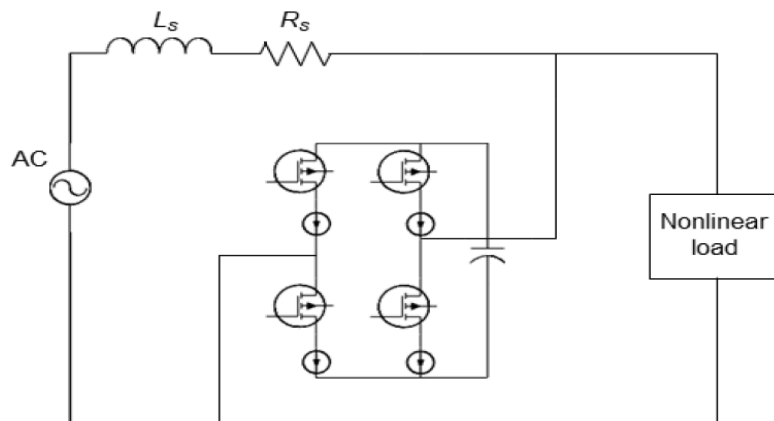
$$I_{AF} = I_{Lh} \quad (3.9)$$

Το σχήμα 3.9 δείχνει ένα μονοφασικό ενεργό φίλτρο πηγής τάσης. Τα παράλληλα ενεργά φίλτρα χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση των αρμονικών του ρεύματος των μη γραμμικών φορτίων, για την εκτέλεση αντιστάθμισης της άεργης ισχύος και για την εξισορρόπηση των ρευμάτων στις 3 φάσεις. Ένα παράλληλο ενεργό φίλτρο ανιχνεύει το ρεύμα φορτίου και εγχέει ρεύμα στο σύστημα για να αντισταθμίσει τις αρμονικές ρεύματος ή το άεργο φορτίο (Akagi, et al., 2007).





**Σχήμα 3.8.** Ισοδύναμο κύκλωμα ενεργού φίλτρου με πηγή και φορτίο, (a) αντιστάθμιση αρμονικών ρεύματος του φορτίου, (b) μη αντιστάθμιση της αρμονικής τάσης του φορτίου και (c) αντιστάθμιση της αρμονικής τάσης της πηγής (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.9** Ένα τυπικό μονοφασικό παράλληλο ενεργό φίλτρο πηγής τάσης (Akagi, et al., 2007).

Τα μεταγωγικά στοιχεία του παράλληλου φίλτρου έχουν περίπου την μισή ονομαστική ισχύ σε σχέση με αυτά του φίλτρου σειράς. Η τάση κορυφής που αναπτύσσεται στα μεταγωγικά στοιχεία του φίλτρου σειράς είναι περίπου το ένα τρίτο της τάσης κορυφής που αναπτύσσεται στα μεταγωγικά στοιχεία του παράλληλου φίλτρου.

Το παράλληλο ενεργό φίλτρο λειτουργεί ως πηγή ρεύματος. Το άθροισμα του ρεύματος του και του ρεύματος του φορτίου είναι το συνολικό ρεύμα που ρέει μέσω της πηγής. Επομένως, ο έλεγχος του ρεύματος εξόδου του ενεργού φίλτρου μπορεί να ελέγξει το πόσο ρεύμα απορροφούμε από την πηγή (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.4. Μετασχηματισμός Clarke (αβ0)

Η p-q θεωρία κάνει χρήση του μετασχηματισμού Clarke ο οποίος με τη βοήθεια ενός πραγματικού πίνακα μετασχηματίζει τις τριφασικές τιμές τάσεων, ρευμάτων και ισχύων στο σταθερό πεδίο

τιμών αβ0 και στους αντίστοιχους σταθερούς άξονες. Οι βασικές εξισώσεις μετασχηματισμού είναι οι παρακάτω (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

και ο αντίστροφος μετασχηματισμός δίνεται από τη σχέση

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

αντίστοιχα για τα ρεύματα προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

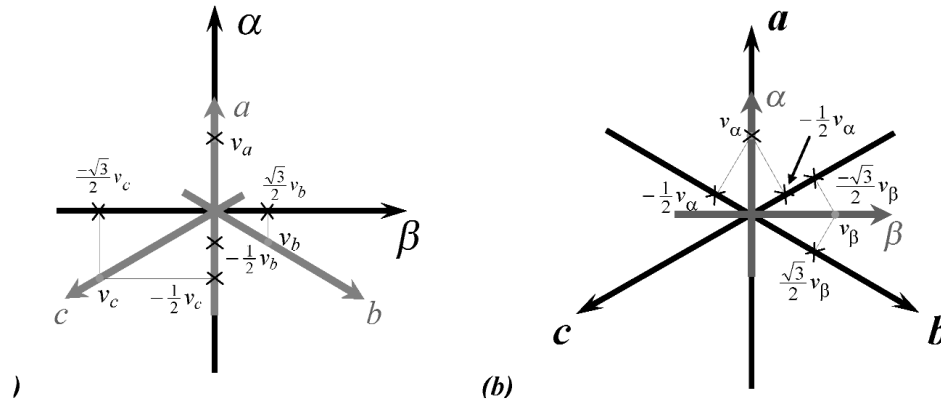
Οι παραπάνω μετασχηματισμοί προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα του διαχωρισμού της ομοπολικής συνιστώσας από τις υπόλοιπες. Οι άξονες α και β δεν έχουν καμμία συνεισφορά στα μέρη που απαρτίζουν την ομοπολική συνιστώσα. Επίσης, σε τριφασικά συστήματα τριών αγωγών και σε συμμετρικά τριφασικά συστήματα τεσσάρων αγωγών δεν υπάρχει ομοπολική συνιστώσα κι έτσι μπορεί να αγνοηθεί από τις παραπάνω εξισώσεις. Έτσι προκύπτει η απλοποιημένη μορφή τους η οποία δίνεται παρακάτω: (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

και ο αντίστροφος μετασχηματισμός δίνεται από τη σχέση

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Σε περίπτωση όμως που υπάρχουν ομοπολικές συνιστώσες τάσης και ρεύματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι πλήρεις εξισώσεις. Η γραφική αναπαράσταση των παραπάνω τάσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (βλέπε σχήμα 3.10).

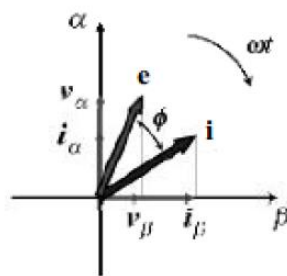


**Σχήμα 3.10.** α) Μετασχηματισμός Clarke (*abc* σε  $\alpha\beta$ ). β) Αντίστροφος μετασχηματισμός Clarke ( $\alpha\beta$  σε *abc*) (Akagi, et al., 2007).

Από τις παραπάνω συνιστώσες του μετασχηματισμού Clarke προκύπτουν τα διανύσματα τάσης και ρεύματος στο σταθερό σύστημα αναφοράς  $\alpha\beta$ , τα οποία δίνονται από τις σχέσεις.

$$e = V_\alpha + jV_\beta \quad (3.16)$$

$$i = i_\alpha + j i_\beta \quad (3.17)$$



**Σχήμα 3.11.** Αναπαράσταση διανυσμάτων τάσης και ρεύματος στο σύστημα (Akagi, et al., 2007).

Να σημειωθεί ότι γενικά τα παραπάνω διανύσματα αποτελούν συναρτήσεις του χρόνου αφού αποτελούνται από τις συνιστώσες Clarke του τριφασικού συστήματος. Στην ειδική περίπτωση του

τριφασικού συμμετρικού συστήματος, τα διανύσματα τάσης και ρεύματος έχουν σταθερό πλάτος και κινούνται με ωρολογιακή φορά από τον άξονα α προς τον άξονα β με τη γωνιακή συχνότητα που έχει το τριφασικό σύστημα (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.5. Θεωρία στιγμιαίας ισχύος (p-q theory)

Η θεωρία στιγμιαίας ισχύος παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές θεωρίες ηλεκτρικής ισχύος. Καθώς βασίζεται σε τιμές στιγμιαίας ισχύος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση τόσο κατά τη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας όσο και κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Ακόμη, η εφαρμογή της συγκεκριμένης θεωρίας επεκτείνεται και στην περίπτωση γενικευμένων κυματομορφών τάσης και ρεύματος σε αντίθεση με τις συμβατικές θεωρίες που η ανάλυση μπορεί να γίνει μόνο για ημιτονοειδή ρεύματα και τάσεις. Επιπλέον, εκτός από τριφασικά συστήματα 3 αγωγών, η p-q θεωρία βρίσκει εφαρμογή και σε τριφασικά συστήματα 4 αγωγών γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό καθώς όλα τα συστήματα διανομής ισχύος χαμηλής τάσης έχουν και ουδέτερο αγωγό πλην των τριών φάσεων (Akagi, et al., 2007).

Γενικά, η λειτουργία των ενεργών φίλτρων, που έχει ως στόχο την αντιστάθμιση των αρμονικών, στηρίζει τα αποτελέσματά της στη χρήση της p-q θεωρίας. Αυτό συμβαίνει διότι δίνεται η δυνατότητα εύρεσης των κατάλληλων ρευμάτων αντιστάθμισης για μια επιτυχή αντιστάθμιση. Έτσι μπορούμε να απαλείψουμε τις αρμονικές του ρεύματος των 3 φάσεων και του ουδέτερου αγωγού με μηδενική μεταφερόμενη μέση ισχύ από το ενεργό φίλτρο (Αλεξάνδρου & Κωνσταντίνου 2009).

### 3.3.6. Ανάλυση θεωρίας p-q

**Στιγμιαίες Ισχύεις:** Για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος στα δύο συστήματα αναφοράς abc και αβ0 έχουμε:

$$P_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) \leftrightarrow P_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_0 i_0 = p_a(t) + p_b(t) + p_0(t) = p(t) + p_0 \quad (3.18)$$

Όπου

$p = p_a + p_b$  είναι η **πραγματική στιγμιαία ισχύς (instantaneous real power)** και

$p_0 = v_0 * i_0$  είναι η **στιγμιαία ομοπολική ισχύς (instantaneous zero – sequence power)**.

Παρατηρούμε από την παραπάνω εξίσωση ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των παραμέτρων  $\alpha\beta 0$  σε σχέση με τις παραμέτρους  $abc$  είναι ο διαχωρισμός της ομοπολικής συνιστώσας από το σύστημα.

Στη συνέχεια ορίζεται η εξής ποσότητα:

$$q \triangleq V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha \quad (3.19)$$

Η καινούργια μεταβλητή  $q$  στη θεωρία της στιγμιαίας ονομάζεται στιγμιαία φανταστική ισχύς (instantaneous imaginary power) και μάλιστα η μονάδα μέτρησής της είναι το IVA (Imaginary Volt-Ampere). Παρατηρούμε ότι η ισχύς  $q$  δεν επηρεάζεται από τις ομοπολικές συνιστώσες του συστήματος καθώς ο υπολογισμός της εξαρτάται μόνο από τις συνιστώσες στους άξονες  $\alpha$ - $\beta$ . Οι παραπάνω εξισώσεις συνοψίζονται σε μορφή πίνακα ως εξής (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Παρατηρείται γενικά ότι τα μεγέθη πραγματικής ισχύος είναι αυτά τα οποία αποτελούνται από γινόμενα της στιγμιαίας τάσης σε μία φάση και του στιγμιαίου ρεύματος στην ίδια φάση. Αντίθετα τα γινόμενα στιγμιαίας τάσης και στιγμιαίου ρεύματος διαφορετικών φάσεων δεν αποτελούν πραγματικές στιγμιαίες ισχύς και συνιστούν την φανταστική στιγμιαία ισχύ  $q$  (Akagi, et al., 2007).

**Στιγμιαία ενεργά και φανταστικά ρεύματα:** Θα θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα τριφασικό σύστημα τριών αγωγών στο οποίο δεν υπάρχει ομοπολική συνιστώσα άρα και ομοπολική ισχύς  $p_0$ . Οι ισχύς του συστήματος μπορούν να γραφούν ως εξής (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.21)$$



Από την παραπάνω εξίσωση καταλήγουμε, για  $\Delta = V_a^2 + V_\beta^2$ , στην εξής σχέση για τα ρεύματα στους άξονες α-β

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad (3.22)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτουν οι τελικές σχέσεις για τα ρεύματα

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Παρατηρείται ότι το ρεύμα σε κάθε φάση του κυκλώματος α-β έχει μια συνιστώσα που πολλαπλασιάζεται με την πραγματική στιγμιαία ισχύ κι ένα μέρος που πολλαπλασιάζεται με τη φανταστική στιγμιαία ισχύ. Έτσι δημιουργούνται στιγμιαία ενεργά και φανταστικά ρεύματα σε καθένα από τους άξονες α-β (Akagi, et al., 2007).

- Στιγμιαίο ενεργό ρεύμα (instantaneous active current) στον άξονα α:  $i_{ap} = \frac{V_\alpha}{V_a^2 + V_\beta^2} p$
- Στιγμιαίο φανταστικό (instantaneous reactive current) ρεύμα στον άξονα α:  $i_{aq} = \frac{V_\beta}{V_a^2 + V_\beta^2} q$
- Στιγμιαίο ενεργό ρεύμα (instantaneous active current) στον άξονα β:  $i_{\beta p} = \frac{V_\beta}{V_a^2 + V_\beta^2} p$
- Στιγμιαίο φανταστικό ρεύμα (instantaneous reactive current) στον άξονα β:  $i_{\beta q} = \frac{-V_\beta}{V_a^2 + V_\beta^2} q$

Παρατηρώντας τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Η τριφασική στιγμιαία πραγματική ισχύς  $p$  ορίζεται σε ένα οποιοδήποτε σύστημα τριών ή τεσσάρων αγωγών στη μόνιμη ή στην μεταβατική κατάσταση ισορροπίας σαν τη συνολική ροή ενέργειας ανά sec ανάμεσα σε δύο ηλεκτρικά συστήματα και είναι τελείως ανεξάρτητη από την ομοπολική ισχύ. Ακόμη, η στιγμιαία πραγματική ισχύς χωρίζεται σε δύο τμήματα για καθένα από τους άξονες α-β του συστήματος αναφοράς (Akagi, et al., 2007).

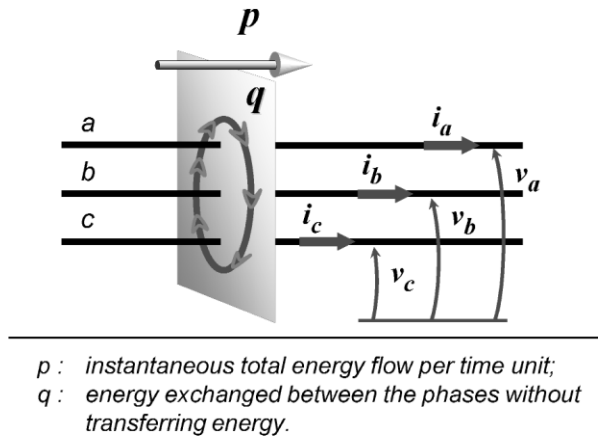
Παραπάνω καταλήξαμε ότι πάντα ισχύει  $P_{\alpha\alpha} + P_{\beta\beta} = 0$ . Άρα οι παραπάνω συνιστώσες δε συνεισφέρουν ούτε στη στιγμιαία ούτε στη μέση ροή ισχύος από την πηγή προς το φορτίο. Για το λόγο αυτό, οι δύο αυτοί όροι ονομάστηκαν άεργος ισχύς στους άξονες  $\alpha$  και  $\beta$ . Η φανταστική στιγμιαία ισχύς  $q$  είναι ο όρος που δηλώνει το μέγεθος των δύο προηγούμενων. Στη θεωρία p-q η έννοια της άεργης ισχύος αντιστοιχεί στα τμήματα εκείνα της συνολικής στιγμιαίας ισχύος τα οποία εξαρτώνται από την φανταστική στιγμιαία ισχύ, υπάρχει σε κάθε φάση ανεξάρτητα αλλά εξαφανίζεται όταν προστίθεται στο σύστημα  $\alpha$ - $\beta$ . Αν οι παραπάνω άεργες τιμές της ισχύος μετασχηματισθούν πίσω στο αρχικό τριφασικό abc σύστημα αναφοράς συνεχίζουν να απαλείφονται όταν προστίθενται. Τέλος, επειδή το άθροισμα των δύο άεργων ισχύων στους δύο άξονες είναι πάντα μηδέν συμπεραίνουμε ότι η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος που αντιπροσωπεύουν μπορεί να γίνει με στοιχεία που δεν αποθηκεύουν ισχύ (πηνία, πυκνωτές) (Akagi, et al., 2007).

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να ξεκαθαριστούν ορισμένες πτυχές που σχετίζονται με τη φυσική σημασία της στιγμιαίας φανταστικής ισχύος  $q$ . Η σχέση αυτή με όρους συστήματος αναφοράς abc μπορεί να γραφεί ως εξής (Akagi, et al., 2007):

$$q = \frac{(V_a - V_b) + (V_b - V_c)i_a + (V_c - V_a)i_b}{\sqrt{3}} = \frac{V_{ab}i_c + V_{bc}i_a + V_{ca}i_b}{\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

Να σημειωθεί ότι η φανταστική στιγμιαία ισχύς  $q$  ορίζεται, στο σύστημα αναφοράς  $\alpha$ - $\beta$ , ως το άθροισμα συνιστωσών ρευμάτων και τάσεων οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικό άξονα. Ομοίως, και στο σύστημα abc προκύπτει ότι υπολογίζεται από τάσεις γραμμής και ρεύματα γραμμών διαφορετικών φάσεων. Η παραπάνω έκφραση μοιάζει πολύ με εκείνη που εφαρμόζεται σε πολλά μετρητικά όργανα για τον υπολογισμό της τριφασικής άεργης ισχύος. Η διαφορά έγκειται στο ότι σε αυτά τα όργανα χρησιμοποιούνται τα στρεφόμενα διανύσματα τάσης και ρεύματος που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη αρμονική. Αντίθετα, εδώ χρησιμοποιούνται στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η φανταστική ισχύς  $q$  δε συνεισφέρει στη συνολική ροή ενέργειας μεταξύ της πηγής και του φορτίου, και αντίστροφα. Η στιγμιαία φανταστική ισχύς  $q$  είναι ανάλογη με την ποσότητα της ενέργειας που ανταλλάσσεται μεταξύ των φάσεων του συστήματος. Σε καμία χρονική στιγμή δεν συνεισφέρει στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ της πηγής και του φορτίου. Να σημειωθεί ότι με τον όρο “μεταφορά ενέργειας” δεν εννοούμε μόνο την ενέργεια που παραδίδεται στο φορτίο αλλά και την ταλαντευόμενη ενέργεια μεταξύ της πηγής και του φορτίου. Αυτό είναι σημαντικό να ξεκαθαρισθεί διότι οι “παραδοσιακές” τιμές της ισχύος ορίζουν την άεργο ισχύ ως μια συνιστώσα της στιγμιαίας ενεργού ισχύος, η οποία έχει όμως

μηδενική μέση τιμή δηλαδή ταλαντώνεται μεταξύ πηγής και φορτίου. Όλα τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στο σχήμα 3.12 (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.12.** Φυσική σημασία της στιγμιαίας πραγματικής και φανταστικής ισχύος (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.6.1. Ύπαρξη ομοπολικής συνιστώσας

Μέχρι τώρα αναφερόμασταν σε τριφασικά συστήματα τριών αγωγών στα οποία η ομοπολική συνιστώσα ήταν μηδενική. Σε περίπτωση που έχουμε συστήματα τεσσάρων αγωγών, όπως είναι συνήθως τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, είναι πολύ πιθανό είτε λόγω ασυμμετριών είτε λόγω ύπαρξης τριπλών αρμονικών<sup>2</sup> να υπάρξει ροή ρεύματος στον ουδέτερο αγωγό, γεγονός που θα οδηγήσει στη δημιουργία ομοπολικής συνιστώσας τάσης και ρεύματος άρα και ισχύος. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη φύση της ομοπολικής ισχύος, ας θεωρήσουμε ότι μια τριφασική πηγή τάσης αποτελείται από τάσεις ορθής ή θετικής και ομοπολικής συνιστώσας στη συχνότητα  $\omega$ . Η μορφή των τάσεων και των ρευμάτων είναι η εξής (Akagi, et al., 2007):

$$V_a = \sqrt{2}V + \sin(\omega t + \varphi_{V+}) + \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t + \varphi_{V0}) \quad (3.25)$$

$$I_a = \sqrt{2}I + \sin(\omega t + \varphi_{i+}) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \varphi_{i0}) \quad (3.26)$$

Ομοίως προκύπτουν οι τάσεις και τα ρεύματα το υπόλοιπων τριών φάσεων. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό στο σύστημα αναφοράς  $\alpha$ - $\beta$  έχουμε ότι (Akagi, et al., 2007):

<sup>2</sup> Σε τριφασικά κυκλώματα με ουδέτερο, οι εντάσεις των ρευμάτων της τρίτης αρμονικής καθώς και των μεγαλύτερων, περιττών, πολλαπλάσιων της τρίτης, συνιστωσών της φέρουσας των 50 Hz, που είναι γνωστές και σαν ομοπολικές ή τριπλές αρμονικές (3ης, 9ης, 15ης τάξης κ.ο.κ) αθροίζονται αριθμητικά, ως επιστροφές στον ουδέτερο αγωγό.

$$p_0 = v_0 i_0 = 3V_0 I_0 \cos(\varphi_{v^0} - \varphi_{i^0}) - 3V_0 I_0 \cos(2\omega t + \varphi_{v^0} + \varphi_{i^0}) = \overline{p_0} + \widetilde{p_0} \quad (3.27)$$

Παρατηρείται ότι η παραπάνω ισχύ έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά ενός μονοφασικού κυκλώματος. Πιο συγκεκριμένα έχει μια μέση τιμή και εναλλασσόμενη τιμή με συχνότητα διπλάσια της πηγής. Η μέση τιμή αντιπροσωπεύει μια μονής κατεύθυνσης ροή ισχύος, δηλαδή έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τη συμβατική ενεργό (μέση) ισχύ. Η εναλλασσόμενη συνιστώσα επίσης μεταφέρει ισχύ στιγμιαία αλλά έχει μηδενική μέση τιμή. Παρατηρούμε ότι τόσο στιγμιαία όσο και σε μέση τιμή αυξάνεται η συνολική μεταφερόμενη ισχύ. Επειδή όμως η μέση τιμή της ομοπολικής ισχύος συνοδεύεται πάντα από μία εναλλασσόμενη ομοπολική ισχύ, όταν εξαλείφουμε την εναλλασσόμενη συνιστώσα εξαλείφεται και η μέση τιμή. Επομένως η ομοπολική ισχύ είναι ανεπιθύμητη στα περισσότερα κυκλώματα μέχρι να βρεθεί ένας τρόπος να μηδενίζουμε την εναλλασσόμενη συνιστώσα και να διατηρούμε τη μέση τιμή της (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.6.2. Ύπαρξη Παραμορφώσεων στις Τάσεις και στα Ρεύματα

Παραπάνω έχει επισημανθεί ότι η p-q θεωρία είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε μη ημιτονοειδής καταστάσεις. Ας θεωρηθεί επομένως ένα τριφασικό ηλεκτρικό σύστημα το οποίο έχει ημιτονοειδείς συμμετρικές τάσεις τροφοδοσίας αλλά τα ρεύματα γραμμής έχουν την εξής μορφή:

$$\begin{aligned} i_a &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \\ i_b &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n(\omega t + 120^\circ) - \varphi_n) \\ i_c &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n(\omega t - 120^\circ) - \varphi_n) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Μετατρέποντας τις παραπάνω τάσεις και ρεύματα στο σύστημα αναφοράς α-β υπολογίζονται οι διάφορες στιγμιαίες ισχύς. Έτσι θα έχουμε:

$$\begin{aligned} p &= v_a i_a + v_b i_b = p_{ap} + p_{bp} = 3V I_1 \cos\varphi_1 + 3V I_2 \cos(3\omega t - \varphi_2) + 3V I_4 \cos(3\omega t + \varphi_4) \dots \\ q &= v_a i_b - v_b i_a = 3V I_1 \sin\varphi_1 + 3V I_2 \sin(3\omega t - \varphi_2) + 3V I_4 \cos(3\omega t + \varphi_4) \dots \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$p_0 = v_0 i_0 = 0 \quad (3.30)$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις είναι λογικό να γραφτεί ότι:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.31)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.32)$$

όπου ο πρώτος όρος αναφέρεται στη μέση τιμή και ο δεύτερος εναλλασσόμενες συνιστώσες με μηδενική μέση τιμή. Ακόμη καταλήγουμε ότι:

$$\bar{p} = P_{3\phi} \text{ και } \bar{q} = Q_{3\phi} \quad (3.33)$$

Τέλος, υπολογίζεται η **αρμονική ισχύς/ισχύς παραμόρφωσης**, η οποία οφείλεται στις αρμονικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H = \sqrt{\bar{P}^2 + \bar{Q}^2} \quad (3.34)$$

Όπου  $\bar{P}$  και  $\bar{Q}$  είναι ενεργές τιμές των εναλλασσομένων μεγεθών της στιγμιαίας ενεργού και φανταστικής ισχύος (Akagi, et al., 2007).

Από τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται κατανοητή η σχέση μεταξύ της θεωρίας p-q και της “παραδοσιακής” θεωρίας ηλεκτρικής ισχύος. Η μέση τιμή της στιγμιαίας πραγματικής ισχύος, δηλαδή η  $\bar{p}$ , αντιστοιχεί στην συμβατική μέση ενεργό ισχύ. Το εναλλασσόμενο μέρος της στιγμιαίας ενεργού ισχύος  $\tilde{p}$ , αντιπροσωπεύει την ενέργεια ανά sec που μεταφέρεται από την πηγή προς το φορτίο και αντίστροφα σε κάθε χρονική στιγμή, λόγω της ύπαρξης των αρμονικών και έχει μέση τιμή μηδέν. Αυτή η διακύμανση της ενέργειας μεταξύ της πηγής και του φορτίου αντιπροσωπεύει την ενέργεια που αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται στην πηγή ή στο φορτίο και δε συνεισφέρει στη μεταφορά ενέργειας από την πηγή στο φορτίο (Akagi, et al., 2007).

Η μέση τιμή της στιγμιαίας φανταστικής ισχύος  $\bar{q}$ , αντιστοιχεί στη συμβατική άεργο ισχύ που δε συνεισφέρει στη μεταφορά ενέργειας. Το εναλλασσόμενο μέρος της στιγμιαίας φανταστικής ισχύος,  $\tilde{q}$ , είναι υπεύθυνο για την αρμονική άεργο ισχύ σε κάθε φάση, η οποία όμως εξαφανίζεται στιγμιαία όταν προστίθεται. Η συνολική στιγμιαία φανταστική ισχύς ανταλλάσσεται μεταξύ των τριών φάσεων και δε συνεισφέρει στη στιγμιαία μεταφορά ενέργειας, παρά το γεγονός ότι τα άεργα ρεύματα υπάρχουν σε κάθε φάση και καταλαμβάνουν μέρος της διατομής του αγωγού (Akagi, et al., 2007).

Γενικά, όλες οι αρμονικές της τάσης και του ρεύματος μπορούν να συνεισφέρουν στις μέσες ισχύς  $\bar{p}$  και  $\bar{q}$ , αρκεί να έχουν την ίδια συχνότητα. Από την άλλη, αρμονικές τάσης και ρεύματος διαφορετικής τάξης συνεισφέρουν στην ανάπτυξη των εναλλασσόμενων συνιστωσών  $\tilde{p}$  και  $\tilde{q}$  (Akagi, et al., 2007).

Με τον όρο **ενεργό ρεύμα** αναφερόμαστε στα ρεύματα εκείνα τα οποία συνεισφέρουν στη στιγμιαία μεταφορά ενέργειας από την πηγή προς το φορτίο και αντίστροφα, είτε αυτή η μεταφορά είναι μιας κατεύθυνσης είτε εναλλασσόμενη. Πιο συγκεκριμένα, η DC συνιστώσα της πραγματικής ισχύος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα ενώ η AC συνιστώσα της πραγματικής ισχύος είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ρεύματος στις ανώτερες αρμονικές. Με τον όρο **άεργο ρεύμα** αναφερόμαστε σε εκείνα τα ρεύματα τα οποία δεν συνεισφέρουν στη στιγμιαία μεταφορά ενέργειας από την πηγή προς το φορτίο αλλά αντιπροσωπεύουν την ισχύ που εναλλάσσεται μεταξύ των φάσεων. Παρομοίως, η DC συνιστώσα της φανταστικής ισχύος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός άεργου ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα ενώ η AC συνιστώσα της φανταστικής ισχύος ευθύνεται για τη δημιουργία ρεύματος στις ανώτερες αρμονικές. Το άθροισμα των παραπάνω ενεργών και άεργων ρευμάτων δίνει το AC ρεύμα, που διαρρέει τους αγωγούς, σε όλο το αρμονικό του περιεχόμενο (Akagi, et al., 2007).

Συνοψίζοντας, παρατηρείτε ότι η θεωρία στιγμιαίας ισχύος, η οποία υπολογίζει τις διαφορές ισχύς στο πεδίο του χρόνου, δεν αντιτίθεται στις ήδη υπάρχουσες θεωρίες ισχύος, οι οποίες υπολογίζουν τις διαφορές ισχύς στο πεδίο της συχνότητας, αλλά δρα συμπληρωματικά (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.6.3. Στρατηγικές αντιστάθμισης

Τρία διαφορετικά είδη στρατηγικών είναι διαθέσιμα όταν κάποιος εφαρμόζει τη θεωρία p-q και δίνονται παρακάτω:

1. Απορρόφηση μιας σταθερής στιγμιαίας πραγματικής ισχύος από την πηγή.
2. Απορρόφηση ημιτονοειδούς ρεύματος από την πηγή.
3. Απορρόφηση της ελάχιστης rms τιμής του ρεύματος της πηγής, που μεταφέρει την ίδια ενέργεια στο φορτίο, με ελάχιστες απώλειες κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή έχει κυματομορφές ρεύματος, ανάλογες με αυτές των αντίστοιχων τάσεων (Akagi, et al., 2007).

Σε τριφασικές ημιτονοειδείς συμμετρικές τάσεις, είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα και τα τρία χαρακτηριστικά αντιστάθμισης που δόθηκαν παραπάνω (Akagi, et al., 2007).

Είναι αδύνατο να αντισταθμιστεί το ρεύμα φορτίου και να εξαναγκαστεί το αντισταθμισμένο ρεύμα της πηγής να ικανοποιήσει ταυτόχρονα τα προαναφερθέντα τρία "βέλτιστα" χαρακτηριστικά αντιστάθμισης, εάν το σύστημα ισχύος περιέχει αρμονικές τάσης, ή ασυμμετρία στη βασική συχνότητα. Έτσι, με μη ημιτονοειδείς, ή μη συμμετρικές τάσεις του συστήματος, το παράλληλο ενεργό φίλτρο μπορεί να αντισταθμίσει τα ρεύματα φορτίου για να εγγυηθεί μόνο ένα από τα τρία χαρακτηριστικά αντιστάθμισης. Επομένως, πρέπει να γίνει επιλογή πριν σχεδιάσουμε τον ελεγκτή ενός ενεργού φίλτρου (Akagi, et al., 2007).

Σε αυτή την εργασία η στρατηγική αντιστάθμισης που επιλέγεται είναι σταθερής στιγμιαίας πραγματικής ισχύος. Η στρατηγική ελέγχου αντιστάθμισης σταθερής στιγμιαίας πραγματικής ισχύος από ένα παράλληλο ενεργό φίλτρο ήταν η πρώτη στρατηγική που αναπτύχθηκε με βάση την θεωρία p-q και εισήχθη από τον Akagi το 1983. Από την άποψη της πραγματικής και της φανταστικής ισχύος, προκειμένου να αντληθεί μια σταθερή τιμή στιγμιαίας ισχύος από την πηγή, το παράλληλο ενεργό φίλτρο θα πρέπει να εγκατασταθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μη γραμμικό φορτίο και θα πρέπει να αντισταθμίσει την εναλλασσόμενη πραγματική ισχύ αυτού του φορτίου.

Ο αντισταθμιστής πρέπει να προσφέρει την αντίθετη στιγμιαία άεργο ισχύ και την αντίθετη εναλλασσόμενη στιγμιαία πραγματική ισχύ προκειμένου να επιτευχθεί η αντιστάθμιση. Το αρνητικό πρόσημο το χρησιμοποιούμε για να δώσουμε έμφαση στη λειτουργία του φίλτρου η οποία δεν είναι άλλη από την παραγωγή του ακριβώς αντίθετου ρεύματος από εκείνο που παράγει τις ανεπιθύμητες συνιστώσες των τιμών ισχύος που επιλέχθηκαν για αντιστάθμιση (Akagi, et al., 2007).

Στιγμιαία άεργη ισχύς που παρέχεται από τον αντισταθμιστή:

$$q_c = -q \quad (3.35)$$

Στιγμιαία πραγματική ισχύς που παρέχει ο αντισταθμιστής:

$$p_c = -\tilde{p} \quad (3.36)$$

Η μέση τιμή των εναλλασσόμενων πραγματικών τιμών ισχύος στους άξονες  $\alpha$  και  $\beta$  είναι μηδέν, αλλά το άθροισμα των δύο σε κάθε χρονική στιγμή δεν είναι μηδέν, οπότε ο πυκνωτής πρέπει να παρέχει ενέργεια όταν η ταλαντευόμενη πραγματική ισχύς είναι θετική και να απορροφά ενέργεια όταν είναι αρνητική (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.7. Έλεγχος παράλληλων ενεργών φίλτρων

Κάθε ενεργό φίλτρο αποτελείται από τρεις βασικές βαθμίδες. Έναν αντιστροφέα, την βαθμίδα ελέγχου της ενεργού και φανταστικής ισχύος (Έλεγχος p-q) και παραγωγής των παλμών οδήγησης του αντιστροφέα και τρίτον έναν ρυθμιστή ο οποίος συγχρονίζει την τάση του αντιστροφέα με το δίκτυο (Akagi, et al., 2007).

#### Αντιστροφέας AC/DC

Οι αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, με βάση τον τρόπο αποθήκευσης της DC ενέργειας. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι:

- Αντιστροφέας πηγής ρεύματος (current source inverter) (Akagi, et al., 2007).
- Αντιστροφέας πηγής τάσης (voltage source inverter)

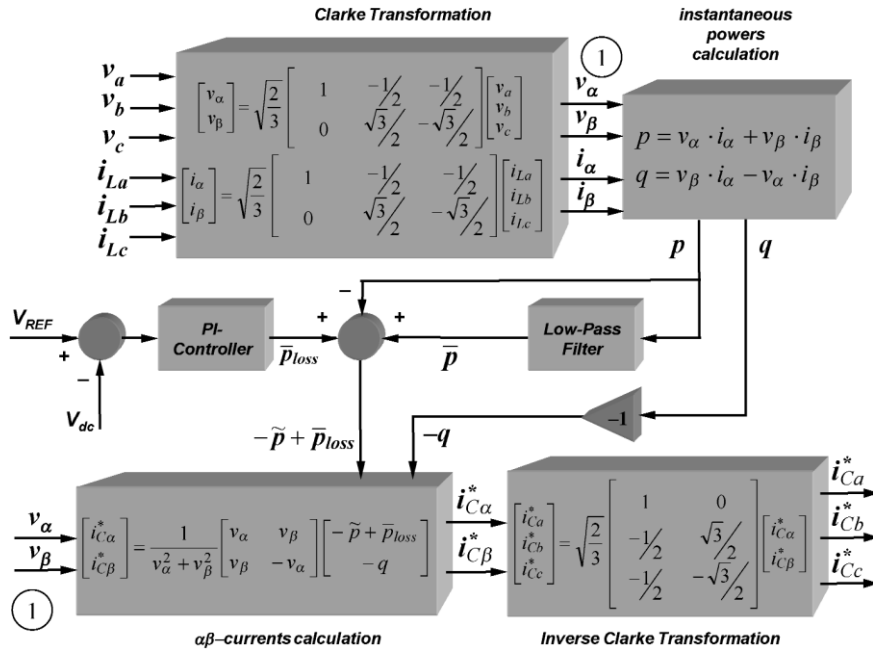
Ο έλεγχος του ενεργού φίλτρου πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο αποτελείται από τέσσερα κυκλώματα. Αυτά είναι (Akagi, et al., 2007) :

- **Κύκλωμα υπολογισμού ρευμάτων αναφοράς**, που χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:
  - Τριών αγωγών.
  - Τεσσάρων αγωγών (Akagi, et al., 2007).

#### Έλεγχος τριών αγωγών:

Στο σχήμα (3.13), έχοντας ως δεδομένα τις φασικές τάσεις ( $V_a, V_b, V_c$ ) και τα ρεύματα ( $I_{La}, I_{Lb}, I_{Lc}$ ) στο a-b-c σύστημα, η μονάδα ελέγχου, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Clarke υπολογίζει τις τάσεις και τα ρεύματα στο  $\alpha$ - $\beta$  επίπεδο χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που παρουσιάζονται στην συνέχεια.





Σχήμα 3.13. Μπλοκ διάγραμμα παράλληλου ενεργού φίλτρου τριών αγωγών (Akagi, et al., 2007).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Έχοντας υπολογίσει τις τάσεις και τα ρεύματα στο α-β σύστημα συντεταγμένων, βρίσκει τις συνιστώσες της ισχύος, χρησιμοποιώντας την σχέση που ακολουθεί.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_\beta \\ v_\beta & -v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

Τόσο η πραγματική, όσο και η φανταστική ισχύς, οι οποίες υπολογίστηκαν, αποτελούνται από ac και dc συνιστώσες. Επομένως έχουμε

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \tag{3.39}$$

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων αναφοράς,  $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ , στο α-β σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιούμε το σύνολο της φανταστικής ισχύος και την ac συνιστώσα της πραγματικής

ισχύος, προσθέτοντας σε αυτή μια ισχύς απωλειών  $P_{loss}$ , η οποία υπολογίζεται μέσω του ελεγκτή PI, του οποίου η λειτουργία θα αναπτυχθεί στην συνέχεια. Έχοντας λοιπόν όλα τα δεδομένα που χρειάζεται, η μονάδα ελέγχου υπολογίζει τα ρεύματα αναφοράς για το α-β επίπεδο χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \bar{p}_{loss} \\ -q \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

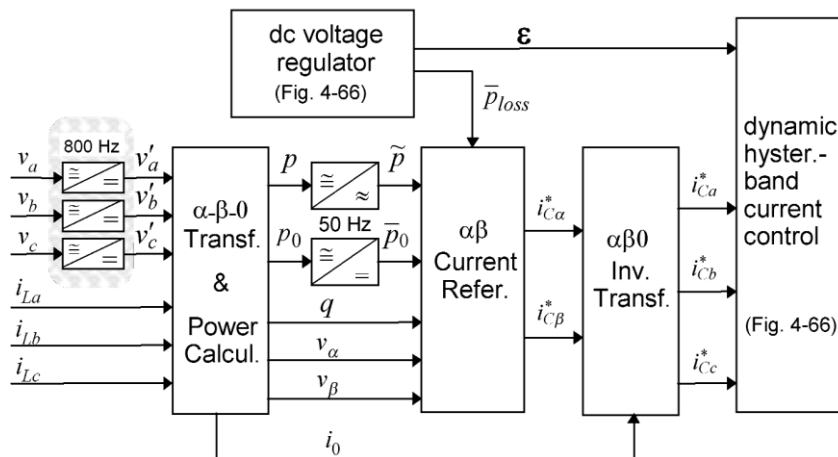
Τέλος, αφού έχουν υπολογιστεί τα ρεύματα αναφοράς στο α-β επίπεδο, χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Clarke, υπολογίζονται τα ρεύματα αναφοράς για το abc σύστημα συντεταγμένων. Δηλαδή κάνοντας χρήση της σχέσης που ακολουθεί έχουμε (Akagi, et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

### Έλεγχος τεσσάρων αγωγών

Στη συνέχεια περιγράφεται ο έλεγχος των παράλληλων ενεργών φίλτρων τεσσάρων αγωγών, δηλαδή τριφασικά συστήματα με ουδέτερο αγωγό. Αυτά τα ενεργά φίλτρα είναι ειδικά σχεδιασμένα για την αντιστάθμιση ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό (ρεύματα μηδενικής ακολουθίας) (Akagi, et al., 2007).

Στο σχήμα 3.14 που ακολουθεί παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος παραγωγής των ημιτονοειδών ρευμάτων αναφοράς για τριφασικό ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.14. Μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος παραγωγής των ημιτονοειδών ρευμάτων αναφοράς για τριφασικό ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών (Akagi, et al., 2007).

Οι είσοδοι του συστήματος είναι οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα γραμμής του φορτίου. Όμως, στην περίπτωση του τριφασικού συστήματος των τεσσάρων αγωγών, οι φασικές τάσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σαν είσοδοι του συστήματος λόγω των προβλημάτων αστάθειας που παρουσιάζονται. Για τον λόγο αυτό παρεμβάλουμε χαμηλοπερατά φίλτρα τα οποία είναι επιλεγμένα έτσι ώστε να αποκόπτουν συχνότητες άνω των 800 Hz, για την προστασία του συστήματος από παρεμβολές που πιθανών να προκύπτανε. (Akagi, et al., 2007).

Έχοντας λοιπόν σαν εισόδους τα ρεύματα των γραμμών και τις τάσεις οι οποίες περνάνε από το χαμηλοπερατό φίλτρο και με χρήση των τριών παρακάτω σχέσεων υπολογίζουμε τις τάσεις, τα ρεύματα και τις συνιστώσες της ισχύος αντίστοιχα στο αβθ σύστημα συντεταγμένων (Akagi, et al., 2007).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Έχοντας λοιπόν όλα τα δεδομένα που χρειάζεται, η μονάδα ελέγχου υπολογίζει τα ρεύματα αναφοράς για το α-β επίπεδο χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \bar{p}_{loss} \\ -q \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Τέλος, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα που προηγήθηκε, χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό αβθ, υπολογίζουμε τα στιγμιαία ρεύματα αναφοράς για την τεχνική ελέγχου του ρεύματος με σταθερή ζώνη υστέρησης, κάνοντας χρήση της παρακάτω σχέσης (Akagi, et al., 2007).

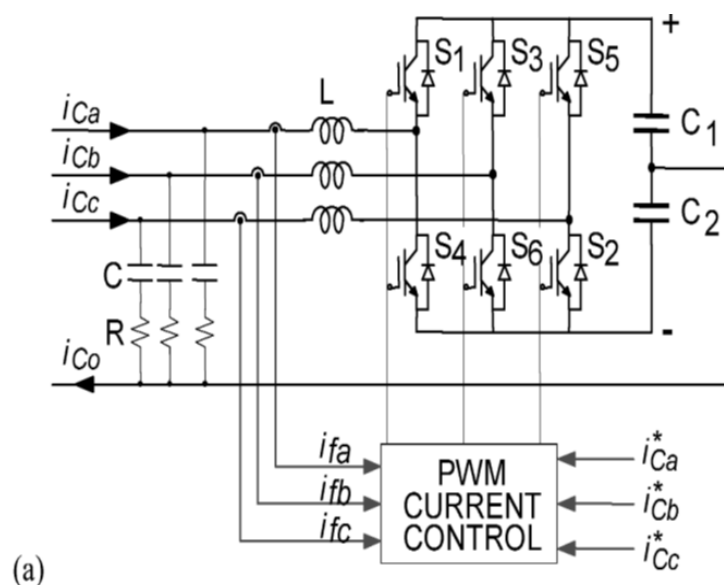
$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

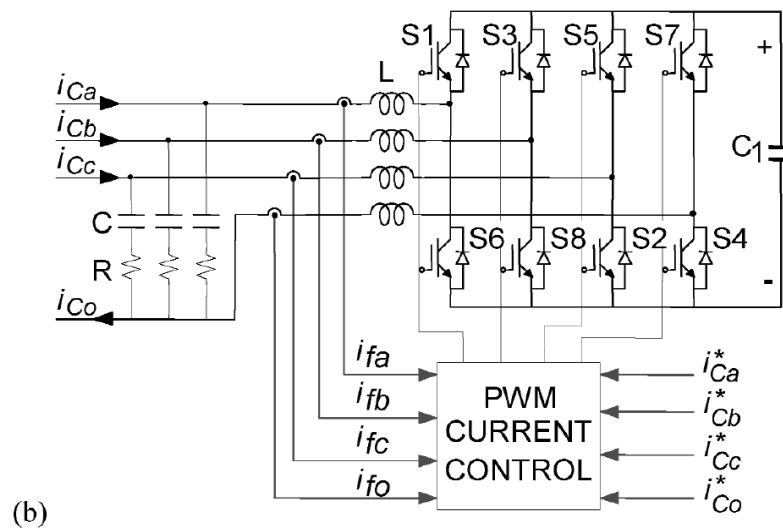
### Τοπολογίες μετατροπέων για φίλτρα τεσσάρων αγωγών.

Τα τριφασικά ενεργά φίλτρα τεσσάρων αγωγών πραγματοποιούνται με τη χρήση μετατροπέα τεσσάρων άκρων.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εναλλακτική λύση, η οποία χρησιμοποιεί έναν συμβατικό μετατροπέα τριών άκρων και σύμφωνα με αυτόν πραγματοποιήθηκε το φίλτρο της παρούσας εργασίας.

Στο σχήμα 3.15. παρουσιάζονται οι δύο τοπολογίες των μετατροπέων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κύκλωμα ισχύος σε ένα τριφασικό ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών. Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ της εικ. 3.15. (α) και εικ. 3.15. (β) είναι ο αριθμός των ημιαγωγών ισχύος. Στο συμβατικό μετατροπέα τριών άκρων Εικ. 3.15. (α), ο ουδέτερος αγωγός συνδέεται απευθείας ανάμεσα στους δύο πυκνωτές dc, ενώ στο σχήμα 3.15. (β), η σύνδεση του ουδέτερου αγωγού γίνεται μέσω του τέταρτου άκρου του διακόπτη (Akagi, et al., 2007).





**Σχήμα 3.15.** Τριφασικοί μετατροπέες PWM τεσσάρων αγωγών. (α) Μετατροπέας τριών άκρων: τοπολογία μετατροπέα "χωριστού πυκνωτή". (β) Μετατροπέας τεσσάρων άκρων: τοπολογία μετατροπέα "τεσσάρων σημείων" (Akagi, et al., 2007).

Η τοπολογία μετατροπέα "τεσσάρων άκρων" που φαίνεται στο σχήμα 3.15 (b) παρέχει καλύτερο έλεγχο από την τοπολογία μετατροπέα "split capacitor" που φαίνεται στο σχήμα 3.15 (α). Ωστόσο, ο συμβατικός μετατροπέας τριών άκρων προτιμάται λόγω του μικρότερου αριθμού ημιαγωγών ισχύος.

Υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με τις τάσεις πυκνωτών dc που πρέπει να λυθούν με την "Τοπολογία μετατροπέα" χωριστού πυκνωτή ". Αυτή η τοπολογία μετατροπέα επιτρέπει τα ρεύματα σε ροή, μέσω ενός από τους πυκνωτές dc ( $C_1$  ή  $C_2$ ) και επιστρέφουν μέσω του ουδέτερου αγωγού, προκαλώντας απόκλιση τάσης μεταξύ των πυκνωτών dc. Μόλις αυτή η απόκλιση τάσης ελέγχεται, η τοπολογία μετατροπέα "χωρισμένου πυκνωτή" μπορεί να γίνει ελκυστική λύση, που εφαρμόζεται γενικά σε συστήματα n αγωγών καθώς χρησιμοποιεί ένα μετατροπέας PWM (n-1) άκρων. Για παράδειγμα, ένας μετατροπέας 2 ακρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα τριών φάσεων, όπου συνδέονται δύο φάσεις στα άκρα του μετατροπέα και το τρίτο είναι συνδεδεμένο στο μέσο του διαύλου dc (Akagi, et al., 2007).

### Έλεγχος ρεύματος δυναμικής υστέρησης

Ο έλεγχος ρεύματος με βάση την υστέρηση είναι ένας κοινός έλεγχος με PWM (διαμόρφωση εύρους παλμού) που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές που τροφοδοτούνται με τάση για να αναγκάσουν αυτούς τους μετατροπέες να συμπεριφερθούν ως ελεγχόμενες ac πηγές ρεύματος στο σύστημα τροφοδοσίας. Ένα ιδιαίτερο πρόβλημα προκύπτει κατά τον έλεγχο της τοπολογία

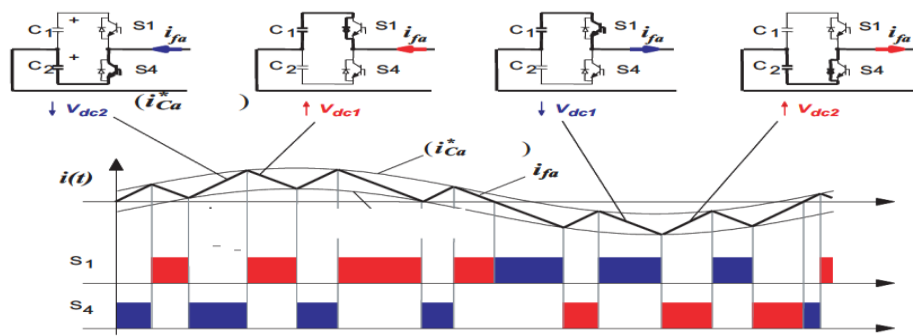
μετατροπέα " split capacitor " (Σχήμα 3.15α) με PWM με βάση την υστέρηση. Αν οι τρέχουσες αναφορές  $i^* Ck$  ( $k = a, b, c$ ) υποτίθενται ότι είναι από μηδενικές σειρές, τα ρεύματα μετατροπέα εάν το  $k$  ( $k = a, b, c$ ), θα επιστρέφουν από τον ουδέτερο αγωγό. Αυτό εξαναγκάζει, στην τοπολογία μετατροπέα "χωριστού πυκνωτή", το ρεύμα κάθε φάσης να ρέει είτε μέσω  $C1$  είτε μέσω  $C2$  και να επιστρέψει μέσω του ουδέτερου αγωγού. Το σχήμα 3.16 δείχνει μια τυπική συμπεριφορά του ρεύματος του μετατροπέα όταν ελέγχεται από έναν ελεγκτή PWM που βασίζεται σε υστέρηση (Akagi, et al., 2007).

Τα ρεύματα μπορούν να ρέουν και στις δύο κατευθύνσεις μέσω των διακοπών και των πυκνωτών. Ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τις συνθήκες που προκαλούν αποκλίσεις τάσης στους πυκνωτές  $C1$  και  $C2$  για το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας στην τοπολογία μετατροπέα "χωριστού πυκνωτή".

**Πίνακας 3.1** Συνθήκες που προκαλούν αποκλίσεις τάσης στους πυκνωτές  $C1$  και  $C2$  (Akagi, et al., 2007).

|   |                        |
|---|------------------------|
| $i_{fk} > 0$ και $\frac{di_{fk}}{dt} < 0$ | Αύξηση τάσης στον $C1$ |
| $i_{fk} < 0$ και $\frac{di_{fk}}{dt} < 0$ | Μείωση τάσης στον $C1$ |
| $i_{fk} < 0$ και $\frac{di_{fk}}{dt} > 0$ | Αύξηση τάσης στον $C2$ |
| $i_{fk} > 0$ και $\frac{di_{fk}}{dt} > 0$ | Μείωση τάσης στον $C2$ |

Όταν το  $ifk > 0$ , το  $V_{dc1}$  αυξάνεται και το  $V_{dc2}$  μειώνεται, αλλά όχι με ίδιο εύρος γιατί οι θετικές και οι αρνητικές τιμές της  $di_{fk} / dt$  είναι διαφορετικές και εξαρτώνται από τις στιγμιαίες τιμές των τάσεων εναλλασσόμενου ρεύματος. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν  $ifk < 0$ . Οι διακυμάνσεις στην τάση συνεχούς ρεύματος εξαρτώνται επίσης από το σχήμα της αναφοράς και της υστέρησης εύρους ζώνης. Ως εκ τούτου, η συνολική τάση DC, καθώς και η διαφορά τάσης ( $V_{dc2} - V_{dc1}$ ) θα ταλαντεύεται όχι μόνο στη συχνότητα μεταγωγής αλλά και στην αντίστοιχη της συχνότητα του  $i_0$  που παράγεται από τον μετατροπέα (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.16. Έλεγχος ρεύματος με PWM με υστέρηση (Akagi, et al., 2007).

Στο παράδειγμα που δίνεται στο σχήμα 3.16, το ρεύμα φάσης  $i_{fa}$  προκαλεί μεταβολές τάσης τέτοιες ώστε η τάση  $V_{dc1}$  να είναι υψηλότερη και  $V_{dc2}$  χαμηλότερη στο τέλος της περιόδου. Με άλλα λόγια, το θετικό ρεύμα ολοκλήρωσης μέσω του διακόπτη  $S1$  είναι μεγαλύτερο από το αρνητικό μέσω του  $S1$ , και το αντίθετο συμβαίνει με το ρεύμα μέσω του διακόπτη  $S2$ . Αν ένα δυναμικό επίπεδο μετατόπισης προστεθεί και στα δύο όρια του εύρους υστέρησης, είναι δυνατόν να ελέγχεται η διαφορά τάσης του πυκνωτή και να διατηρείται εντός αποδεκτού περιθωρίου ανοχής. Για το παράδειγμα που δίνεται στο Σχήμα 3.16, μια αρνητική μετατόπιση θα εξουδετερώσει τη παραπάνω μεταβολή τάσης που τείνει να φορτίζει τον  $C1$  και να εκφορτίζει τον  $C2$  (Akagi, et al., 2007).

Επομένως, μια δυναμική μετατόπιση του  $(\varepsilon)$  θα πρέπει να δημιουργηθεί από τη μέτρηση της τάσης των πυκνωτών του dc  $V_{dc1}$  και  $V_{dc2}$ . Αν αυτό το σήμα  $\varepsilon$  προστεθεί στα δύο όρια της ζώνης υστέρησης, ένας νέος δυναμικός έλεγχος ρεύματος υστέρησης που παρέχει εξισορρόπηση τάσης dc στην τοπολογία μετατροπέα " split capacitor " δίνεται από την σχέση (Akagi, et al., 2007):

$$\text{Upper hysteresis – band limit} = i_{Ck}^* + \Delta(1 + \varepsilon)$$

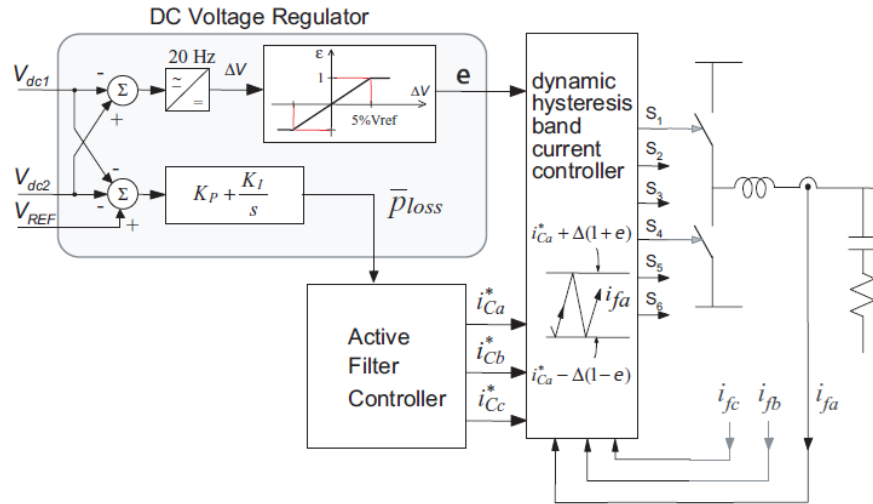
$$\text{lower hysteresis – band limit} = i_{Ck}^* - \Delta(1 - \varepsilon) \tag{3.47}$$

όπου  $i_{Ck}^*$  ( $k = a, b, c$ ) είναι οι στιγμιαίες αναφορές ρεύματος που παρέχονται από ένα ενεργό ελεγκτή φίλτρου και  $\Delta$  είναι η σταθερά ζώνης μισής υστερήσεως. Έτσι, το σήμα  $\varepsilon$  ( $-1 \leq \varepsilon \leq 1$ ) μετατοπίζει τα όρια ζώνης υστέρησης γύρω από τις τρέχουσες αναφορές, αλλά δεν αλλάζει την ολική ζώνη υστέρησης (ίση με  $2\Delta$ ), για να αλλάξει τους χρόνους μεταγωγής έτσι το  $\varepsilon$  ισούται (Akagi, et al., 2007):

$$\varepsilon > 0 \Rightarrow \text{rises } V_{dc1} \text{ and lowers } V_{dc2}$$

$$\varepsilon < 0 \Rightarrow \text{rises } V_{dc2} \text{ and lowers } V_{dc1} \tag{3.48}$$

Στην επόμενη ενότητα, προτείνεται ένα πολύ απλό κύκλωμα ελέγχου για τη δημιουργία του δυναμικού σήματος μετατόπισης  $\varepsilon$ . Οι τάσεις στους πυκνωτές dc C1 και C2 του σχήματος 3.15 (a) μπορούν να ελέγχονται από ένα ρυθμιστή dc τάσης. Σε αυτή την περίπτωση, και τα δύο σήματα  $\bar{p}_{loss}$  και  $\varepsilon$  παράγονται σε αυτό το ρυθμιστή DC τάσης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17 (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.17.** Ρυθμιστής τάσης συνεχούς ρεύματος για την τοπολογία «χωρισμένου πυκνωτή» της Εικ. 3.12α (Akagi, et al., 2007).

Ένα χαμηλής διέλευσης φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 20 Hz χρησιμοποιείται στον ρυθμιστή τάσης για να το καταστήσει μη ευαίσθητο στις μεταβολές τάσης θεμελιώδους συχνότητας (50 Hz). Αυτή είναι η συχνότητα της απόκλισης τάσης DC που εμφανίζεται όταν το ενεργό φίλτρο αντισταθμίζει το βασικό ρεύμα μηδενικής ακολουθίας του φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17.

Η φιλτραρισμένη διαφορά τάσης  $\Delta V = V_{dc2} - V_{dc1}$  παράγει το  $\varepsilon$ , σύμφωνα με την ακόλουθη γεννήτρια λειτουργιών ορίου (Akagi, et al., 2007):

$$\varepsilon = -1 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta V < -0,05V_{ref}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{-0,05V_{ref}} \quad \Leftrightarrow \quad -0,05V_{ref} \leq \Delta V \leq 0,05V_{ref}$$

$$\varepsilon = 1 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta V > 0,05V_{ref} \quad (3.49)$$



όπου  $V_{ref}$  είναι μια προκαθορισμένη αναφορά τάσης διαύλου dc και  $\pm 5\% V_{ref}$  ήταν αυθαίρετα επιλεγμένη ως αποδεκτό περιθώριο ανοχής της μεταβολής της τάσης (Akagi, et al., 2007).

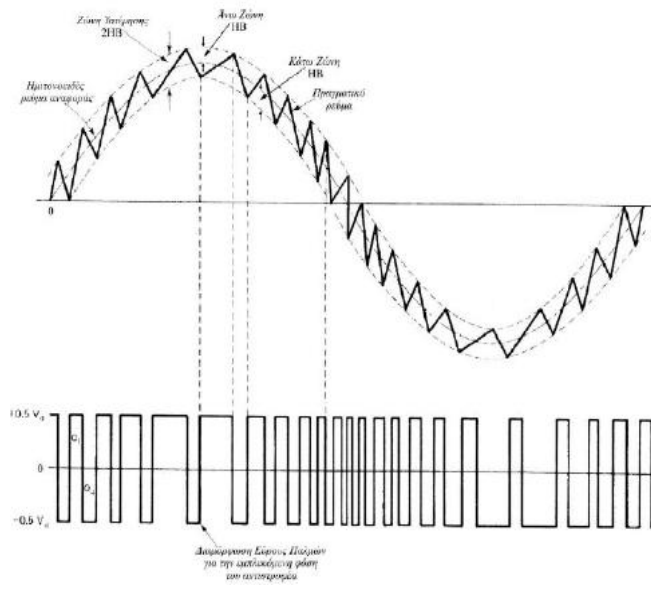
Το σήμα  $\bar{p}_{loss}$  χρησιμοποιείται στον ενεργό ελεγκτή φίλτρου ως μέση πραγματική ισχύς. Περιλαμβάνεται στον τρέχοντα υπολογισμό αναφοράς για να αναγκάσει τον μετατροπέα PWM να απορροφήσει (παραδώσει) ενέργεια από (στο) δίκτυο AC. Εάν το άθροισμα των  $V_{dc1}$  και  $V_{dc2}$  είναι μικρότερο από την προκαθορισμένη τάση  $V_{ref}$  του διαύλου dc, ο μετατροπέας PWM πρέπει να απορροφήσει ενέργεια από το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος για τη φόρτιση των πυκνωτών dc. Το αντίστροφο συμβαίνει εάν  $(V_{dc1} + V_{dc2}) > V_{ref}$ . Τα κέρδη στον ελεγκτή PI του Σχήματος 3.15 πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να παρέχουν μια κατάλληλη δυναμική για την εξουδετέρωση των μεταβολών τάσης διαύλου DC. (Akagi, et al., 2007).

- **Ρυθμιστής συνεχούς τάσης πυκνωτή:** Η τάση στα άκρα του πυκνωτή πρέπει να διατηρείται σταθερή για λόγους ελεγχσιμότητας αλλά και για την προστασία του ίδιου του πυκνωτή από μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης. Την λειτουργία αυτή αναλαμβάνει ένας ρυθμιστής, ο οποίος καθορίζει ένα ποσό ενεργής ισχύος  $p_{loss}$ , το οποίο προκαλεί μία πρόσθετη ροή ενέργειας προς τον πυκνωτή  $C_{dc}$ , με σκοπό την διατήρηση της τάσης του κοντά σε μία προκαθορισμένη τιμή αναφοράς με ένα ανεκτό ποσοστό κυμάτωσης 1-3%. Ο ρυθμιστής αποτελείται από έναν απλό PI ελεγκτή με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς (Akagi, et al., 2007) :

$$H(S) = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (3.50)$$

Με συνεχείς μεταβολές των δύο κερδών (μέθοδος try and error) σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης (Matlab) είναι δυνατόν να βρεθούν τα  $k_p$  και  $k_I$  που θα υπολογίζουν το ακριβές ποσό ενεργής ισχύος  $p_{loss}$  το οποίο θα αντλείται από το ενεργό φίλτρο για την διατήρηση της  $V_{dc}$  σε μία σταθερή τιμή (Akagi, et al., 2007).

- **Κύκλωμα ελέγχου ρεύματος με σταθερή ζώνη υστέρησης (Hysteresis band current controlled PWM, HBCC-PWM):** Αφού έχουν δημιουργηθεί τα ρεύματα αναφοράς από το κύκλωμα παραγωγής τους, ακολουθεί ο έλεγχός τους, από τον ελεγκτή υστέρησης του ρεύματος. Η δομή του ελεγκτή υστέρησης του ρεύματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.18 που ακολουθεί για το σκέλος A του τριφασικού αντιστροφέα. Η ίδια δομή επαναλαμβάνεται στα σκέλη των φάσεων B και C (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.18.** Ελεγκτή υστέρησης του ρεύματος για το σκέλος A του τριφασικού αντιστροφέα (Akagi, et al., 2007).

Το ρεύμα αναφοράς ( $i_a^*$ ), το οποίο έχει παραχθεί από το κύκλωμα παραγωγής των ρευμάτων αναφοράς όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο μέρος του κεφαλαίου, συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα της φάσης a ( $i_a$ ), εντός μιας ζώνης υστέρησης (Akagi, et al., 2007).

Όταν το ρεύμα στην φάση a είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα αναφοράς κατά το θετικό όριο υστέρησης ( $i_a > i_a^* + hys_+$ ) ο διακόπτης  $S_1$  οδηγείται στην αποκοπή και ο  $S_4$  στην αγωγιμότητα. Έτσι το ρεύμα  $i_a$  μειώνεται. Όταν  $i_a < i_a^* - hys_-$  ο διακόπτης  $S_4$  οδηγείται στην αποκοπή και ο  $S_1$  στην αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος  $i_a$ . Ελέγχοντας τους διακόπτες του αντιστροφέα με τον τρόπο αυτό το ρεύμα εξόδου αναγκάζεται να ακολουθήσει το ρεύμα αναφοράς, εντός της ζώνης υστέρησης. Στην πραγματικότητα η απόκλιση του στιγμιαίου ρεύματος  $i_a$  αγγίζει το διπλάσιο της ζώνης υστέρησης, όπως γίνεται εύκολα κατανοητό από το σχήμα (Akagi, et al., 2007).

Η κυμάτωση του ρεύματος και η διακοπτική συχνότητα καθορίζονται από το εύρος της ζώνης υστέρησης. Για παράδειγμα μείωση του εύρους της ζώνης οδηγεί σε αύξηση της διακοπτικής συχνότητας και μείωση της κυμάτωσης του ρεύματος φορτίου. Το βέλτιστο εύρος ζώνης καθορίζεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια ισορροπία μεταξύ των απωλειών λόγω κυμάτωσης ρεύματος και των διακοπτικών απωλειών. Ο έλεγχος PWM με ζώνη υστέρησης χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του απλού συστήματος ελέγχου, της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος, του άμεσου περιορισμού της μέγιστης τιμής του ρεύματος φορτίου και για το γεγονός ότι το σύστημα

μένει ανεπηρέαστο από τυχόν κυμάτωση της dc τάσης τροφοδοσίας του αντιστροφέα (Akagi, et al., 2007).

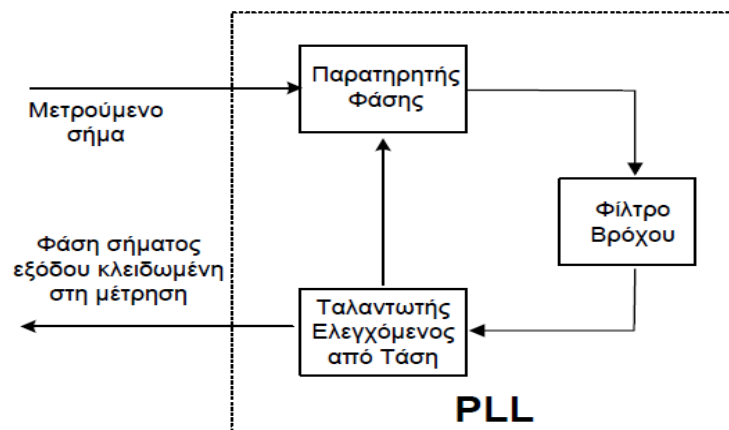
- **Κύκλωμα συγχρονισμού του ενεργού φίλτρου με το δίκτυο:** Για να μπορεί το ενεργό φίλτρο να παράγει το απαιτούμενο αποτέλεσμα είναι επιτακτική ανάγκη η ακριβής παρακολούθηση και καταγραφή της γωνίας, του πλάτους και της συχνότητας της τάσης του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένο το φίλτρο. Επομένως χρειάζεται ένα κύκλωμα που θα μπορεί να συγχρονίζει την τάση του αντιστροφέα με αυτή του δικτύου. Γενικά υπάρχουν δύο μέθοδοι με τους οποίους επιτυγχάνεται κάτι τέτοιο:

➤ Zero Crossing Detection

➤ Βρόγχος κλειδωμένης φάσης (Phase Locked Loop-PLL) (Akagi, et al., 2007).

Η πρώτη μέθοδος προσπαθεί να επιτύχει συγχρονισμό επιβλέποντας τις χρονικές στιγμές που η τάση γίνεται μηδέν, ενώ η δεύτερη PLL, είναι ένα σύστημα με ανάδραση το οποίο ρυθμίζει την φάση ενός λογικά παραγόμενου σήματος ώστε να ταιριάζει με την φάση του σήματος εισόδου. Το PLL χρησιμοποιείται ώστε να συγχρονίζει την γωνία ρεύματος του αντιστροφέα  $\theta_{inv}$  με την γωνία του δικτύου  $\theta_{grid}$  ώστε να επιτύχει συντελεστή ισχύος κοντά στην μονάδα. Η γωνία  $\theta_{inv}$  χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ρεύμα αναφοράς το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα (Akagi, et al., 2007).

Το PLL θα πρέπει να συνεχίζει να παράγει σήματα αναφοράς για τη συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα ακόμη και όταν υπάρχει παραμόρφωση της τάσης και διακύμανση της συχνότητας του δικτύου. Στο παρακάτω σχήμα 3.19 φαίνεται η βασική δομή ενός PLL



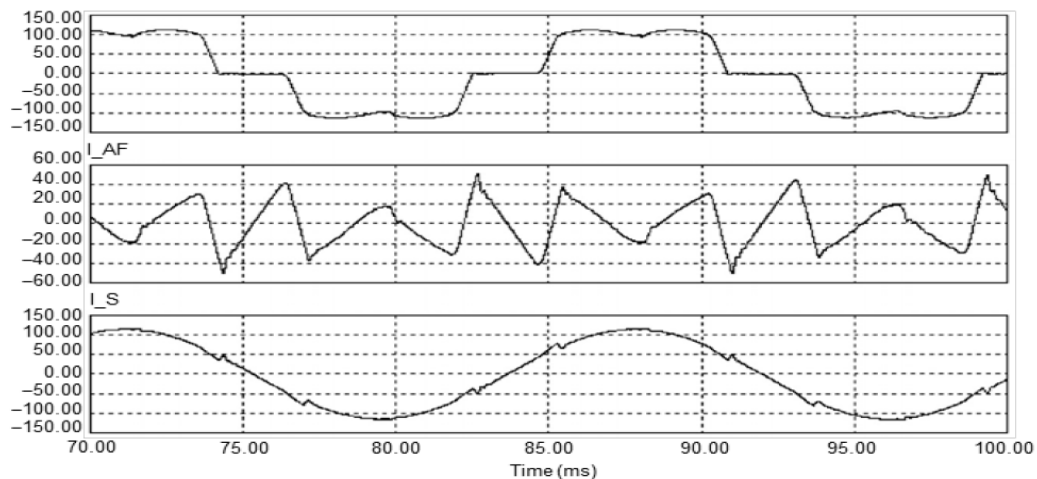
Σχήμα 3.19. Η βασική δομή ενός PLL (Akagi, et al., 2007).

Στην ουσία το PLL είναι ένα κύκλωμα το οποίο συγκρίνει συνεχώς τις εισόδους του, (οπού είναι οι τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου) με τον κλάδο ανατροφοδότησής του, οπού είναι το παραγόμενο σήμα εξόδου. Μέσω αυτού του κλειστού βρόγχου ελέγχεται και διορθώνεται συνεχώς η φάση του παραγόμενου σήματος εξόδου έτσι ώστε να συμβαδίζει με την τάση του δικτύου (Akagi, et al., 2007).

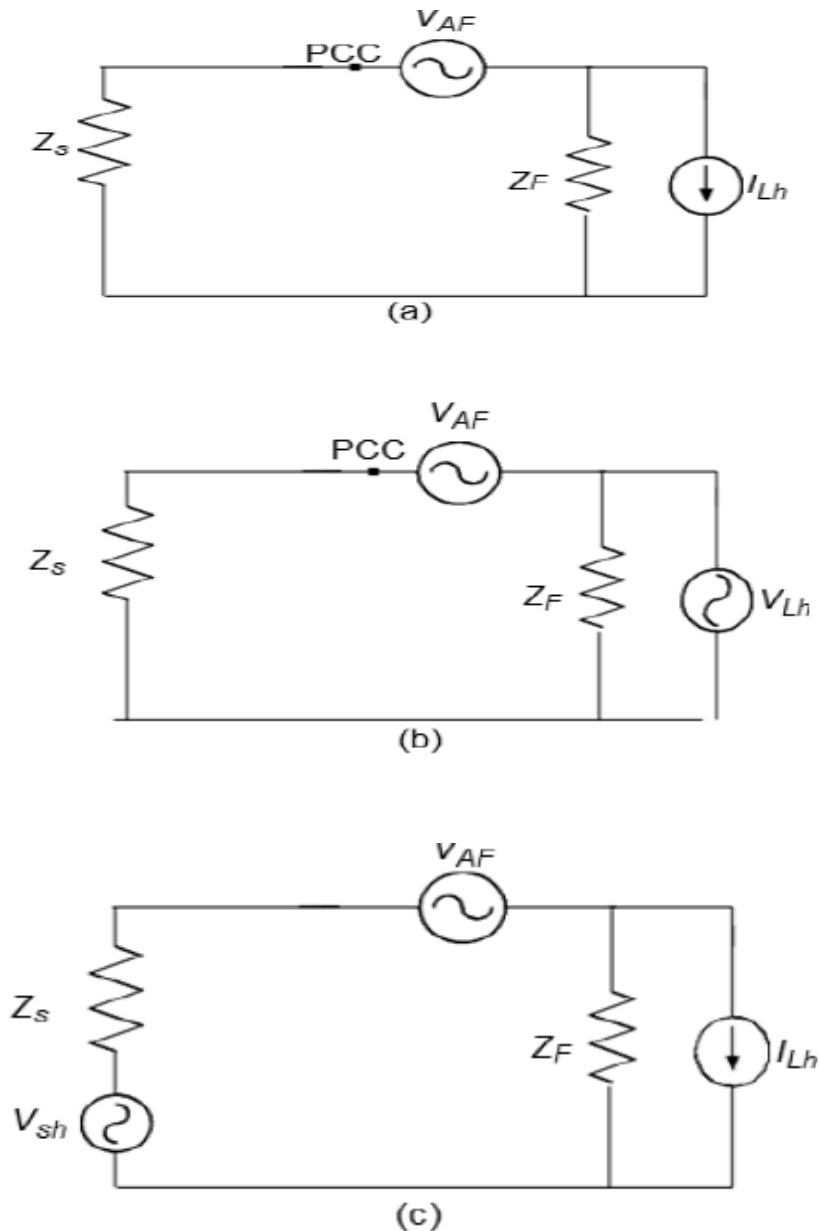
### 3.3.8. Ενεργά φίλτρα Σειράς.

Τα ενεργά φίλτρα σειράς μπορούν να είναι μονοφασικά ή τριφασικά και να χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγών τάσης ή ρεύματος. Το σχήμα 3.21 δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ενεργού φίλτρου σειράς, της πηγής και του φορτίου όταν το φίλτρο σειράς χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση των αρμονικών ρεύματος και τάσης. Στο σχήμα 3.21 (α), το ενεργό φίλτρο αντισταθμίζει το αρμονικό ρεύμα του μη γραμμικού φορτίου. Στο σχήμα 3.21 (β), το ενεργό φίλτρο σειράς αντισταθμίζει τις αρμονικές της τάσης του φορτίου. Στο σχήμα 3.21 (c), φαίνεται ότι το φίλτρο σειράς μπορεί να αντισταθμίσει τις αρμονικές ρεύματος του φορτίου και τις αρμονικές τάσεις της πηγής. Για την ακύρωση των αρμονικών στο PCC στο σχήμα 3.21 (a), πρέπει να έχουμε (Akagi, et al., 2007):

$$V_{AF} = Z_F I_L h \quad (3.51)$$



Σχήμα 3.20 Ρεύμα φορτίου, ενεργού φίλτρου και πηγής στο σύστημα του σχήματος 3.21 (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.21.** Ισοδύναμο κύκλωμα ενεργού φίλτρου σειράς με πηγή και φορτίο, (a) αντιστάθμιση των αρμονικών ρεύματος του φορτίου, (b) αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης φορτίου, και (c) αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης της πηγής και των αρμονικών ρεύματος του φορτίου (Akagi, et al., 2007).

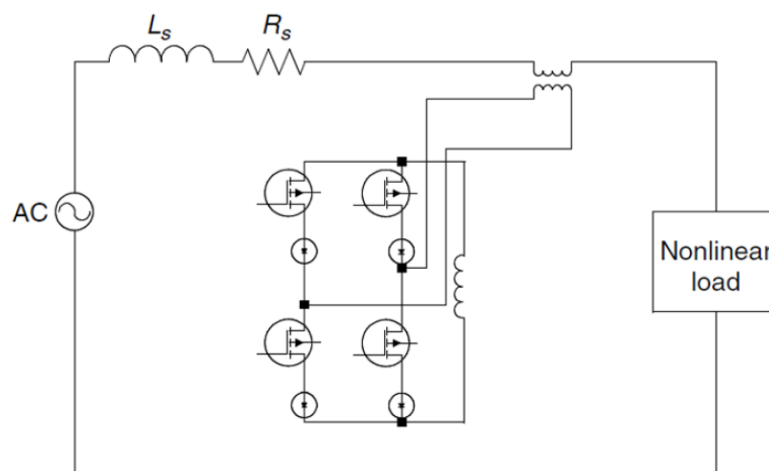
Στο σχήμα 3.21 (b), είναι σαφές ότι, όταν  $V_{AF} = V_{Lh}$ , οι αρμονικές τάσεις στο φορτίο θα ακυρωθούν. Στο Σχήμα 3.21.(c), για την ακύρωση των αρμονικών ρεύματος του φορτίου και των αρμονικών τάσης της πηγής, πρέπει να έχουμε (Akagi, et al., 2007). :

$$V_{AF} = V_{sh} + Z_f I_{Lh} \quad (3.52)$$

Στο παρακάτω σχήμα δείχνει ένα μονοφασικό ενεργό φίλτρο σειράς πηγής ρεύματος. Ένα ενεργό φίλτρο σειράς χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης που

παράγονται από μη γραμμικά φορτία, καθώς και για τη ρύθμιση της τάσης και την αντιστάθμιση της ασυμμετρίας της τάσης (Akagi, et al., 2007).

Τα ενεργά φίλτρα σειράς βρίσκονται σε σειρά μεταξύ της πηγής και των μη γραμμικών φορτίων. Με την παρουσία εμπέδησης στην πλευρά της πηγής, οι αρμονικές τάσης του μη γραμμικού φορτίου εμφανίζονται στο σημείο της κοινής σύζευξης. Το ενεργό φίλτρο σειράς ανιχνεύει την τάση του φορτίου και παράγει την αρμονική τάση του φορτίου αντεστραμμένη κατά  $180^\circ$  και καθιστά την τάση του σημείου κοινής σύζευξης απαλλαγμένη από αρμονικές (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.22.. Ένα μονοφασικό ενεργό φίλτρο σειράς πηγής ρεύματος (Akagi, et al., 2007).

### 3.3.9. Υβριδικά φίλτρα

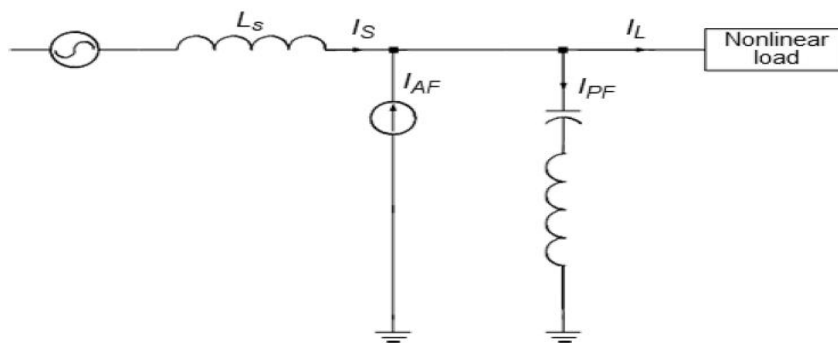
Ο κύριος σκοπός της χρήσης ενός υβριδικού (ενεργού και παθητικού φίλτρου) είναι να μειωθεί το αρχικό κόστος του φίλτρου και να βελτιωθεί η απόδοση. Έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί πολλές τοπολογίες συνδυασμών ενεργών και παθητικών φίλτρων (Akagi, et al., 2007).

Τα υβριδικά φίλτρα όταν συγκριθούν με τα αντίστοιχα ενεργά παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

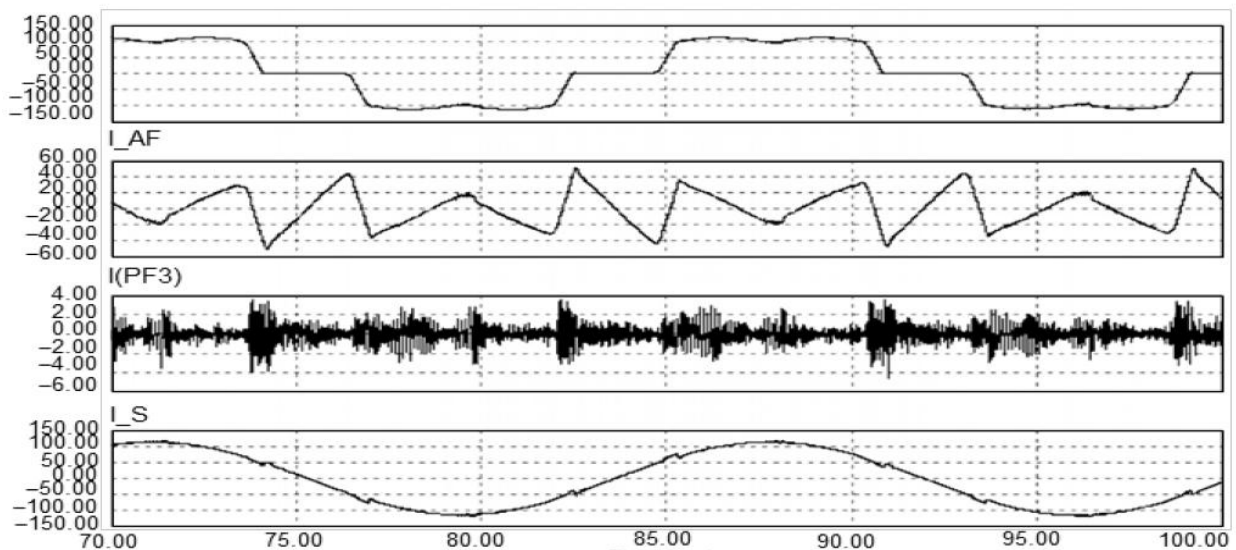
- Οικονομικά, αποδοτικό φιλτράρισμα υψηλής ισχύος
- Μικρότερο ενεργό φίλτρο

- Μεγαλύτερη αξιοπιστία
- Μικρότερη πολυπλοκότητα (Akagi, et al., 2007).

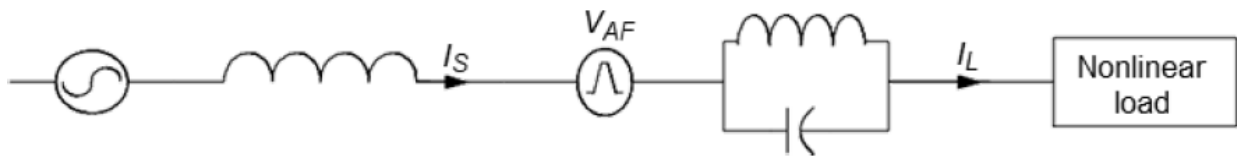
Συνήθως, το παθητικό φίλτρο συντονίζεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα για να καταστείλει αυτή τη συχνότητα και να μειώσει την ισχύ του ενεργού φίλτρου. Πειραματικά αποτελέσματα του συνδυασμού σειράς, παράλληλων ενεργών φίλτρων με παράλληλα παθητικά φίλτρα παρουσιάζονται από τους Akagi και Peng. Τα παράλληλα παθητικά φίλτρα πρέπει επίσης να είναι τύπου high-pass για να εξαλείφουν τη συχνότητα μεταγωγής του ενεργού φίλτρου και των αρμονικών υψηλής συχνότητας. Σε αυτή την περίπτωση, η συχνότητα μεταγωγής του ενεργού φίλτρου θα μειωθεί. Το σχήμα 3.23 δείχνει ένα υβριδικό φίλτρο παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων. Το παράλληλο ενεργό φίλτρο εμφανίζεται ως πηγή ρεύματος. Το σχήμα 3.24 δείχνει τα ρεύματα του παθητικού φίλτρου, του ενεργού φίλτρου, του φορτίου και της πηγής του σχήματος 3.23. Το σχήμα 3.25 δείχνει ένα συνδυασμό ενός ενεργού φίλτρου σειράς και ενός παθητικού φίλτρου σειράς (Akagi, et al., 2007).



Σχήμα 3.23. Υβριδική τοπολογία παράλληλων ενεργών και παθητικών φίλτρων (Akagi, et al., 2007).

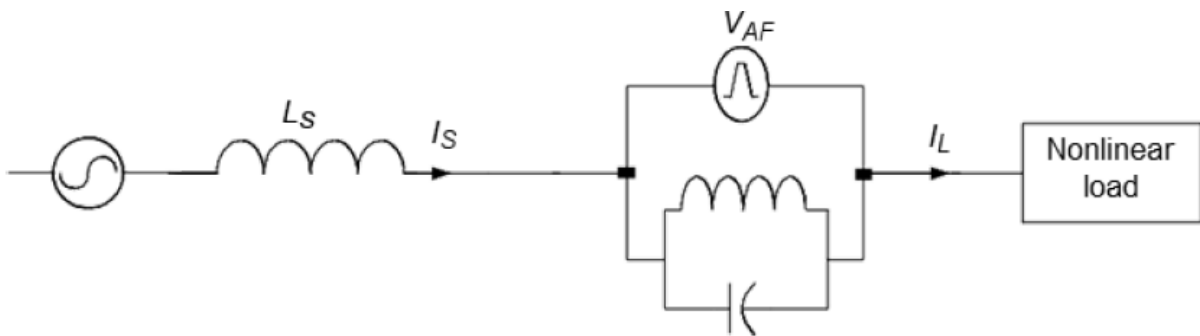


Σχήμα 3.24. Κυματομορφές ρεύματος του ενεργού φίλτρου, του παθητικού φίλτρου, της πηγής και του φορτίου (Akagi, et al., 2007).

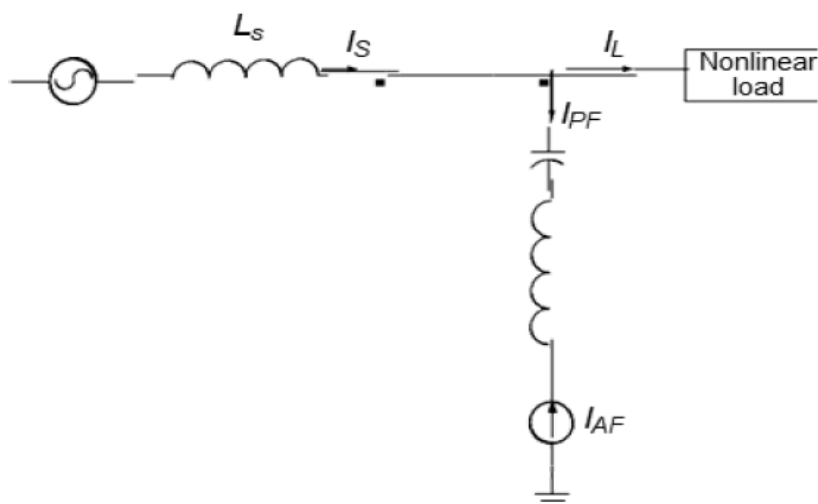


**Σχήμα 3.25.** Ένας συνδυασμός ενός ενεργού φίλτρου σειράς και ενός παθητικού φίλτρου σειράς (Akagi, et al., 2007).

Ένα πρόβλημα με τα ενεργά φίλτρα είναι το υψηλό θεμελιώδες ρεύμα μέσω του ενεργού φίλτρου σειράς και η υψηλή θεμελιώδης τάση στα άκρα του παράλληλου ενεργού φίλτρου. Ο παραλληλισμός ενός ενεργού φίλτρου σειράς με ένα παθητικό φίλτρο μπορεί να λύσει το πρόβλημα του υψηλού ρεύματος στη συνδεσμολογία σειράς. Το σχήμα 3.26. δείχνει αυτόν τον συνδυασμό. Πρέπει να υιοθετηθεί μια σωστή στρατηγική ελέγχου, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα συντονισμού. Η υψηλή τάση κατά μήκος του παράλληλου ενεργού φίλτρου μειώνεται με την τοποθέτηση του παράλληλου ενεργού φίλτρου σε σειρά με ένα παθητικό φίλτρο. Αυτό το είδος συνδεσμολογίας φαίνεται στο σχήμα 3.27 (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.26.** Συνδυασμός ενεργού φίλτρου σειράς και παθητικού φίλτρου για μείωση του υψηλού ρεύματος διαμέσου του ενεργού φίλτρου (Akagi, et al., 2007).



**Σχήμα 3.27.** Συνδυασμός παράλληλου ενεργού φίλτρου και παθητικού φίλτρου για τη μείωση της υψηλής τάσης στα άκρα του ενεργού φίλτρου (Akagi, et al., 2007).



Τελικά μπορούμε να πούμε ότι ένα ενεργό φίλτρο είναι πολύ ακριβή λύση σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές λύσεις αλλά πολύ πιο καλή και αποτελεσματική, γι' αυτό και στην βιομηχανία χρησιμοποιείται σε πολύ συγκεκριμένες και ειδικές περιπτώσεις όπου οι άλλες δυνατότητες δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις

Ένα ενεργό φίλτρο παράγει ένα τέτοιο φάσμα αρμονικών ώστε να είναι αντίθετο προς το περιεχόμενο αρμονικών που περιέχει το σήμα το οποίο επιτηρεί. Έτσι οι αρμονικές καταστέλλονται και το αποτέλεσμα είναι η κυματομορφή του επιτηρούμενου σήματος να είναι όσο το δυνατόν ημιτονοειδές. Έτσι με την χρήση ενός ενεργού φίλτρου είναι δυνατή η καταστολή περισσοτέρων της μιας αρμονικής συνιστώσας (Akagi, et al., 2007).

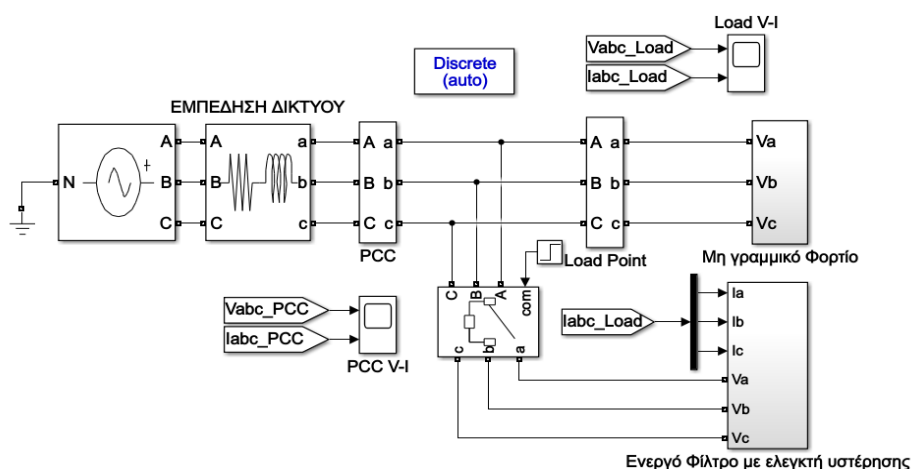
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### 4.1. Εισαγωγή

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται το πρακτικό μέρος της μελέτης. Στα δύο πρώτα κεφάλαια (4.1-4.2), παρουσιάζονται δύο παράλληλα ενεργά φίλτρα τριών αγωγών, που βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανικό περιβάλλον, σε τριφασικά φορτία χωρίς ουδέτερο. Τα δύο φίλτρα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με μόνη διάφορα στο τρόπο ελέγχου. Το πρώτο σχεδιάστηκε με τρόπο ελέγχου υστέρησης ρεύματος, και το δεύτερο με το τρόπο ελέγχου PWM σταθερής συχνότητας. Στο κεφάλαιο 4.3 παρουσιάζεται ένα παράλληλο ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών (με ουδέτερο). Το φίλτρο αυτό βρίσκεται εφαρμογή σε οποιοδήποτε φορτίο χρησιμοποιεί και ουδέτερο αγωγό. Στη παρούσα μελέτη οι μετρήσεις των αρμονικών ρευμάτων που αποτελούν το φορτίο του συγκεκριμένου φίλτρου πραγματοποιήθηκαν σε ένα πίνακα χαμηλής τάσης σε κτίριο τριτογενούς τομέα.

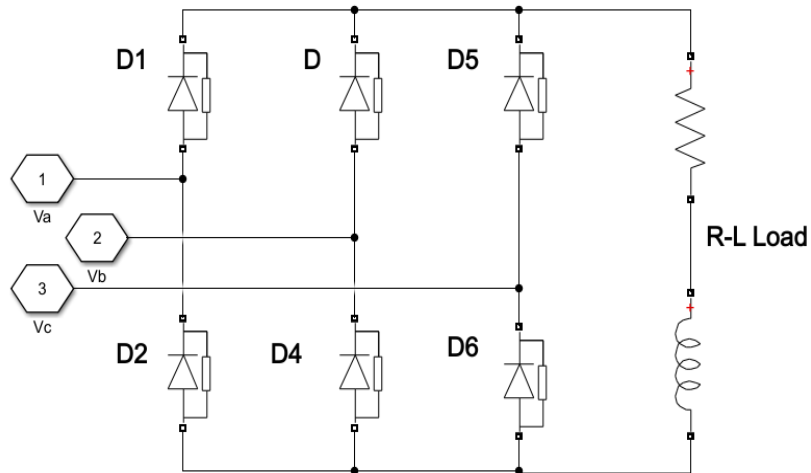
### 4.2. Ενεργό Παράλληλο Φίλτρο τριών αγωγών με ελεγκτή υστέρησης

Στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το παράλληλο ενεργό φίλτρο τριών αγωγών με έλεγχο υστέρησης, το οποίο σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Matlab/Simulink και στην συνέχεια συνδέθηκε μεταξύ του δικτύου και ενός μη γραμμικού φορτίου. Το μη γραμμικό φορτίο είναι μια μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση (σχήμα 4.2). Η σύνθετη αντίσταση του δικτύου έχει παραμέτρους  $R=0,2 \Omega$  και  $L=1 \mu\text{H}$ . Η εγκατάσταση τροφοδοτείται με καθαρά ημιτονοειδή και συμμετρική τριφασική τάση με πολική τιμή τάσης τα 400V



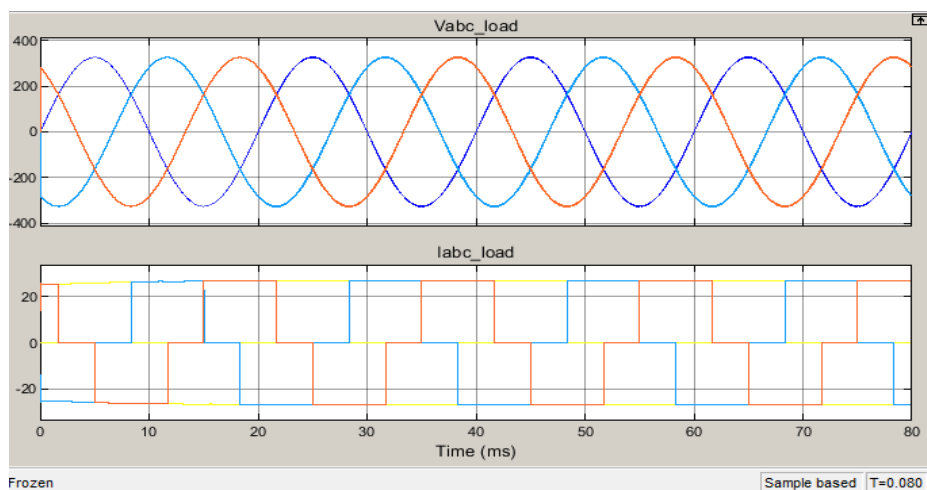
Σχήμα 4.1 Παράλληλο ενεργό φίλτρο για απόσβεση αρμονικών ενός μη γραμμικού φορτίου.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η κατασκευή της τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης με διόδους, η οποία αποτελεί το μη γραμμικό φορτίο με τα εξής χαρακτηριστικά:  $R = 20 \Omega$ ,  $L = 150 \text{ mH}$ .



Σχήμα 4.2. Τριφασική Ανόρθωση.

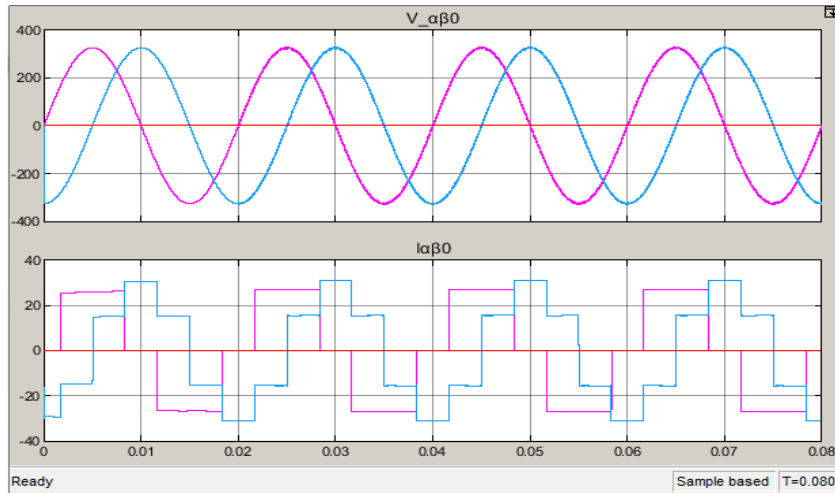
Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος του μη γραμμικού φορτίου. Παρατηρούμε ότι η τάση παρουσιάζει μια καθαρά ημιτονοειδή μορφή, ενώ το ρεύμα φαίνεται να είναι ένας τετραγωνικός παλμός, απέχοντας κατά πολύ από την ημιτονοειδή μορφή την οποία επιθυμούμε.



Σχήμα 4.3 Κυματομορφή Τάσης και Ρεύματος μη γραμμικοί φορτίου



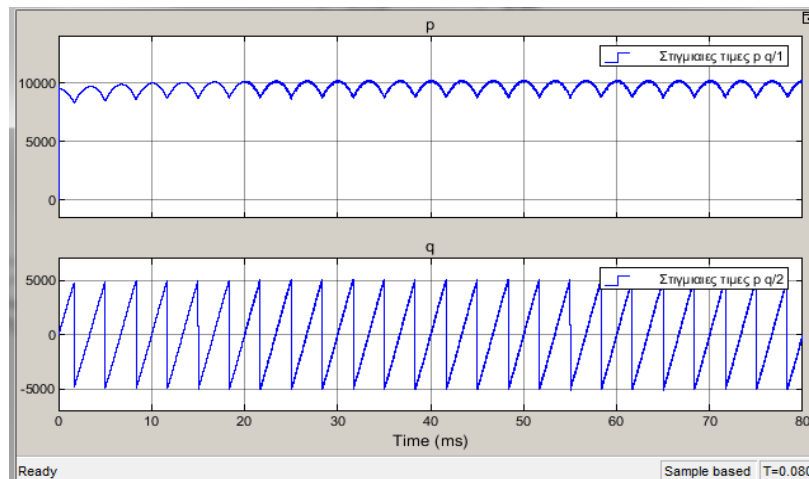
Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων στο σταθερό πεδίο τιμών  $\alpha\beta 0$ , όπου όπως αναφέρεται στη παράγραφο 3.3.4. τρίτη συνιστώσα είναι μηδενική.



**Σχήμα 4.6** Κυματομορφή τάσης και ρεύματος στο σταθερό πεδίο τιμών  $\alpha\beta 0$ .

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των στιγμιαίων τιμών  $p$  και  $q$ . Όπως αναφέρεται και στη θεωρία στη παράγραφο 3.3.6. στη κυματομορφή  $p$  διακρίνεται μια μέση συνιστώσα που αντιστοιχεί στη πραγματική ισχύ και μια κυμάτωση λόγω της ύπαρξης των αρμονικών.

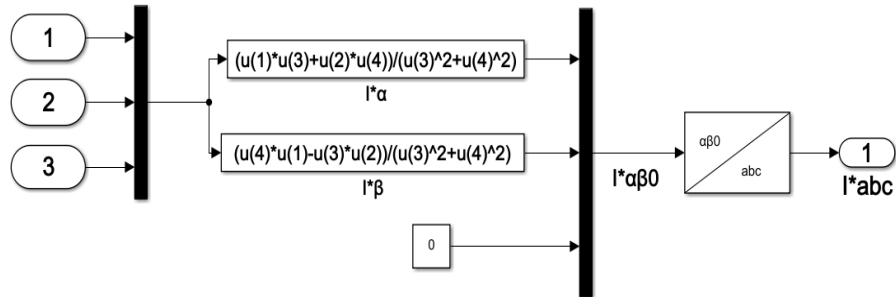
Αντίστοιχα στη κυματομορφή  $q$  διακρίνεται μια μέση συνιστώσα που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ και μια κυμάτωση λόγω ύπαρξης άεργων αρμονικών.



**Σχήμα 4.7** Κυματομορφές στιγμιαίων τιμών  $p$   $q$ .

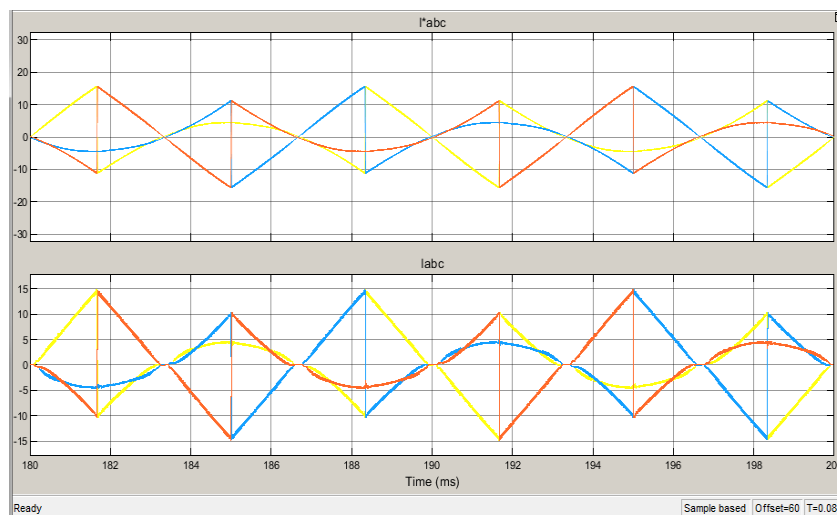
Στο σχήμα 4.8, χρησιμοποιώντας την στιγμιαία ισχύ  $p$  και την στιγμιαία ισχύς  $q$ , καθώς και τη τάση  $V_{\alpha\beta 0}$ , που υπολογίστηκαν από το κύκλωμα του σχήματος 4.5, υπολογίζονται με την βοήθεια του μετασχηματισμού Clark, τα ρεύματα αναφοράς  $I^*_{abc}$ . Τα ρεύματα αναφοράς  $I^*_{abc}$

χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τους διακόπτες, ώστε να παράξουν ρεύματα στον αντιστροφέα ίδια με τα ρεύματα αναφοράς, για να τροφοδοτήσουν το δίκτυο.



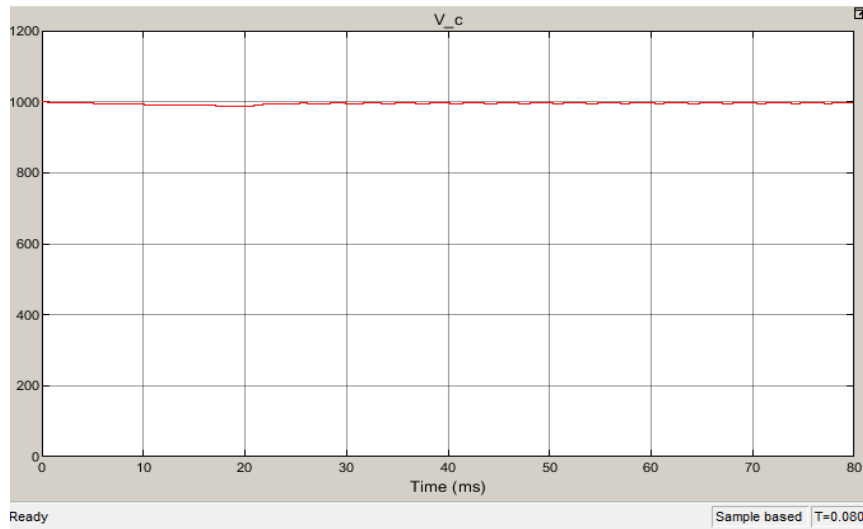
Σχήμα 4.8 Υπολογισμός ρευμάτων αναφοράς  $I^*abc$

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος αναφοράς  $I^*abc$  και τα μετρούμενα ρεύματα  $Iabc$  του αντιστροφέα, παρατηρώντας ότι και τα δυο ρεύματα είναι σχεδόν ίσα.



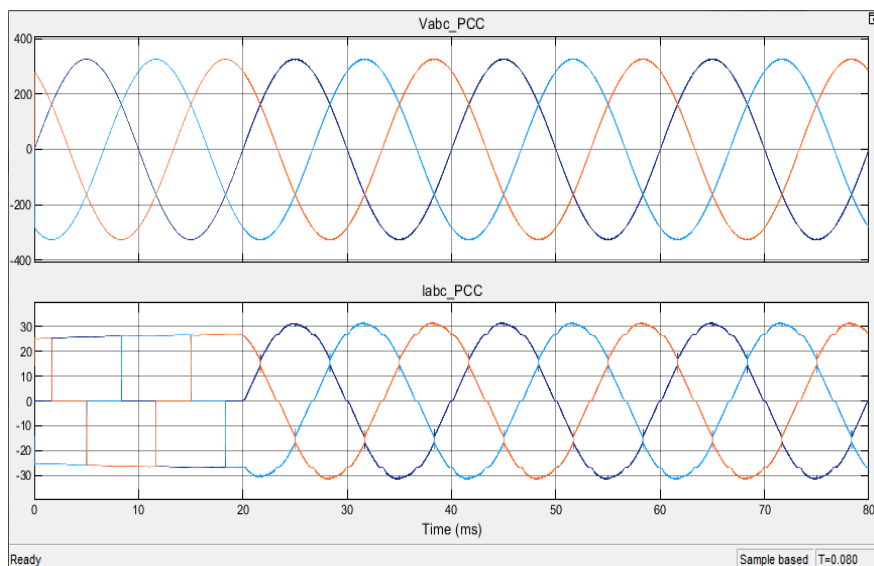
Σχήμα 4.8 Κυματομορφή ρευμάτων αναφοράς  $I^*abc$  και  $Iabc$  Inverter

Όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.3.2, η συνεχής τάση στη είσοδο του ενεργού φίλτρου θα πρέπει να διατηρείται μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου, ( $>1,5 \cdot 400 \cdot \sqrt{2} = 848,5 \text{ V}$ ). Στο επόμενο σχήμα (4.9) φαίνεται η τάση στα άκρα του πυκνωτή να διατηρείται σταθερά στα 1000 V.



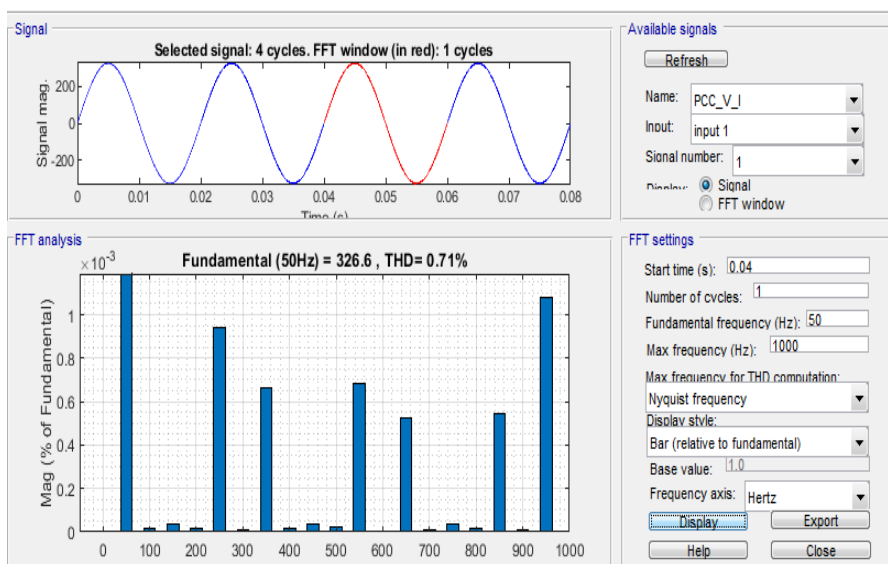
**Σχήμα 4.9** Κυματομορφή τάσης πυκνωτή.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάση και του ρεύματος στο σημείο κοινής σύνδεσης PCC, παρατηρώντας ότι το ρεύμα έχει αποκτήσει μια καθαρά ημιτονοειδής μορφή.



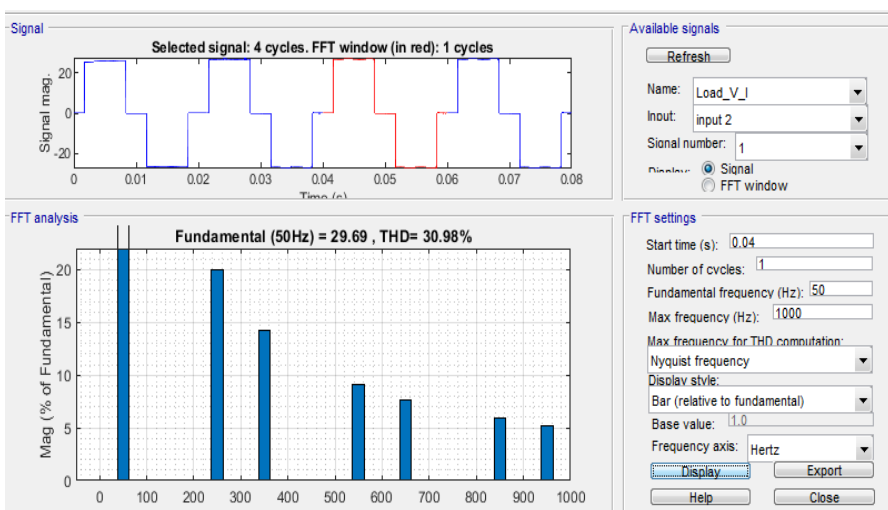
**Σχήμα 4.10** Κυματομορφή τάσης ρεύματος μετά τη προσθήκη του ενεργού φίλτρου.

Στο παρακάτω σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η Fast Fourier Transform (FFT) ανάλυση της τάσης, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THD<sub>v</sub> στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι ίση με 0,71% κάτι που αναμέναμε καθώς η πηγή μας δεν περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης.



Σχήμα 4.11. FFT ανάλυση τάσης.

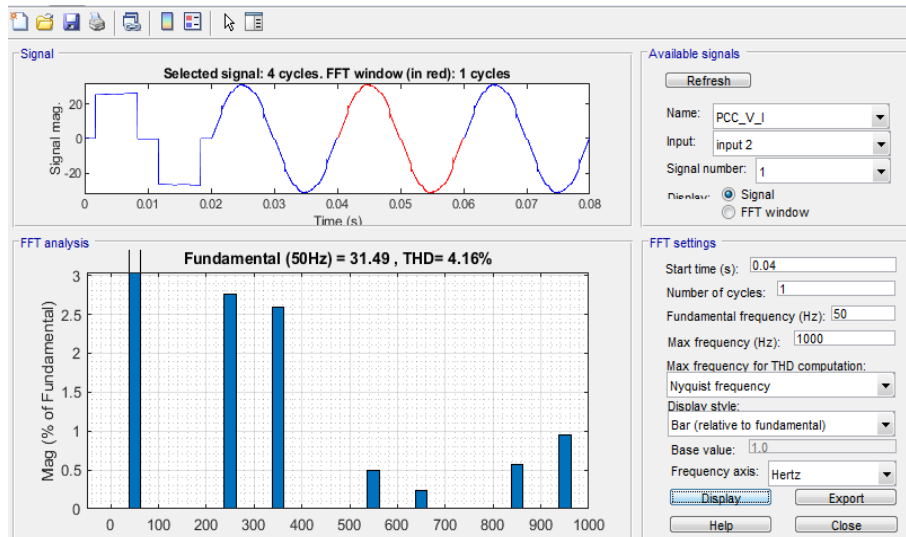
Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η FFT ανάλυση του ρεύματος, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THD<sub>I</sub> του φορτίου είναι ίση με 30,98%.



Σχήμα 4.12. FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου πριν τη τοποθέτηση ενεργού φίλτρου.

Στο σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι μετά την τοποθέτηση του ενεργού παράλληλου φίλτρου η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος στο κοινό σημείο σύνδεσης έχει μειωθεί 27 ποσοστιαίες μονάδες, φτάνοντας στο 4,16% και αποκτά μια σχεδόν καθαρά ημιτονοειδής μορφή

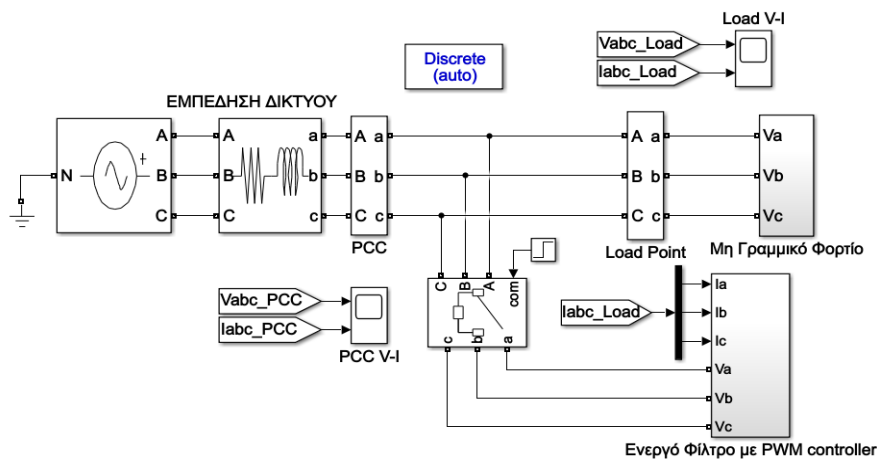




Σχήμα 4.13. FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου μετά την τοποθέτηση ενεργού φίλτρου.

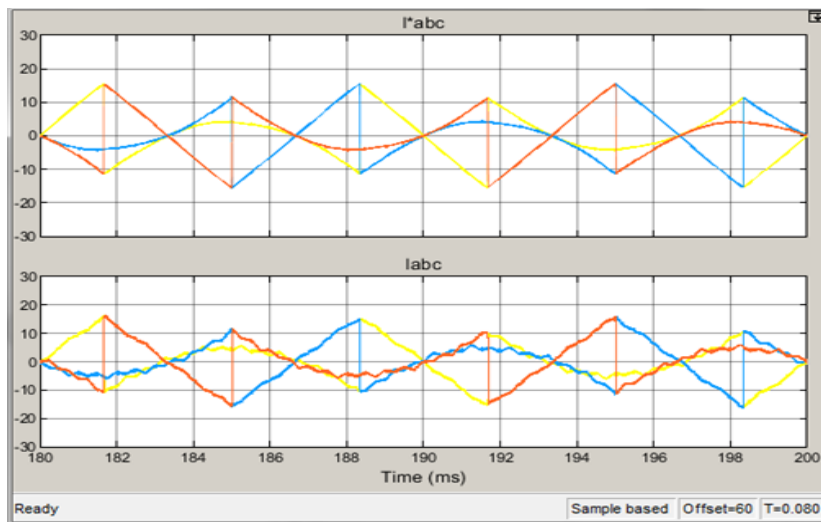
### 4.3. Ενεργό Παράλληλο Φίλτρο τριών αγωγών με ελεγκτή PWM

Το ακόλουθο παράλληλο ενεργό φίλτρο είναι όμοιο με το φίλτρο της ενότητας 4.1, με τα ίδια χαρακτηριστικά γραμμής και φορτίου, διαφέροντας μόνο στο τρόπο ελέγχου του φίλτρου χρησιμοποιώντας ελεγκτή PWM Controller.



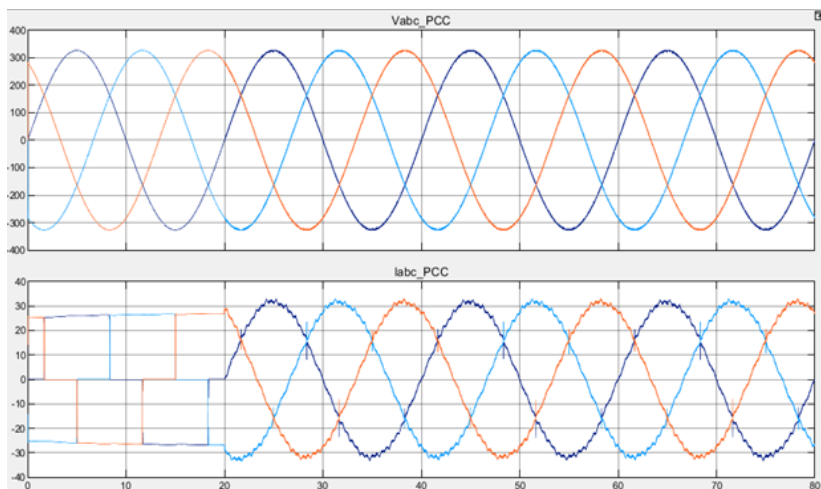
Σχήμα 4.14. Λειτουργικό Διάγραμμα Παράλληλου ενεργού φίλτρου με PWM controller.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ρευμάτων αναφοράς  $I^*_{abc}$  και των μετρούμενων ρευμάτων  $I_{abc}$  Inverter παρατηρώντας τα ίδια αποτελέσματα με το ανάλογο σχήμα της παραπάνω ενότητας, με μια διαφορά στο ρεύμα  $I_{abc}$ , λόγω διαφορετικής συχνότητας ελέγχου του PWM Controller.



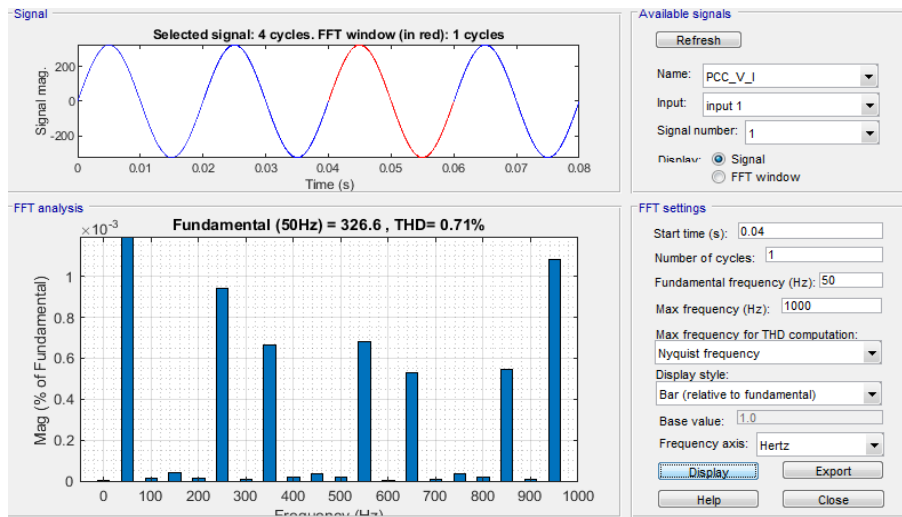
**Σχήμα 4.15.** Κυματομορφή ρευμάτων αναφοράς  $I^*_{abc}$  και  $I_{abc}$  Inverter, με PWM Controller.

Στο σχήμα 4.16, παρουσιάζεται η τάση και το ρεύμα στο σημείο κοινής σύνδεσης PCC, παρατηρώντας ότι το ρεύμα έχει αποκτήσει μια καθαρά ημιτονοειδή μορφή. Όπως και στις παραπάνω κυματομορφές έτσι και εδώ παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στο ρεύμα  $I_{abc\_PCC}$ , λόγω διαφορετικής συχνότητας. (PWM Controller).



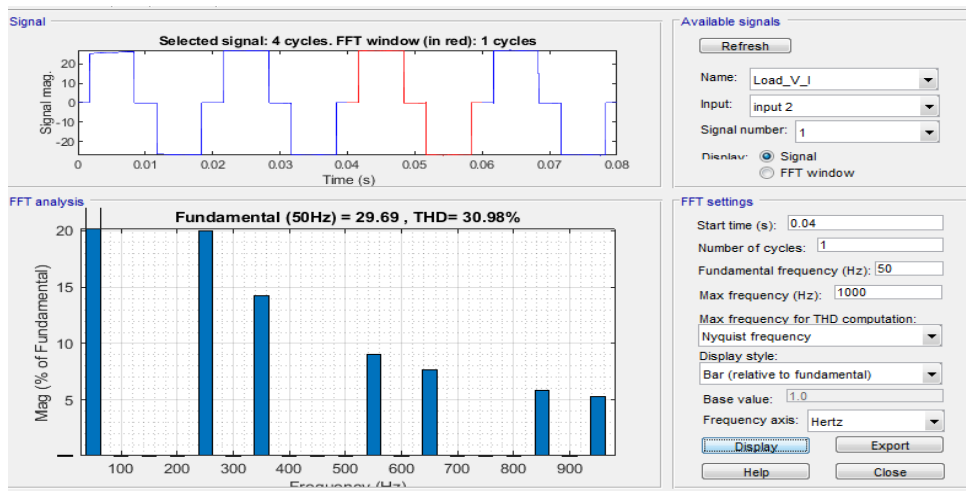
**Σχήμα 4.16.** Κυματομορφή τάσης ρεύματος μετά τη προσθήκη του ενεργού φίλτρου, με PWM Controller.

Στο παρακάτω σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η FFT ανάλυση της τάσης, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THDv στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι ίση με 0,71% κάτι που αναμέναμε καθώς η πηγή μας δεν περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης.



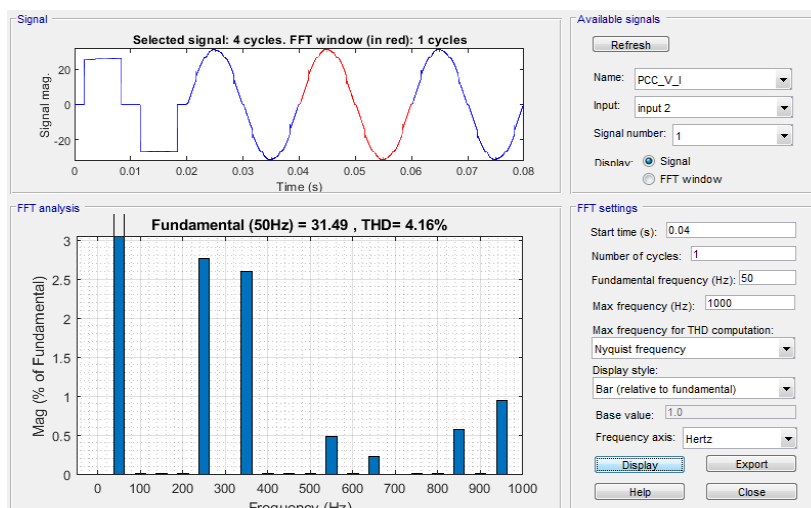
Σχήμα 4.17. FFT ανάλυση τάσης, με PWM Controller.

Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η FFT ανάλυση του ρεύματος, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THD<sub>I</sub> του φορτίου είναι ίση με 30,98%.



Σχήμα 4.18. FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου πριν τη τοποθέτηση ενεργού φίλτρου, με PWM Controller.

Στο σχήμα 4.19 παρατηρείται ότι μετά την τοποθέτηση του ενεργού παράλληλου φίλτρου η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος στο κοινό σημείο σύνδεσης έχει μειωθεί 27 ποσοστιαίες μονάδες, φτάνοντας στο 4,16%, αποκτώντας σχεδόν μια καθαρά ημιτονοειδής μορφή.



Σχήμα 4.19. FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου μετά την τοποθέτηση ενεργού φίλτρου, με PWM Controller.

Τέλος συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο παράλληλων ενεργών φίλτρων τριών αγωγών, παρατηρούνται τα ίδια αποτελέσματα με μια μικρή απόκλιση στη κυμάτωση, γεγονός που οφείλεται στη χαμηλή σταθερή συχνότητα του ελεγκτή PWM.

#### 4.4. Εφαρμογή Παράλληλου Ενεργού Φίλτρου σε Κτίριο Τριτογενή Τομέα

Τα φίλτρα των δύο προηγούμενων ενοτήτων αφορούσαν γραμμές τριών αγωγών, δηλ. χωρίς ουδέτερο. Επειδή στη χαμηλή τάση και σε ένα κτίριο τριτογενούς τομέα ο αγωγός του ουδέτερου υπάρχει και είναι αναγκαίος, σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε το παρακάτω φίλτρο με τέσσερις αγωγούς.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα γενικό πίνακα χαμηλής τάσης σε κτίριο γραφείων με κύρια τα παρακάτω μη γραμμικά φορτία.

- Λαμπτήρες φθορισμού και led.
- UPS.
- Ασανσέρ.
- Ψύκτες με Inverter

➤ Φωτοτυπικά μηχανήματα και υπολογιστές

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν με αναλυτή ενέργειας (Power Q4 της Metrel) για διάρκεια μιας εβδομάδος και τα αποτελέσματα της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.1.** Μετρήσεις Αρμονικής Παραμόρφωσης Ρεύματος.

| Current THD |         |           |         |           |         |           |         |
|-------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| THD I1      |         | THD I2    |         | THD I3    |         | THD IN    |         |
| AvgOn [A]   | Max [A] | AvgOn [A] | Max [A] | AvgOn [A] | Max [A] | AvgOn [A] | Max [A] |
| 12,27       | 27,57   | 12,96     | 27,93   | 13,38     | 29,82   | 0,0       | 0,0     |
| 12,69       | 25,74   | 13,29     | 26,46   | 13,83     | 27,99   | 0,0       | 0,0     |

| I1 h1     |         |              | I1 h3     |         |              | I1 h5     |         |              |
|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|
| AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] |
| 169,92    | 203,31  | 203,31       | 9,96      | 11,94   | 10,86        | 3,330     | 17,25   | 17,25        |

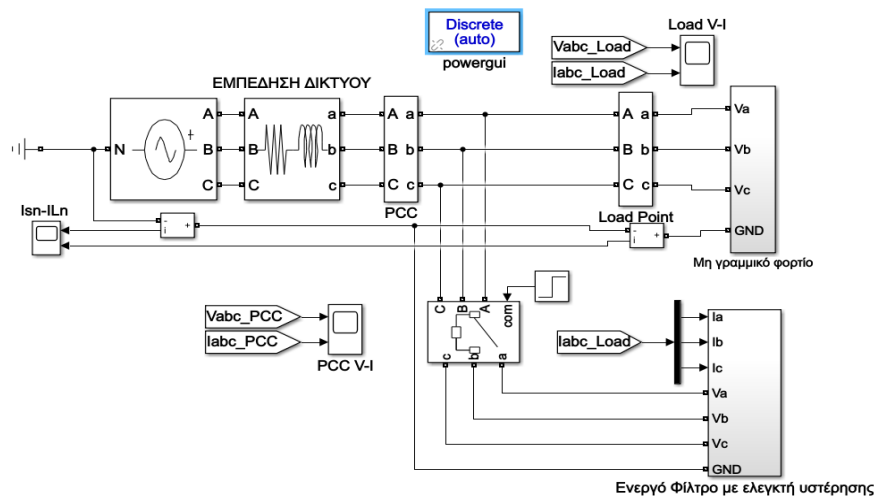
  

| I1 h7     |         |              | I1 h9     |         |              | I1 h11    |         |              |
|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|
| AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] |
| 4,800     | 16,41   | 16,41        | 1,890     | 2,820   | 0,990        | 2,280     | 7,80    | 7,14         |
| 4,740     | 14,82   | 14,82        | 1,770     | 2,610   | 1,380        | 2,220     | 7,77    | 6,63         |

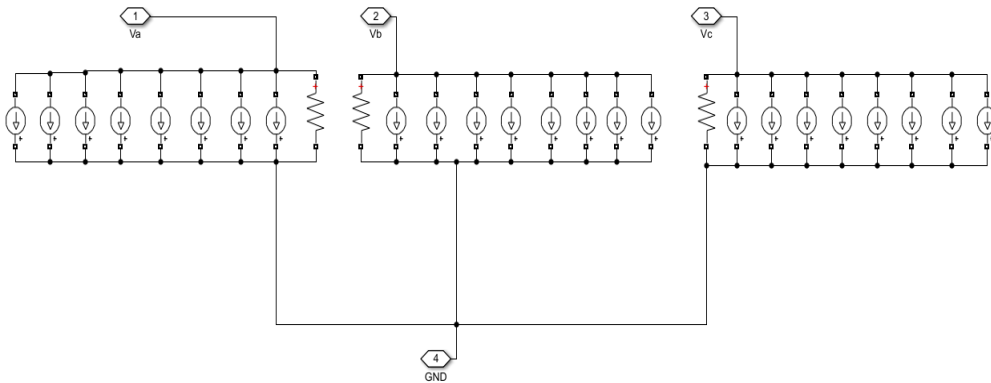
| I1 h11    |         |              | I1 h13    |         |              | I1 h15    |         |              |
|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|-----------|---------|--------------|
| AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] | AvgOn [A] | Max [A] | h@THDMax [A] |
| 2,280     | 7,80    | 7,14         | 2,010     | 5,280   | 3,210        | 0,570     | 1,410   | 0,600        |

Στο σχήμα 4.20 που ακολουθεί παρουσιάζεται το παράλληλο ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών, το οποίο σχεδιάστηκε στο Matlab/Simulink και στην συνέχεια συνδέθηκε μεταξύ του δικτύου και ενός μη γραμμικού φορτίου. Το μη γραμμικό φορτίο είναι πηγές ρεύματος με τιμές τις μετρήσεις των αρμονικών που φαίνονται στο πίνακα 4.1 από την πρώτη (1<sup>η</sup>) έως τη δέκατη πέμπτη (15<sup>η</sup>) αρμονική (σχήμα 4.23.) Η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είχε παραμέτρους  $R=0.2 \Omega$  και  $L=1\mu\text{H}$ . Η εγκατάσταση τροφοδοτείται με καθαρά ημιτονοειδή και συμμετρική τριφασική τάση με πολική τιμή τάσης τα 400V.



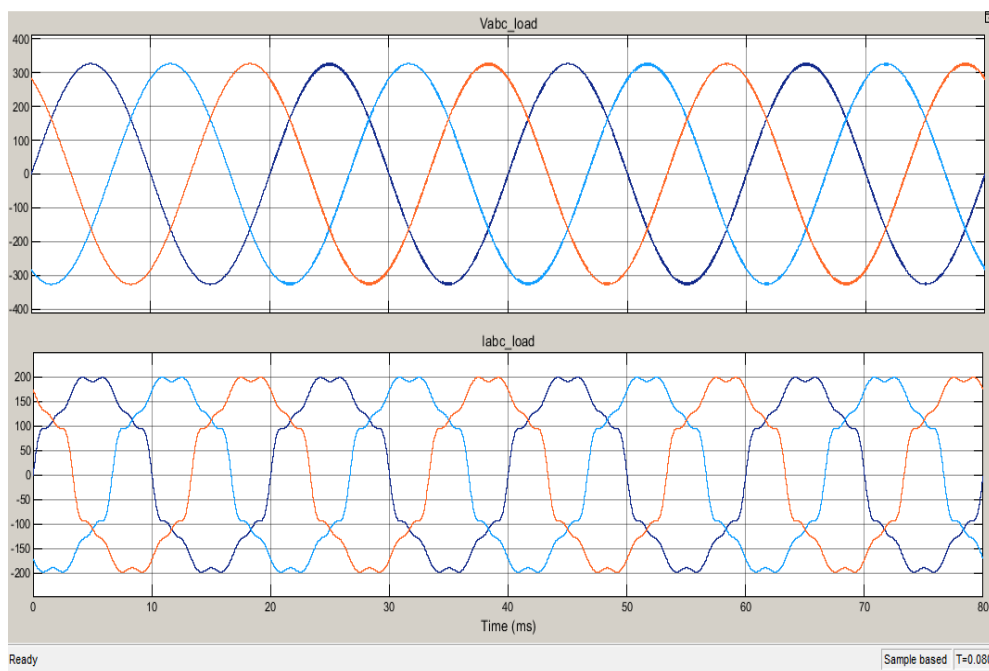
**Σχήμα 4.20** Παράλληλο ενεργό φίλτρο για απόσβεση αρμονικών τεσσάρων αγωγών.

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η κατασκευή των πηγών ρεύματος που εξομοιώνουν τη λειτουργία της πραγματικής εγκατάστασης, όσον αφορά τη θεμελιώδη και τις αρμονικές του ρεύματος.



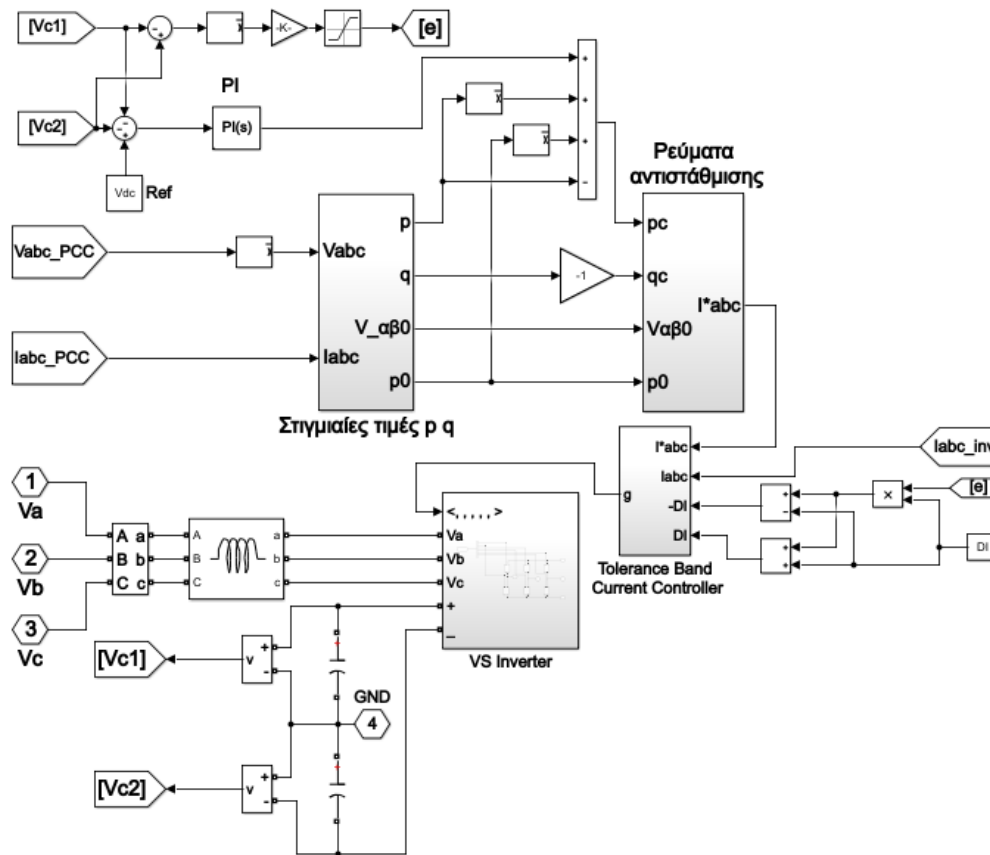
**Σχήμα 4.21** Πηγές ρεύματος

Στο παρακάτω σχήμα (4.22) παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος του μη γραμμικού φορτίου. Παρατηρούμε ότι η τάση παρουσιάζει μια καθαρά ημιτονοειδή μορφή, ενώ το ρεύμα έχει υποστεί παραμόρφωση η οποία οφείλεται στη τροφοδότηση των μη γραμμικών φορτίων.



**Σχήμα 4.22** Κυματομορφή Τάσης και Ρεύματος μη γραμμικοί φορτίου

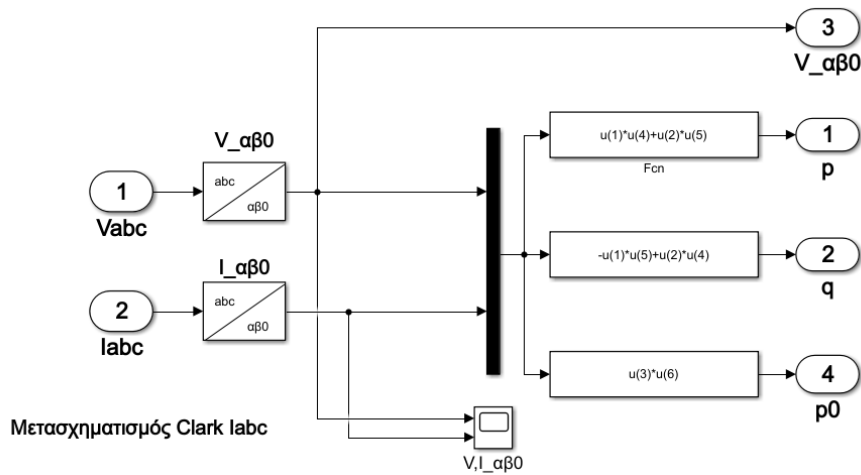
Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται το διάγραμμα του παράλληλου ενεργού φίλτρου τεσσάρων αγωγών, το οποίο αποτελείται από τον αντιστροφέα και το κύκλωμα ελέγχου, στοιχεία τα οποία αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 4.23 Λειτουργικό Διάγραμμα Παράλληλου ενεργού φίλτρου

Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζεται τρόπος υπολογισμού (σε περιβάλλον Simulink) των στιγμιαίων ισχύων p-q, καθώς και η ισχύς μηδενικής ακολουθίας μέσω του μετασχηματισμού Clark.

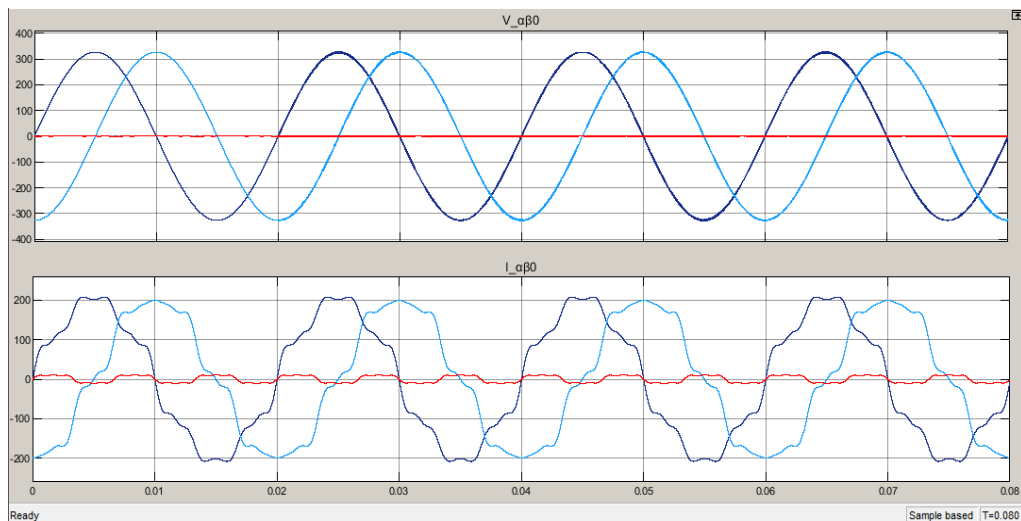
Αρχικά μετατρέπονται οι τριφασικές τιμές τάσεων και ρευμάτων abc, στο σταθερό πεδίο τιμών αβ0 και στη συνέχεια μέσω της σχέσης (3.45) υπολογίζεται η στιγμιαία ισχύς p, η στιγμιαία ισχύς q και η ισχύς μηδενικής ακολουθίας p0.



Σχήμα 4.24 Κύκλωμα υπολογισμού των στιγμιαίων ισχύων  $p$ ,  $q$  και  $p0$

Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων στο σταθερό πεδίο τιμών  $\alpha\beta 0$ , όπου όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.3.4. δεν υπάρχει τρίτη συνιστώσα.

Στην παρακάτω κυματομορφή παρατηρείται επίσης ρεύμα στον ουδέτερο αγωγό, όπου όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.3.6.1 συμβαίνει στα συστήματα τεσσάρων αγωγών. Τέτοια συστήματα είναι συνήθως τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, όπου είτε λόγω ασυμμετριών, είτε λόγω ύπαρξης τριπλών αρμονικών, να υπάρξει ροή ρεύματος στον ουδέτερο αγωγό.

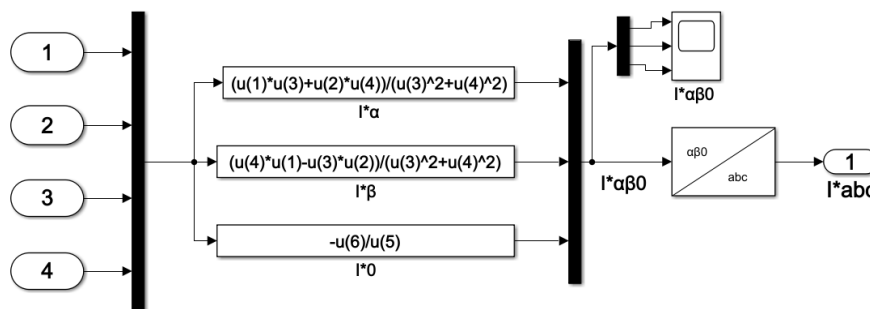


Σχήμα 4.25. Κυματομορφή τάσης και ρεύματος στο σταθερό πεδίο τιμών  $\alpha\beta 0$ .

Στο σχήμα 4.26, χρησιμοποιώντας την στιγμιαία ισχύ  $p$ , την στιγμιαία ισχύς  $q$ , την ισχύς μηδενικής ακολουθίας, καθώς και τη τάση  $V_{\alpha\beta 0}$ , που υπολογίστηκαν από το κύκλωμα του σχήματος 4.26, υπολογίζονται με την βοήθεια του μετασχηματισμού Clark, τα ρεύματα αναφοράς

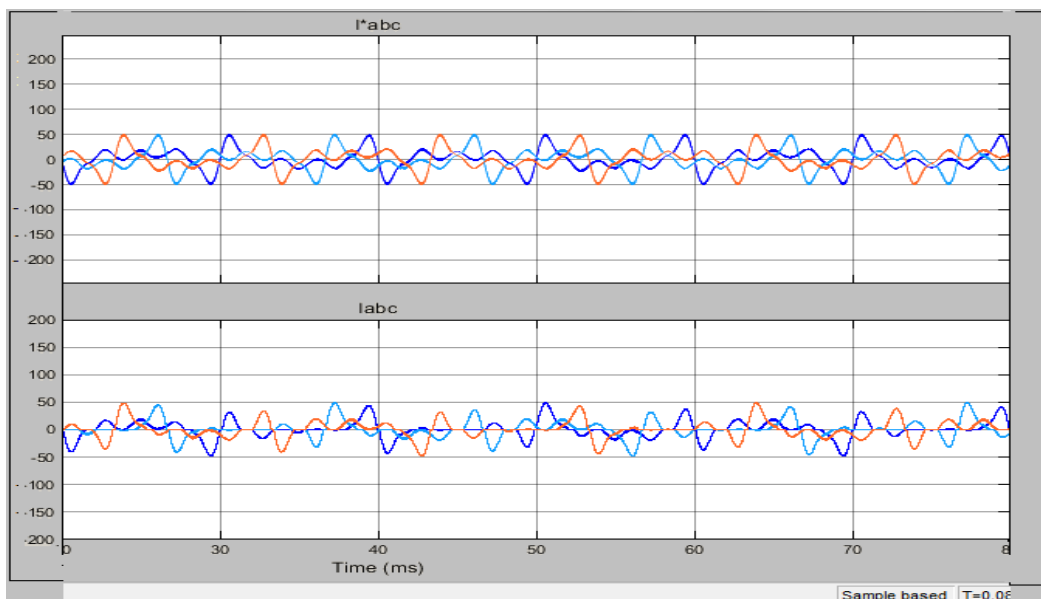


$I^*abc$ . Όπως είδη έχει αναφερθεί και στα συστήματα τριών αγωγών, τα ρεύματα αναφοράς  $I^*abc$  χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τους διακόπτες, ώστε να παράξουν ρεύματα στον αντιστροφέα ιδιά με τα ρεύματα αναφοράς, για να τροφοδοτήσουν το δίκτυο.



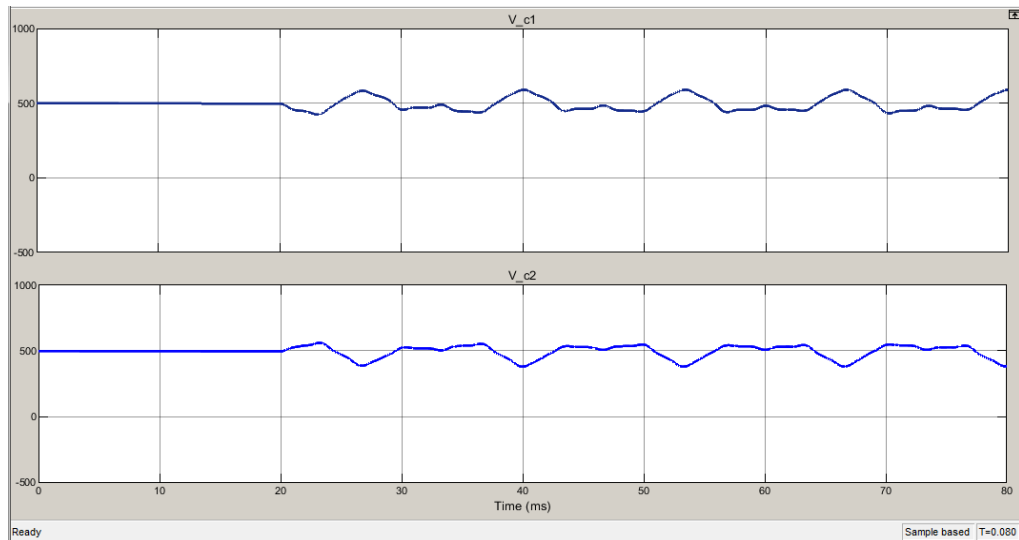
Σχήμα 4.26 Υπολογισμός ρευμάτων αναφοράς  $I^*abc$

Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος αναφοράς  $I^*abc$  και τα μετρούμενα ρεύματα  $Iabc$  του αντιστροφέα, παρατηρώντας ότι και τα δυο ρεύματα είναι σχεδόν ίσα.



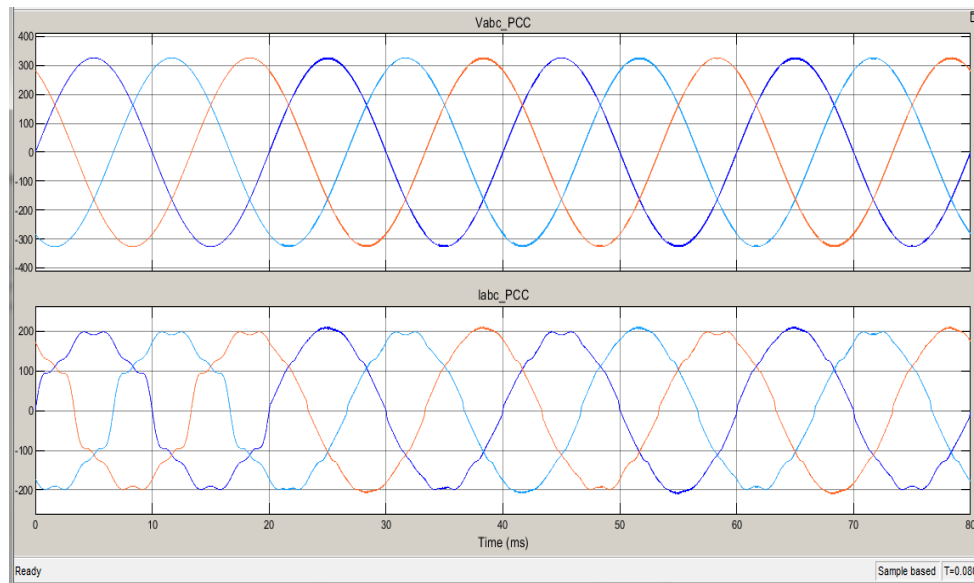
Σχήμα 4.27 Κυματομορφή ρευμάτων αναφοράς  $I^*abc$  και  $Iabc$  αντιστροφέα

Στο επόμενο σχήμα (4.28) φαίνεται η τάση στα άκρα των δυο πυκνωτών να διατηρείται σταθερά στα 1000 V. Παρατηρείται επίσης ότι η τάση επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο πυκνωτών. Αυτό συμβαίνει διότι επιλέχτηκε η τοπολογία μετατροπέα ‘split capacitor’, όπως αναφέρεται στη θεωρία στην ενότητα 3.3.7.



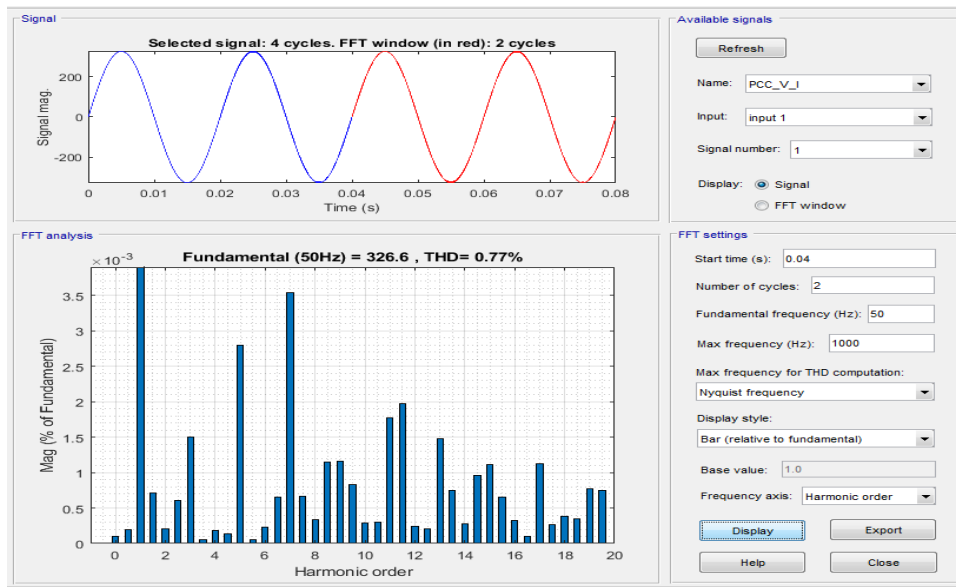
**Σχήμα 4.28** Κυματομορφή τάσης πυκνωτών

Στο σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάση και του ρεύματος στο σημείο κοινής σύνδεσης PCC, παρατηρώντας ότι το ρεύμα έχει αποκτήσει μια καθαρά ημιτονοειδής μορφή



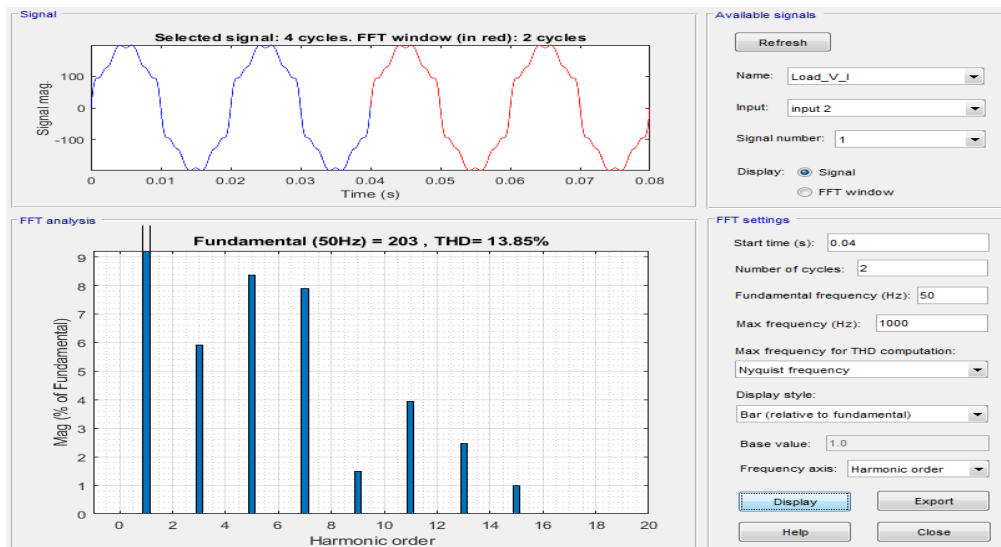
**Σχήμα 4.29** Κυματομορφή τάσης ρεύματος μετά τη προσθήκη του ενεργού φίλτρου.

Στο παρακάτω σχήμα 4.30 παρουσιάζεται η FFT ανάλυση της τάσης, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THD<sub>v</sub> στο σημείο κοινής σύνδεσης είναι ίση με 0,77% κάτι που αναμέναμε καθώς η πηγή μας δεν περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης.



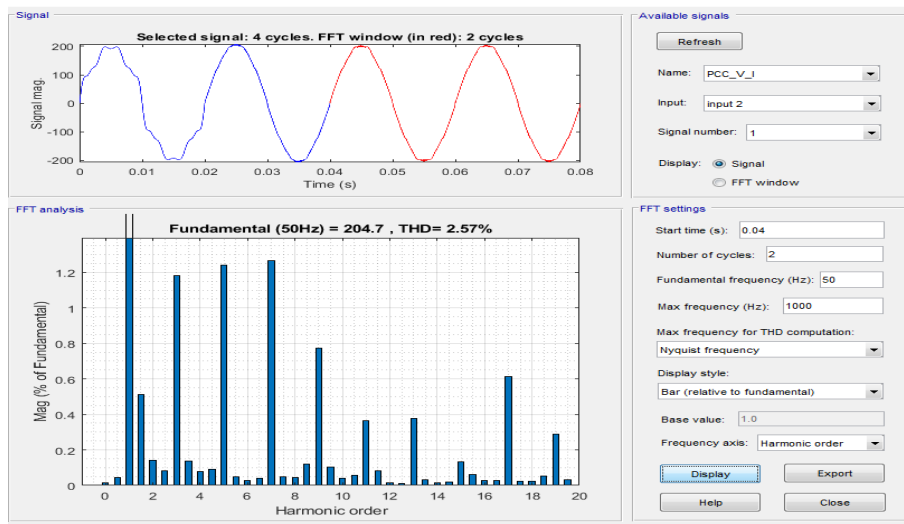
Σχήμα 4.30 FFT ανάλυση τάσης.

Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η FFT ανάλυση του ρεύματος, παρατηρώντας ότι η συνολική παραμόρφωση THD<sub>I</sub> του φορτίου είναι ίση με 13,85%.



Σχήμα 4.31 FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου πριν τη τοποθέτηση ενεργού φίλτρου.

Στο σχήμα 4.32 παρατηρείται ότι μετά την τοποθέτηση του ενεργού παράλληλου φίλτρου η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος στο κοινό σημείο σύνδεσης έχει μειωθεί από 13,85%, στο 2,57% και αποκτά μια σχεδόν καθαρά ημιτονοειδής μορφή.



Σχήμα 4.32. FFT ανάλυση ρεύματος φορτίου μετά την τοποθέτηση ενεργού φίλτρου.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να παρουσιαστεί η σχεδίαση και η προσομοίωση, ενός παράλληλου ενεργού φίλτρου για τον περιορισμό των αρμονικών σε κτίρια τριτογενή τομέα.

Αρχικά ορίστηκε η έννοια ποιότητας ισχύος σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής εγκατάστασης και αναφέρθηκαν οι διαταραχές που συμβαίνουν και μπορούν να την επηρεάσουν, ώστε χωρίς την κατάλληλη ισχύ μπορεί να υπολειπυργεί, να φθαρεί πρόωρα ή και να μην λειτουργεί καθόλου.

Αναφέρθηκαν τα διεθνή και Ελληνικά πρότυπα που ορίζουν τα όρια των διαταραχών αυτών, ώστε να λειτουργεί ένα δίκτυο όπως αυτό ορίζεται από τα πρότυπα.

Αναφέρθηκαν όλα τα είδη των φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των αρμονικών και πως αυτά σχεδιάζονται, εστιάζοντας περισσότερο στα παράλληλα ενεργά φίλτρα, όπου και χρησιμοποιηθήκαν για τη σχεδίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Clarke ορίστηκαν οι συνιστώσες της θεωρίας p-q όπου διαχωρίζεται τόσο η στιγμιαία πραγματική ισχύς p, όσο και η στιγμιαία φανταστική ισχύς q σε σταθερό και εναλλασσόμενο μέρος, γεγονός το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αντιστάθμιση τόσο των αρμονικών όσο και των ανεπιθύμητων ισχύων.

Τέλος ακολούθησε το πρακτικό μέρος το διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάστηκαν αρχικά τα δύο παράλληλα ενεργά φίλτρα τριών αγωγών, όπου βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανικό περιβάλλον, σε τριφασικά φορτία χωρίς ουδέτερο. Το πρώτο σχεδιάστηκε με την τεχνική ελέγχου υστέρησης ρεύματος και το δεύτερο με το τρόπο ελέγχου PWM σταθερής συχνότητας, όπου παρατηρήθηκαν τα ίδια αποτελέσματα με μια μικρή απόκλιση στη κυμάτωση, γεγονός που οφείλεται στη χαμηλή σταθερή συχνότητα του ελεγκτή PWM.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε το παράλληλο ενεργό φίλτρο τεσσάρων αγωγών (με ουδέτερο), το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε οποιοδήποτε φορτίο χρησιμοποιεί και ουδέτερο αγωγό.

Τα αποτελέσματα και των τριών προσομοιώσεων ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, καθώς η ικανότητα των ενεργών παράλληλων φίλτρων στην απόσβεση αρμονικών ρεύματος, στο κοινό

σημείο σύνδεσης του ζυγού (PCC), είναι αρκετά ικανοποιητική, μειώνοντας κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό και στις τρεις περιπτώσεις το γενικό δείκτη ολικής παραμόρφωσης THD.

Κλείνοντας τη παρούσα διπλωματική εργασία θα πρέπει να αναφερθεί, πως κάθε επιχείρηση πλέον, θα πρέπει στο εγγύς μέλλον να αναζητά τρόπους για την επίτευξη δύο πολύ βασικών στόχων, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Η παρουσία αρμονικών, όπως επεξηγήθηκε, δημιουργεί τρομερά προβλήματα στην ηλεκτρική εγκατάσταση και οδηγεί σε αυξημένο κόστος κατανάλωσης ενέργειας, αστοχίες και πρόωρη φθορά του εξοπλισμού, τα οποία έχουν ως συνέπεια την σπατάλη χρημάτων, την ανάγκη συχνότερων συντηρήσεων του εξοπλισμού όσο και την αντικατάσταση του, προτού περάσει το «προσδόκιμο» της διάρκειας ζωής του.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

Akagi, H., Watanabe, E.-H. & Aredes, M. (2007), *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Power Engineering, Mohamed E. El-Hawary, Series Editor, IEEE Press, USA.

Αλεξάνδρου, Δ. & Κωνσταντίνου, Δ., (2009), Διπλωματική Εργασία με τίτλο: *Υβριδικά Φίλτρα για Φιλτράρισμα Αρμονικών που Οφείλονται σε μη Γραμμικά Φορτία*, [online], Διαθέσιμο στην: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/2518/1/διπλωματική%20εργασία.pdf>, [προσπ. 20/11/2018].

Arriilaga, J., Bradley, D.-A. & Bodger, P.-S. (1985), *Power System Harmonics*, Wiley, New York.

Arrillaga, J., Watson, N.-R. & Chen, S. (2000), *Power system quality assessment*, John Wiley & Sons, Chichester, England, New York.

Chattopadhyay, S., Mitra, M. & Sengupta, S. (2010), *Electric Power Quality*, International Relations & Politics.

Dorf, R.-C. & Bishop, R.-H. (2001), *Modern Control Systems*, Prentice-Hall.

Fujita, H. & Akagi, H. (1990), *A practical approach to harmonic compensation in power systems: Series connection of passive and active filters*” in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting.

Μάνιας, Σ. (2014), *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.

Νικόλαου, Φ. (2013), Πτυχιακή Εργασία με Τίτλο: *Μελέτη Ποιότητας Ισχύος, Ανάλυση Αρμονικών και Τρόποι Αντιμετώπισης*, [online], Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Πειραιά, Διαθέσιμο στην: [oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1155/hlg\\_00773.pdf?...1](http://oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1155/hlg_00773.pdf?...1), [προσπ. 18/11/2016].

Πληθάρας, Χ., (2012), Πτυχιακή Εργασία με Τίτλο: *Μελέτη Ποιότητας Ισχύος και Ανάλυση Αρμονικών*, [online], Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Πειραιά,

Διαθέσιμο στην: [oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/773/hlg\\_00668.pdf?...1](http://oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/773/hlg_00668.pdf?...1),  
[προσπ. 06/01/2017].

Thompson, K.- M. (2007), *Power Quality in Electrical Systems*, Mc Graw-Hill.