



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**Επιβλέπων: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης**

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ  
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

**(POWER QUALITY STUDY, ANALYSIS AND METHODS OF HARMONIC  
RESPONSE)**

**Πτυχιακή  
Εργασία:  
Φρονιμάκη Ε. Νικόλαου (Α.Μ. 34511)**

**ΙΟΥΝΙΟΣ 2013**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ πολύ την Κυρία Ερριέτα Ζουντουρίδου για την βοήθειά της στην πραγματοποίηση της πτυχιακής μου εργασίας.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Υπό την ευρύτερη έννοιά της, η ποιότητα ισχύος είναι ένα σύνολο συνθηκών και περιορισμών που επιτρέπουν στα ηλεκτρικά συστήματα να λειτουργούν όπως προορίζεται. Ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που τροφοδοτεί ένα φορτίο, το οποίο χωρίς την κατάλληλη ισχύ μπορεί να υπολειτουργεί, να φθαρεί ή και να μη λειτουργήσει καθόλου. Ιδανικά η ηλεκτρική ισχύς θα είχε ημιτονοειδή μορφή με πλάτος και συχνότητα που δίνονται από τα εθνικά πρότυπα ή τις προδιαγραφές του συστήματος. Στην πραγματικότητα αυτό το ιδανικό δεν θα μπορούσε να υπάρξει ποτέ. Μερικές από τις παρεκκλίσεις που συναντώνται ακολουθούν:

- Μεταβολές της τάσης: Αύξηση ή μείωση της τάσης συνήθως λόγω της μεταβολής του φορτίου του συστήματος διανομής. Μετράται η τάση για περίοδο μιας εβδομάδας και θα πρέπει ο μέσος όρος του 95% των τιμών ( 10λεπτο) να βρίσκεται στο φάσμα  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής.
- Φλίκερ (Flicker): Οι τυχαίες ή επαναλαμβανόμενες διακυμάνσεις στην RMS τάση μεταξύ 90 και 110% της ονομαστικής τιμής, η οποία οδηγεί σε οπτικά αισθητή μεταβολή της έντασης του φωτός που εκπέμπει ένας λαμπτήρας.
- Βύθιση της τάσης : Ξαφνική μείωση της τάσης σε ποσοστό 90% έως 1% της ονομαστικής, διάρκειας 0.5 κύκλου ως 1 λεπτό.

Και οι Αρμονικές ορίζονται ως ημιτονοειδείς τάσεις με συχνότητα ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους (50Hz).

## ABSTRACT

In its broadest sense, the power quality is a set of conditions and constraints that enable electrical systems to operate as intended. The term used to describe the quality of the electrical power supply that powers a load, which without the proper force may poorly be damaged or may not work at all. Ideally the electric power would sinusoidal with amplitude and frequency given by national standards or system specifications. In reality this ideal could never be. Some exceptions are found below:

- Changes the trend: Increase or decrease the voltage usually due to the change of load distribution system. Measure the voltage for a period of one week and will have an average of 95% of values (10min) lie in the range  $\pm 10\%$  of nominal value.
- Flicker (Flicker): The random or repetitive fluctuations in RMS voltage between 90 and 110% of the nominal value, which results in a visually perceptible change in the intensity of light emitted by a lamp.
  - Immersion voltage: Sudden voltage reduction of 90% to 1% of the nominal, lasting 0.5 cycle to 1 minute.

All Harmonics are defined as sinusoidal voltages with a frequency equal to an integer multiple of the fundamental (50Hz).

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ Η ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ.....</b>	<b>7</b>
1.1 ΒΥΘΙΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ.....	8
1.2 ΔΙΑΚΟΠΕΣ.....	10
1.3 ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ.....	11
1.4 FLICKER.....	12
1.5 ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΦΑΣΕΩΝ.....	13
1.6 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ.....	13
1.7 ΘΟΡΥΒΟΣ (NOISE).....	16
1.8 ΠΤΩΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ (VOLTAGE SAGS).....	16
1.9 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC) ΩΣ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ.....</b>	<b>20</b>
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	21
2.2 ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ .....	25
2.3 ΠΗΓΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ.....	27
2.4 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....	29
2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	35
2.6 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΟΙ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ.....	44
2.7 ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....</b>	<b>53</b>
3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....	53
3.2 ΦΙΛΤΡΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....	55
3.3 ΜΟΝΟΣΥΝΤΟΝΙΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	57
3.4 ΔΙΠΛΟΣΥΝΤΟΝΙΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ ( DOUBLE TUNED).....	61
3.5 ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	63
3.6 ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	65
3.7 ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ ΤΥΠΟΥ C.....	66

3.8 ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ.....68

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....71**

4.1 ΕΠΙΤΟΠΙΑ ΕΡΕΥΝΑ.....71

4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΥΝ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ  
ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ.....74

**ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....76**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....77**

## ΠΗΓΕΣ

- 1) ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ – ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΠΕΡΙΚΛΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ, ΑΘΗΝΑ 2003
- 2) M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press, New York, 1999.
- 3) E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, “Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.18, no.1, pp. 265-270, January 2003.
- 4) F.D. Martzloff, “Surge recordings that make sense: Shifting focus
- 5) *E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, “Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.18, no.1, pp. 265-270, January 2003*
- 6) I.K. Χατζηλάου, I.M. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, I.K. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, “Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο “Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο”, Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Διήμερο ΤΕΕ, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- 7) I.K. Χατζηλάου, Γ. Γαλάνης, Ν. Πιρτζινίδης, “Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης Υποβρυχίων του ΠΝ”, Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Διήμερο ΤΕΕ, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- 8) Gallis R. M., 2004, American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition.
- 9) Ρωσσιάδου Κ., Μακρογιάννης Τ. Ι., Μπαλαφούτης Χ., Φλόκα Ε. Α., 2002: Αρμονική ανάλυση της μέσης ετήσιας κύμανσης της ατμοσφαιρικής πίεσης στον ελλαδικό χώρο. 6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Ιωάννινα Σεπτεμβρίου 2002  
Ηλεκτρονικά Ισχύος. Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Τόμος 1ος - 5<sup>η</sup> Έκδοση
- 10) European Standard EN-50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC, Brussels, Belgium, 1994

- 11) Electromagnetic Compatibility (EMC), IEC 61000-X-X.
- 12) IEEE Std 519, IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electrical systems, 1992.
- 13) IEEE Std 1159, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, 1995.
- 14) M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press, New York, 1999.
- 15) Information Technology Industry Council web page:  
<http://www.itic.org/isspol/tech.html>
- 16) S. Santoso, H.W. Beaty, R. Dugan, M.F. McGranaghan, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Professional, 2nd Edition 2002.
- 17) W.M. Grady and S. Santoso, Understanding Power System Harmonics IEEE Power Engineering Review, pp. 8-11, November 2001.
- 18) <http://electroepistimi.blogspot.gr/2009/06/blog-post.html>
- 19) The European Union On-line: <http://europa.eu.int/comm/consumers/cons>
- 20) J. Arriilaga, D.A. Bradley, and P.S. Bodger, "Power System Harmonics", New York: Wiley, 1985.
- 21) N. Shepherd and P. Zand, "Energy flow and power factor in nonsinusoidal circuits", Cambridge University Press, 1979.
- 22) George Wakileh, "Power System Harmonics", Springer State Estimation In electric Power Systems, A. Monticelli, Kluwer Academic Publishers
- 23) ΤΑΣΙΟΣ Ν. Ποιότητα Ισχύος : Μελέτη και θεραπεία των αρμονικών συνιστωσών σε βιομηχανικό περιβάλλον ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 2006
- 24) "The FFT-an algorithm the whole family can use", Daniel N. Rockmore, Departments of Mathematics and Computer Science, October 11, 1999
- 25) "Έλεγχος AC/DC/AC Μετατροπέα Τριών Κλάδων για Λειτουργία Ενισχυτή σε Προσομοίωση Πραγματικού Χρόνου", Αλέξανδρος Ρήγας, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- 26) "Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου", Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ



- 27) “Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ. ”, Χρήστος Ε. Γκιλφέσης, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- 28) “Ηλεκτρολογική εγκατάσταση και μετρητικό σύστημα φωτοβολταϊκού σταθμού μικρής ισχύος ”, Γεώργιος Α. Γιαννακόπουλος , Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- 29) M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press, New York, 1999
- 30) I.K. Χατζηλάου, Γ. Γαλάνης, Ν. Πιρτζινίδης, “Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης Υποβρυχίων του ΠΝ”, Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Δήμερο ΤΕΕ, 12-13 Ιανουαρίου 2007
- 31) .Κ. Χατζηλάου, Γ. Γαλάνης, Ν. Πιρτζινίδης, “Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης Υποβρυχίων του ΠΝ”, Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Δήμερο ΤΕΕ, 12-13 Ιανουαρίου 2006
- 32) Gallis R. M., 2004, American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition.
- 33) Van Duijsen P., December 2001, Simulation and «animation» of power electronics and electrical drives, PCIM Europe, <http://www.caspoc.com>

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ – ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΠΕΡΙΚΛΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ, ΑΘΗΝΑ 2003
- M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press, New York, 1999.
- E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, “Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.18, no.1, pp. 265-270, January 2003.
- F.D. Martzloff, “Surge recordings that make sense: Shifting focu

- I.K. Χατζηλάου, I.M. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, I.K. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, “Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο "Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο", Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Διήμερο TEE, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- I.K. Χατζηλάου, Γ. Γαλάνης, Ν. Πιρτζινίδης, “Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης Υποβρυχίων του ΠΝ”, Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Διήμερο TEE, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- Gallis R. M., 2004, American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition.
- Ρωσσιάδου Κ., Μακρογιάννης Τ. Ι., Μπαλαφούτης Χ., Φλόκα Ε. Α., 2002: Αρμονική ανάλυση της μέσης ετήσιας κύμανσης της ατμοσφαιρικής πίεσης στον ελλαδικό χώρο. 6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Ιωάννινα Σεπτεμβρίου 2002  
Ηλεκτρονικά Ισχύος. Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Τόμος 1ος - 5<sup>η</sup> Έκδοση
- European Standard EN-50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC, Brussels, Belgium, 1994
- Electromagnetic Compatibility (EMC), IEC 61000-X-X.
- IEEE Std 519, IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electrical systems, 1992.
- IEEE Std 1159, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, 1995.
- M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press, New York, 1999.
- Information Technology Industry Council web page:  
vhttp://www.itic.org/isspol/tech.html
- S. Santoso, H.W. Beaty, R. Dugan, M.F. McGranaghan, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Professional, 2nd Edition 2002.
- W.M. Grady and S. Santoso, Understanding Power System Harmonics EEE Power Engineering Review, pp. 8-11, November 2001.
- <http://electroepistimi.blogspot.gr/2009/06/blog-post.html>

- The European Union On-line: <http://europa.eu.int/comm/consumers/cons>
- J. Arriilaga, D.A. Bradley, and P.S. Bodger, ‘‘Power System Harmonics’’,New York: Wiley,1985.
- N. Shepherd and P. Zand, ‘‘Energy flow and power factor in nonsinusoidal circuits’’,Cambridge University Press, 1979.
- George Wakileh, ‘‘Power System Harmonics’’ , Springer State Estimation In electric Power Systems, A. Monticelli, Kluwer Academic Publishers
- ΤΑΣΙΟΣ Ν. Ποιότητα Ισχύος : Μελέτη και θεραπεία των αρμονικών συνιστωσών σε βιομηχανικό περιβάλλον ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 2006
- ‘‘The FFT-an algorithm the whole family can use’’, Daniel N. Rockmore, Departments of Mathematics and Computer Science, October 11, 1999
- ‘‘Έλεγχος AC/DC/AC Μετατροπέα Τριών Κλάδων για Λειτουργία Ενισχυτή σε Προσομοίωση Πραγματικού Χρόνου’’, Αλέξανδρος Ρήγας, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- ‘‘Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου’’, Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- ‘‘Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ. ’’, Χρήστος Ε. Γκιλφέσης, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
- ‘‘Ηλεκτρολογική εγκατάσταση και μετρητικό σύστημα φωτοβολταϊκού σταθμού μικρής ισχύος ’’, Γεώργιος Α. Γιαννακόπουλος , Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ Η ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

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 (1).

Οι εταιρίες ηλεκτρισμού, σε όλο τον κόσμο, καλούνται να αποδείξουν ότι η παρεχόμενη ισχύς ικανοποιεί τις προϋποθέσεις εκείνες που εγγυώνται την 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.

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. Τα σημαντικότερα φαινόμενα τα οποία καλύπτει ο όρος ποιότητας ισχύος είναι:

- Βυθίσεις Τάσης
- Διακοπές (μικρής διάρκειας, μεγάλης διάρκειας)

- Υπερτάσεις (μικρής διάρκειας, μεγάλης διάρκειας)
- Φλίκερ
- Ασυμμετρία φάσεων
- Αρμονικές

## 1.1 ΒΥΘΙΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ

Βύθιση τάσης είναι η μικρής διάρκειας μείωση της ενεργού τιμής της τάσης κυρίως λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο ή λόγω της σύνδεσης μεγάλων κινητήρων. Βύθιση της τάσης παρατηρείται επίσης και κατά την προσωρινή λειτουργία ενός μετασχηματιστή στην περιοχή κορεσμού της καμπύλης λειτουργίας του, λόγω των μεγάλων ασύμμετρων ρευμάτων που προκαλούνται (π.χ. κατά την ενεργοποίηση του) (2).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του φαινομένου της βύθισης τάσης είναι η διάρκεια του και το μέγεθος της τάσης. Για βυθίσεις τάσης που προκαλούνται από σφάλματα, το μέγεθος της τάσης εξαρτάται από την απόσταση του σφάλματος από το φορτίο, τις διασυνδέσεις του δικτύου καθώς και το πόσο δυνατό ή ασθενές είναι το δίκτυο (ισχύς βραχυκύκλωσης) στο PCC (point of common coupling - το σημείο όπου ενώνονται ηλεκτρικά το φορτίο, το σφάλμα και η παροχή ισχύος του δικτύου) (3). Ο τύπος του σφάλματος και οι συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου είναι επίσης καθοριστικοί παράγοντες του μεγέθους της τάσης.

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

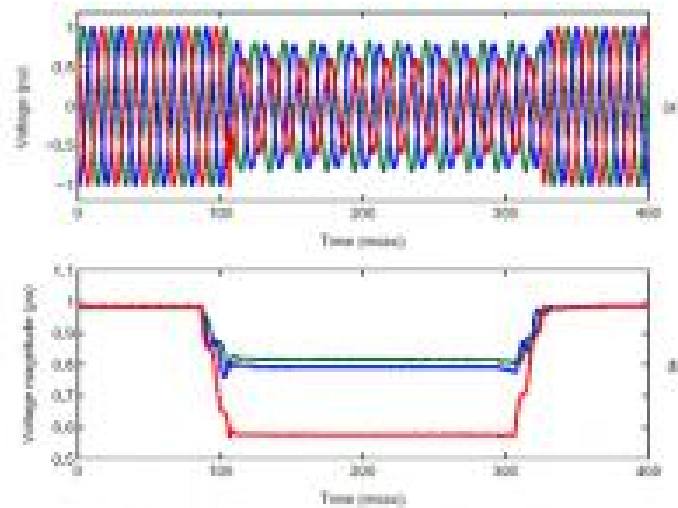
Από την πλευρά της εταιρίας ηλεκτρισμού, προσπάθεια μείωσης του αριθμού βυθίσεων τάσης συνεπάγεται προσπάθεια μείωσης του αριθμού σφαλμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με συχνότερη συντήρηση και επιθεώρηση του δικτύου και του εξοπλισμού. Η χρήση υπόγειων καλωδίων αντί για εναέριες γραμμές μειώνει την συχνότητα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

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

Από την πλευρά των καταναλωτών, βοήθεια μπορεί να αναζητηθεί σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (για παράδειγμα οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας - UPS) ή υποστήριξης της τάσης (DVR). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι για τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές - PLC η χρήση συσκευών αδιάλειπτης παροχής ενέργειας είναι τις περισσότερες φορές απαραίτητη και οικονομικά τεκμηριωμένη. Για τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας είναι πλέον κοινή πρακτική (4).

Μια μέτρηση βύθισης τάσης δίνεται στο Σχ. 1. Το φαινόμενο διαρκεί περίπου 200 msec και η τάση για μία από τις φάσεις μειώνεται στο 60% της ονομαστικής για αυτό το διάστημα. Για ηλεκτρονικούς υπολογιστές, PLC, ηλεκτρονικές συσκευές μετρήσεων κá, η καμπύλη ITIC (Information Technology Industry Council) δείχνει την τυπική αντοχή τους σε κλίμακα μεγέθους-διάρκειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξετασθεί το εάν μια βύθιση τάσης (ή μια υπέρταση) δημιουργεί πρόβλημα ή όχι, αλλά και ως προδιαγραφή για τους κατασκευαστές συσκευών. Η ευαισθησία των υπολογιστών σε διαταραχές έχει κάνει την χρήση UPS (Uninterruptible Power Supply) κοινή πρακτική.

Για μεγαλύτερα φορτία υπάρχουν διάφορες λύσεις οι οποίες μπορούν να προσφέρουν προστασία στα ευαίσθητα φορτία από βυθίσεις τάσης είτε υποστηρίζοντας την τάση για μικρό χρονικό διάστημα είτε μεταφέροντας τα φορτία σε άλλη «καθαρή» παροχή ισχύος.



Σχήμα 1. Μέτρηση βύθισης τάσης (α) Κυματομορφές τάσης (β) Η ενεργός τιμή της τάσης για κάθε φάση

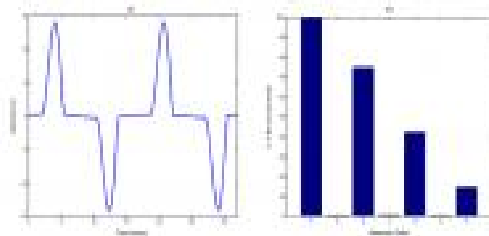
## 1.2 ΔΙΑΚΟΠΕΣ

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές οι διακοπές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: μικρής διάρκειας (μικρότερης από 3 λεπτά) και μεγάλης διάρκειας (μεγαλύτερης από 3 λεπτά). Οι διακοπές μεγάλης διάρκειας οφείλονται είτε σε κάποιο σοβαρό σφάλμα, το οποίο δεν καθάρισε με την λειτουργία του συστήματος προστασίας και χρειάζεται αποκατάσταση επιτόπου, είτε λόγω προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης στο δίκτυο. (5)

Οι διακοπές μικρής διάρκειας προέρχονται από την λειτουργία διακοπών αυτόματης επαναφοράς (reclosers) και επαναφορά του δικτύου μετά από σφάλμα. Η διαδικασία αυτή είναι συνηθισμένη σε δίκτυα διανομής και εφαρμόζεται διότι μεγάλο ποσοστό των σφαλμάτων δεν είναι μόνιμα και εξαφανίζονται μετά την λειτουργία του συστήματος προστασίας. Οι διακοπές μπορούν να θεωρηθούν ειδική περίπτωση βυθίσεων τάσης (όπου η τάση γίνεται μηδέν) και όσο αφορά την επίδραση τους στα φορτία ισχύει ότι και για την επίδραση των βυθίσεων τάσης.

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

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την αποφυγή προβλημάτων από τις διακοπές είναι η εγκατάσταση συστημάτων UPS και ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Βελτίωση από την μεριά του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας αφενός την συχνότητα των σφαλμάτων και αφετέρου μειώνοντας την διάρκεια των διακοπών. Μείωση της διάρκειας των διακοπών μπορεί να γίνει με αξιοποίηση των μοντέρνων συστημάτων προστασίας. Σχήματα τα οποία προβλέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αυξάνουν την αποτελεσματικότητα στον εντοπισμό του σφάλματος, επιταχύνουν τους χρόνους προστασίας αλλά και μειώνουν τον χρόνο αποκατάστασης σφαλμάτων. (6)



Σχήμα 2. Καμπύλη ITIC (υπό συνθήκες υπέρτασης η συσκευή κινδυνεύει από βλάβη, ενώ υπό συνθήκες μειωμένης τάσης η συσκευή ενδέχεται να σταματήσει να λειτουργεί)(7)

### 1.3 ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ

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

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



Οι τρόποι επίλυσης θα μπορούσαν να είναι οι ίδιοι με αυτούς για τις βυθίσεις. Όμως λόγω της μικρής συχνότητας και έκτασης του φαινομένου στην πράξη δεν λαμβάνονται κάποια μέτρα αποκλειστικά για αυτό το πρόβλημα. Ενέργειες που γίνονται και για άλλες διαταραχές εξομαλύνουν και τα αποτελέσματα αυτών των διαταραχών.(8)

#### 1.4 FLICKER

Το Flicker (φλίκερ), ή αλλιώς 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 την συχνότητα και το πλάτος της αλλαγής της έντασης του φωτός και από τον παρατηρητή (δεν αντιλαμβάνονται όλοι την ίδια ενόχληση στην ίδια διακύμανση της τάσης).

Κύρια πηγή δημιουργίας του φαινομένου της διακύμανσης της τάσης είναι τα ηλεκτρικά τόξα των ηλεκτρικών κλιβάνων, οι μηχανές συγκόλλησης και παρόμοια «βαριά» φορτία που καταναλώνουν ρεύματα με μεγάλη διακύμανση. Φλίκερ μπορεί να εμφανιστεί με την παρουσία ενδιάμεσων αρμονικών σε μία συχνότητα κοντά στην θεμελιώδη ή και σε αρμονική. (9)

Οι διακυμάνσεις τάσεως προκαλούνται όταν τα φορτία καταναλώνουν ρεύματα που έχουν σημαντικές αιφνίδιες ή περιοδικές διακυμάνσεις. Το κυμαινόμενο ρεύμα που καταναλώνεται από την παροχή προκαλεί πρόσθετες μειώσεις τάσεως στο σύστημα τροφοδοσίας, που οδηγούν σε διακυμάνσεις της παρεχόμενης τάσης. (10).

Τα φορτία που παρουσιάζουν συνεχείς, γρήγορες διακυμάνσεις (όπως ηλεκτρικοί κάμινοι, ηλεκτροσυγκολλητές, εγκαταστάσεις με συχνές εκκινήσεις κινητήρων, μονάδες κλιματισμού, ανεμιστήρες, μηχανισμοί κινητήρων με κυκλική λειτουργία, ελασματοουργεία, μηχανήματα με μεγάλες αλλαγές ταχύτητας των κινητήρων, πριόνια και μηχανήματα διάλυσης αυτοκινήτων) είναι λοιπόν εκείνα που πιθανότατα θα προκαλέσουν διακυμάνσεις τάσεως

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

### 1.5 ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΦΑΣΕΩΝ

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) (11). Ασυμμετρία τάσεως εμφανίζεται όταν είτε υπάρχει διαφορά στην ενεργό τιμή της τάση μεταξύ των φάσεων είτε επειδή η γωνία μεταξύ των φάσεων αποκλίνει από τις  $120^\circ$ .

### 1.6 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ

Φορτία με μεγάλες μεταβολές στην ένταση του ρεύματος που καταναλώνουν, προκαλούν διακυμάνσεις στην τάση, οι οποίες έχει επικρατήσει διεθνώς να ονομάζονται flicker (δηλαδή τρεμόσβησμα) διότι προκαλούν εναλλαγές στην ένταση του φωτισμού. Οι διακυμάνσεις αυτές δεν ξεπερνούν τα τυπικά όρια. Τυπικό παράδειγμα φορτίου που προκαλεί τέτοιου είδους προβλήματα είναι οι κλίβανοι τόξου.

Η διακύμανση της τάσης μπορεί να ειπωθεί σαν μια διαμόρφωση της θεμελιώδους συχνότητας (50 Hz) από ένα σήμα μικρότερης συχνότητας. Επομένως ένας τρόπος χαρακτηρισμού του φαινομένου είναι μέσω του πλάτους του σήματος αυτού. Διαμόρφωση έως και 0.5% του πλάτους της τάσης στα 50 Hz μπορεί να προκαλέσει αντιληπτές αλλαγές στην ένταση φωτισμού εάν η συχνότητα διαμόρφωσης είναι 6-8 Hz. Συσκευές δυναμικής αντιστάθμισης της αέργου ισχύος (διατάξεις πυκνωτών, πηνίων και ηλεκτρονικών ισχύος) μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τα προβλήματα βελτιώνοντας παράλληλα τον συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης (12).

Η ποιότητα ισχύος είναι συνυφασμένη με τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις είναι απαραίτητες για τη συλλογή στοιχείων, τα οποία είτε θα δώσουν στατιστικά την εικόνα της λειτουργίας του συστήματος είτε θα εντοπίσουν ένα πρόβλημα και θα συνεισφέρουν στη λύση του. Οι μετρήσεις, ανάλογα με τον στόχο τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

#### **A. Μετρήσεις για την επίλυση προβλήματος Ποιότητας Ισχύος**

Η λύση του προβλήματος, το οποίο παρουσιάστηκε σε έναν καταναλωτή μπορεί να βρεθεί με την εκπόνηση μελέτης που ξεκινά από την καταγραφή και ανάλυση της ποιότητας ισχύος του ηλεκτρικού συστήματος και καταλήγει στην επιλογή κάποιας μεθόδου βελτίωσής της ή προστασίας του φορτίου, αν βέβαια αποδειχθεί από την ανάλυση ότι η αιτία του προβλήματος βρίσκεται στα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος του δικτύου. Πιο αναλυτικά, τα βήματα μιας τέτοιας μελέτης είναι :

- **Μετρήσεις:** χρησιμοποίηση καταγραφικών μηχανημάτων για συλλογή στοιχείων που αφορούν το πρόβλημα. Η καταγραφή των δεδομένων του δικτύου είναι απαραίτητη σε αυτή τη φάση προκειμένου να αξιοποιηθούν οι μετρήσεις όσο το δυνατόν περισσότερο.
- **Ανάλυση:** η επεξεργασία των μετρήσεων είναι το επόμενο βήμα. Η ανάλυση μπορεί να βοηθήσει όχι μόνο στον εντοπισμό του προβλήματος αλλά και στην απόκτηση των παραμέτρων που χρειάζονται για τη λύση του. Η ανάλυση των μετρήσεων μπορεί να συνδυαστεί με την ανάλυση του δικτύου. Προγράμματα προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επακριβή μελέτη του φαινομένου που προκαλεί το πρόβλημα.
- **Διερεύνηση λύσεων:** τα μέτρα τα οποία θα ληφθούν για τη λύση του προβλήματος πρέπει να εξετασθούν προσεκτικά από τεχνικής και οικονομικής άποψης. Η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης μπορεί και εδώ να φανεί πολύτιμη.
- **Μετρήσεις για την αξιολόγηση της λύσης:** αν τελικά η προτεινόμενη λύση πραγματοποιηθεί, μετρήσεις πρέπει να γίνουν εκ νέου για να διαπιστωθεί σε ποιο βαθμό η λύση είναι αποτελεσματική.

Για παράδειγμα: για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται από αρμονικές απαιτείται μελέτη ώστε να αποτυπωθούν οι αρμονικές που υπάρχουν στο σύστημα και να βρεθεί από πού προέρχονται. Αν αποφασισθεί η χρήση φίλτρου, απαιτείται ιδιαίτερη

προσοχή στην επιλογή των χαρακτηριστικών του, διότι υπάρχει κίνδυνος αντί να μειωθεί το πρόβλημα των αρμονικών αυτό να αυξηθεί. Ομοίως, η εγκατάσταση νέου πυκνωτή πρέπει να γίνεται αφού πρώτα διαπιστωθεί μέσω μελέτης ότι οι επικρατούσες αρμονικές δεν συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού που δημιουργεί ο πυκνωτής.

### ***B. Μετρήσεις μεγάλης διάρκειας με μόνιμα εγκατεστημένες μετρητικές συσκευές***

Τέτοιες μετρήσεις αφορούν τόσο τις εταιρίες ηλεκτρισμού όσο και μεγάλους καταναλωτές (βιομηχανικούς) και καταναλωτές με ειδικές απαιτήσεις (νοσοκομεία, αεροδρόμια κ.ά.). Η διαθέσιμη τεχνολογία προσφέρει μεγάλες δυνατότητες. Καταγραφικές συσκευές οι οποίες συνδέονται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του Internet, μπορούν να τοποθετηθούν και να προσφέρουν διαρκώς πληροφορίες για την ποιότητα ισχύος του δικτύου και τυχόν προβλήματα που προκύπτουν.

Για τις εταιρίες ηλεκτρισμού η υλοποίηση μετρητικών προγραμμάτων με την εγκατάσταση και λειτουργία μετρητικών συσκευών παρέχει την δυνατότητα καταγραφής της υπάρχουσας κατάστασης (προκειμένου να υπάρχει μια βάση για σύγκριση με την πάροδο του χρόνου). Επίσης βελτιώνεται η επικοινωνία με τους πελάτες και παράλληλα συγκεντρώνονται πληροφορίες για τη λύση προβλημάτων τους. Γενικότερα οι μετρήσεις προσφέρουν:

- Άμεση εποπτεία του δικτύου και των λειτουργιών του (λειτουργία διακοπών, λειτουργία προστασίας, ρύθμιση τάσης),
- Ταχύ εντοπισμό υπαρχόντων προβλημάτων ή προβλημάτων σε εξέλιξη και προληπτική δράση (οργάνωση προληπτικής συντήρησης),
- Εποπτεία κρίσιμων εφαρμογών,
- Αξιολόγηση τεχνικών λύσεων και δυνατότητα βελτίωσής τους και
- Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω συνεχούς εποπτείας της κατανάλωσης και των σχετικών παραμέτρων.

## 1.7 ΘΟΡΥΒΟΣ (NOISE)

Ο θόρυβος, ή πιο συγκεκριμένα ο ηλεκτρικός θόρυβος, είναι μία συνεχής και ταχεία εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων, τα οποία παραμορφώνουν την πρότυπη κυματομορφή τάσης αυξομειώνοντας τις τιμές της. Το μέγεθος αυτών των ταχέων μεταβατικών φαινομένων είναι συνήθως πολύ μικρότερο από αυτό των μεμονωμένων μεταβατικών φαινομένων. Ο θόρυβος προέρχεται κυρίως από ηλεκτροκινητήρες και συσκευές ελέγχου κινητήρων, ηλεκτρικούς φούρνους, ηλεκτρικές συγκολλήσεις, ρελέ, απομονωμένους ατμοσφαιρικούς αποφορτιστές.

Παρόλο που ο θόρυβος θεωρείται λιγότερο επικίνδυνη διαταραχή από ένα μεγάλης έντασης μεταβατικό φαινόμενο, σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, σε εξοπλισμό τηλεπικοινωνιών και σε άλλες ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές.

## 1.8 ΠΤΩΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ (VOLTAGE SAGS)

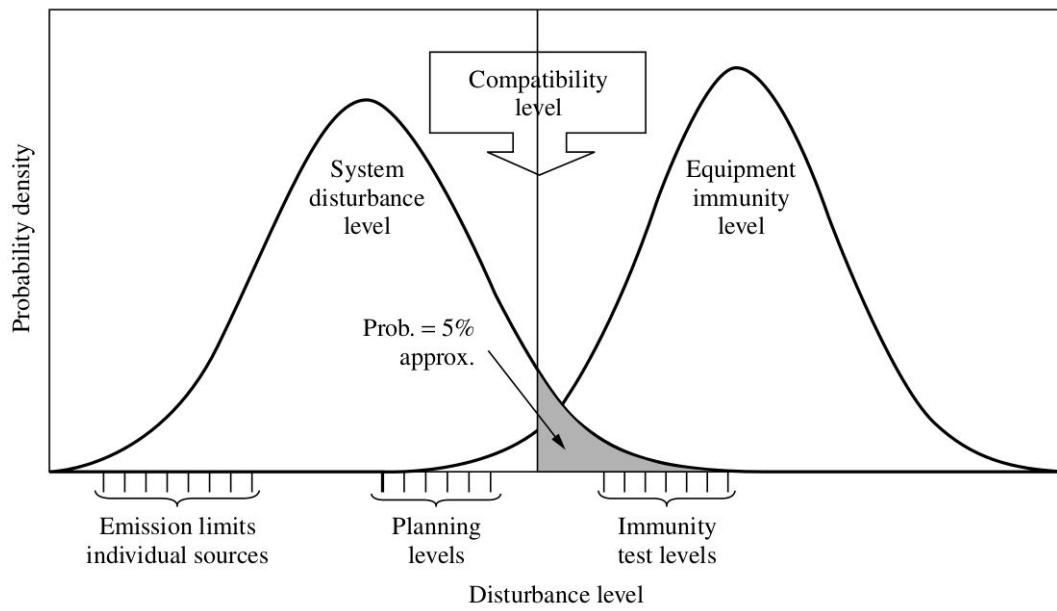
Η πτώση τάσης είναι μια μικρής διάρκειας μείωση στις τιμές της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος. Πτώσεις τάσης χρονικής διάρκειας μεγαλύτερης από δύο λεπτά, συνήθως κατηγοριοποιούνται ως υποτάσεις (undervoltage). Συνήθεις αιτίες για πτώσεις τάσης και υποτάσεις είναι σφάλματα δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, εκκινήσεις κινητήρων και εισροές μεγάλων φορτίων στο σύστημα διανομής ενέργειας.

Οι πτώσεις τάσης μπορούν να προκαλέσουν τη δυσλειτουργία ή και τη διακοπή της λειτουργίας πολλών ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών. Οι συνθήκες υπότασης μπορούν να βλάψουν διάφορους τύπους ηλεκτρικών συσκευών.

## 1.9 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC) ΩΣ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Όπως γνωρίζουμε η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί εμπορικό προϊόν και για αυτόν ακριβώς το λόγο για να διατεθεί στο καταναλωτικό κοινό πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις με σκοπό να μην δημιουργεί προβλήματα στις ηλεκτρικές συσκευές του καταναλωτή. Αντίστοιχα, οι ηλεκτρικές συσκευές που συγκεκριμένα προορίζονται για την κατανάλωση της ανωτέρω ενέργειας είναι αναγκαίο να πληρούν και αυτές κάποιες άλλες προϋποθέσεις έτσι ώστε να μην δημιουργούν προβλήματα στο δίκτυο.

Στην πρώτη περίπτωση λοιπόν γίνεται λόγος για κανονισμούς που δεσμεύεται να τηρεί ο παραγωγός – διανομέας της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στην δεύτερη ο κατασκευαστής μια ηλεκτρικής συσκευής. Η εναρμόνιση των ανωτέρω δύο είναι επιτακτική και σε διεθνές επίπεδο (και ιδιαίτερα λόγω παγκοσμιοποίησης) με την έννοια ότι μια ηλεκτρική συσκευή, οπουδήποτε και αν κατασκευάζεται, πρέπει από τη μία πλευρά να λειτουργεί ασφαλώς σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό δίκτυο (ακόμα και αν απαιτείται μετατροπή συχνότητας – τάσης) και από την άλλη πλευρά να μη προξενεί προβλήματα ποιότητας ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πρόκειται λοιπόν για τεχνικούς κανονισμούς, πρότυπα, τα οποία μπορούν να θεσπίζονται τόσο σε εθνικό επίπεδο από εθνικούς οργανισμούς όπως ο ΕΛΟΤ για την Ελλάδα, όσο και σε διεθνές (13).



Σχήμα 3 εναρμόνιση των διαταραχών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με το περιθώριο ατρωσίας των ηλεκτρικών διατάξεων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

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. Μη γραμμικά φορτία υπάρχουν τόσο σε οικιακούς όσο και σε βιομηχανικούς καταναλωτές. Τέτοια είναι (15):

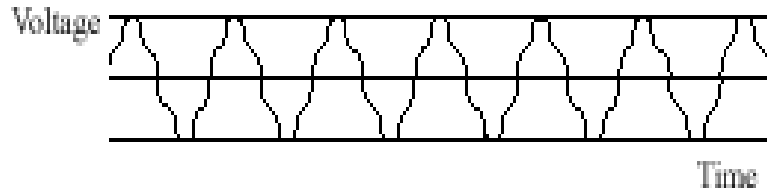
- Φορτία με ηλεκτρονικά ισχύος: ανορθωτές, PLC, κ.ά.
- Φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό τόξο: φούρνοι τόξου και λάμπες φθορισμού
- Φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά: τηλεοράσεις, φούρνοι μικροκυμάτων, φωτοαντιγραφικά, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, εκτυπωτές κλπ.

Εξαιτίας των αρμονικών ενδέχεται να λειτουργήσουν λανθασμένα συσκευές προστασίας, ειδικά αυτές που χρησιμοποιούν θερμικά μοντέλα. Αν ο υπολογισμός της ενεργού τιμής της έντασης γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή της κυματομορφής της, αυξάνεται η πιθανότητα λάθους και ανεπιθύμητης λειτουργίας της προστασίας. Για τον ίδιο λόγο λάθη παρουσιάζονται σε μετρητικές συσκευές. Οι αρμονικές επίσης είναι η αιτία για προβλήματα στη λειτουργία ηλεκτρονικών συστημάτων. Επίσης προκαλούν υπερφόρτιση (δηλαδή υπερθέρμανση) και αυξάνουν τις δονήσεις και το θόρυβο (μηχανική καταπόνηση) στον εξοπλισμό (μετασχηματιστές, μηχανές και πίνακες).

Μακροχρόνια οι αρμονικές προκαλούν πρόωρη γήρανση του εξοπλισμού. Επίσης, καθώς προστίθενται τα αρμονικά ρεύματα στον αγωγό ουδετέρου, δίνουν ρεύματα κατά πολύ μεγαλύτερα από όταν τα φορτία είναι γραμμικά, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση. Οι πυκνωτές είναι επίσης ευαίσθητοι στις αρμονικές ιδιαίτερα αν η συχνότητα του συνδυασμού πυκνωτή και δικτύου παροχής μέχρι το σημείο σύνδεσης είναι ίδια με την αρμονική που παράγεται από το φορτίο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες προκαλείται συντονισμός, αύξηση του πλάτους των αρμονικών, αύξηση της ενεργού τάσης και έντασης, υπερθέρμανση του πυκνωτή



και ενδεχομένως καταστροφή του διηλεκτρικού του υλικού ή λειτουργία της προστασίας του και αποσύνδεσή του.



Σχήμα 4 Κυματομορφή με αρμονική παραμόρφωση

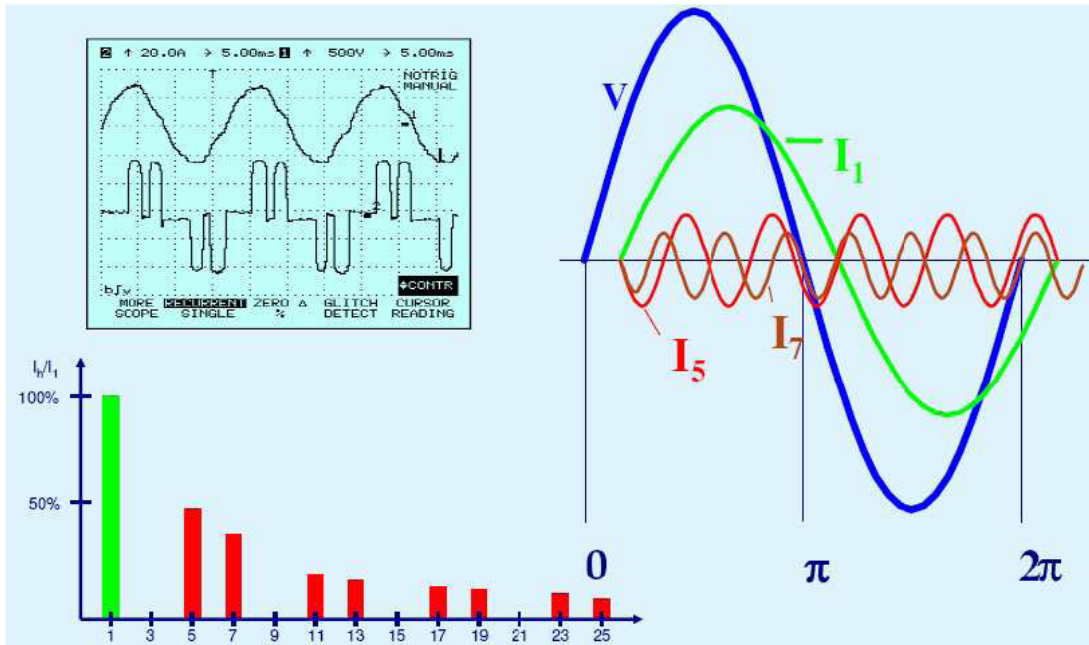
Οι αρμονικές συνδέονται άμεσα με τον συντελεστή ισχύος. Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (αυτός για τον οποίο καλούνται να πληρώσουν οι βιομηχανικοί καταναλωτές) είναι ο μέσος όρος της ενεργού ισχύος προς το γινόμενο της ενεργού τάσης με την ενεργό ένταση. Σε περιβάλλον χωρίς αρμονικές ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (ΣΙ) ισούται με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της τάσης και της έντασης (ΣΙ μετατόπισης). Η ύπαρξη αρμονικών οδηγεί σε μείωση του πραγματικού ΣΙ καθώς αυξάνεται η ενεργός τάση αλλά κυρίως η ενεργός ένταση. Ο πίνακας 3 δείχνει την επίδραση των αρμονικών στον πραγματικό ΣΙ για ένα ιδανικό φορτίο με ΣΙ μετατόπισης ίσο με 1. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη της αύξησης των απωλειών στο δίκτυο λόγω των αρμονικών (16)

Για τη μείωση των αρμονικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα (συνδυασμός πυκνωτών και πηνίων), τα οποία παγιδεύουν τις αρμονικές και δεν τους επιτρέπουν να διεισδύσουν στο δίκτυο.

## 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

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 θεμελιώδους συχνότητας ( $k$ ) καλείται τάξη της αρμονικής.



Σχήμα 5 Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος, όπου διακρίνονται οι αρμονικές 1ης, 3ης, 5ης και 7ης τάξης

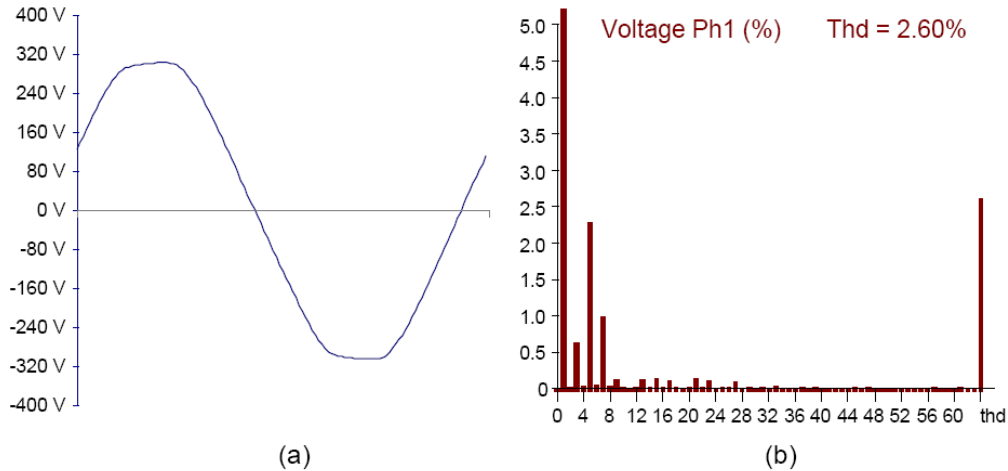
Η παρουσία αρμονικών υπολογίζεται μέσω του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) (Total Harmonic Distortion). Αρμονικές της τάσης καταγράφονται με τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THDU). Ο THDU είναι ο λόγος της ενεργού τιμής της αρμονικής τάσης προς την ενεργό τιμή της τάσης της θεμελιώδους συχνότητας, όπως φαίνεται και από την εξίσωση 2.1. Ο THD συχνά δίνεται σαν ποσοστό.

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} V_k^2}{V_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} C_{V_k}^2}{C_{V_1}^2}} \quad (2.1)$$

όπου  $V_k = \frac{c_{V_k}}{\sqrt{2}}$  η ενεργός τιμή της τάσης της αρμονικής τάξεως  $k$ ,  $V_1$  η 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. Στο Σχήμα 6 (a) 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.(17)

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6 (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.

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



Σχήμα 6 Φασματική απεικόνιση μιας συνήθους κυματομορφής τάσης, καλούμενης κι ως *πριονισμένης κορυφής*

Ότι παρουσιάστηκε για την αρμονική παραμόρφωση της τάσης και τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης THDU μπορεί ανάλογα να χρησιμοποιηθεί και για την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και τον δείκτη δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης THDI, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση 2.2

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}{I_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} c_{I_k}^2}{c_{I_1}^2}} \quad (2.2)$$

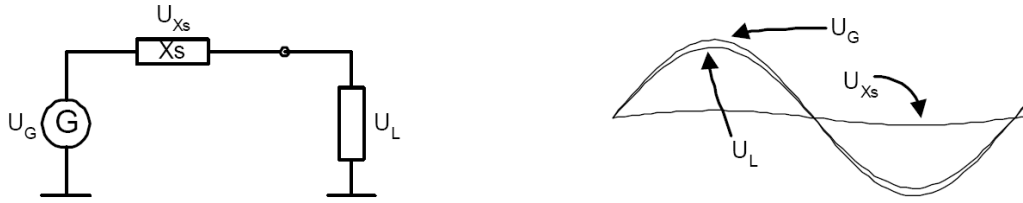
όπου  $I_k = \frac{c_{I_k}}{\sqrt{2}}$  η ενεργός τιμή της αρμονικής ρεύματος τάξης k,  $I_1$  η ενεργός τιμή του ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας,  $c_{I_k}$  το πλάτος του ρεύματος της αρμονικής τάξεως k και  $c_{I_1}$  το πλάτος του ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας.

## 2.2 ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

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 ακτίνων (CRTs) (18).

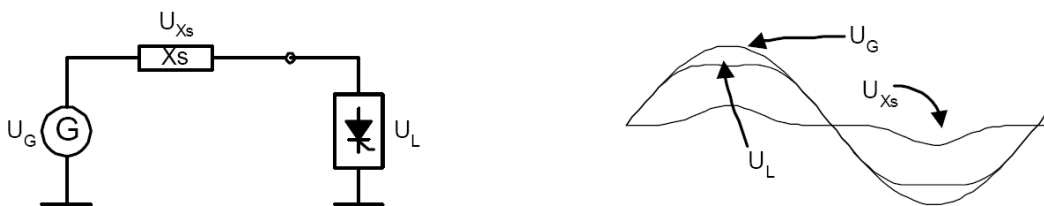
Στο Σχήμα 7 φαίνεται η αρχή της δημιουργίας των αρμονικών. Κοιτώντας το κύκλωμα από την πλευρά του καταναλωτή το ισοδύναμο κύκλωμα του υπόλοιπου δικτύου (ισοδύναμο Thevenin) μπορεί να αναπαρασταθεί από μία γεννήτρια  $G$  με αντίδραση  $X_s$  (σε περίπτωση άπειρου δικτύου δεν θα υπήρχε αντίδραση και 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. 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 (19).



Σχήμα 7 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.

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 (Σχήμα 7). 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.



Σχήμα 8 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.

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.

### 2.3 ΠΗΓΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

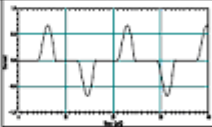
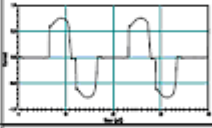
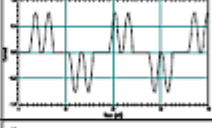
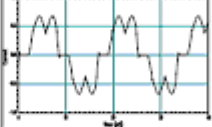
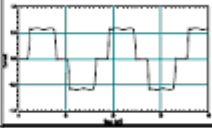
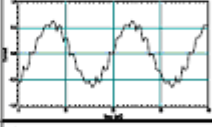
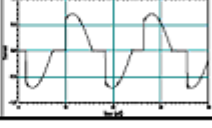
Μερικές από τις πηγές των αρμονικών που εμφανίζονται στα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές: Οι αρμονικές οφείλονται στις οδοντώσεις του πυρήνα και στις ατέλειες των μαγνητικών κυκλωμάτων τους
- Ρεύματα μαγνήτισης των Μ/Σ: Οι αρμονικές οφείλονται στο μαγνητικό κορεσμό των πυρήνων και στη μαγνητική υστέρηση
- Σιδηροσυντονισμός: Οι αρμονικές οφείλονται σε ισχυρό μη γραμμικό φαινόμενο προκαλούμενο από την αλληλεπίδραση μη γραμμικής επαγωγικής αντίδρασης (για παράδειγμα ένας μετασχηματιστής) με τη χωρητικότητα του συστήματος. Συχνά υπερσχύουν οι συχνότητες του 1/3 ή 1/5 της βασικής και εμφανίζεται σαν υποαρμονικό 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
- Τριφασικά φορτία : εισάγουν κυρίως αρμονικές περιττής τάξεως (5<sup>η</sup>, 7<sup>η</sup>, 11<sup>η</sup>, 13<sup>η</sup>, 17<sup>η</sup> 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.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κυματομορφή και η ενδεικτική αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.



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

Σχήμα 9 Κυματομορφή και ενδεικτική αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.

## 2.4 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

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 θερμοαστρών δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου. Από την άλλη, τα τυλίγματα των επαγωγικών κινητήρων υπερθερμαίνονται από τις αρμονικές, προκαλώντας με αυξημένο ρυθμό μείωση της αποδοτικότητας των μονώσεων, όπως και μείωση του χρόνου ζωής τους (20).

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 συγκόλληση.

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 ουδετέρου με δύο πιθανές επιπτώσεις (21):

- 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.

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.

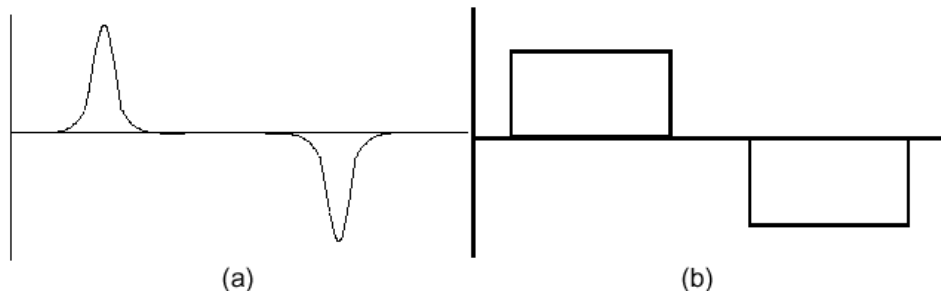
Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να τονισθεί ότι στις πηγές αρμονικών ανήκει και το ίδιο το σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όμως η επίδραση αυτή δεν είναι τόσο σημαντική στην δημιουργία όσο στην διάδοση ή στην διατήρηση των ήδη υπάρχοντων αρμονικών στο δίκτυο. Σε αυτό συνεισφέρει το γεγονός ότι για 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 την δεκαετία του '60 η αρμονική παραμόρφωση ήταν ελάχιστη (έκτοτε το δίκτυο αναπτύχθηκε πολύ, αλλά πολλές φορές άναρχα).

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 10 (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 ανελκυστήρες.



Σχήμα 10 Κυματομορφές ρεύματος που απορροφά (α) ένας προσωπικός υπολογιστής και (β) ένας κινητήρας με inverter

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 υψίσυχων 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 (22).

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 μειώνει την απόδοση κάποιων τύπων συσκευών, είναι σημαντικό να είναι δυνατός ο υπολογισμός του επιπέδου της αρμονικής παραμόρφωσης και η προσπάθεια μείωσης τους σε κάποιες περιπτώσεις. Στην συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες επιπτώσεις των αρμονικών διαταραχών στα φορτία (23):

- 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.
- 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.
- 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 τη θέση τους εκτός λειτουργίας.
- 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.
- 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:

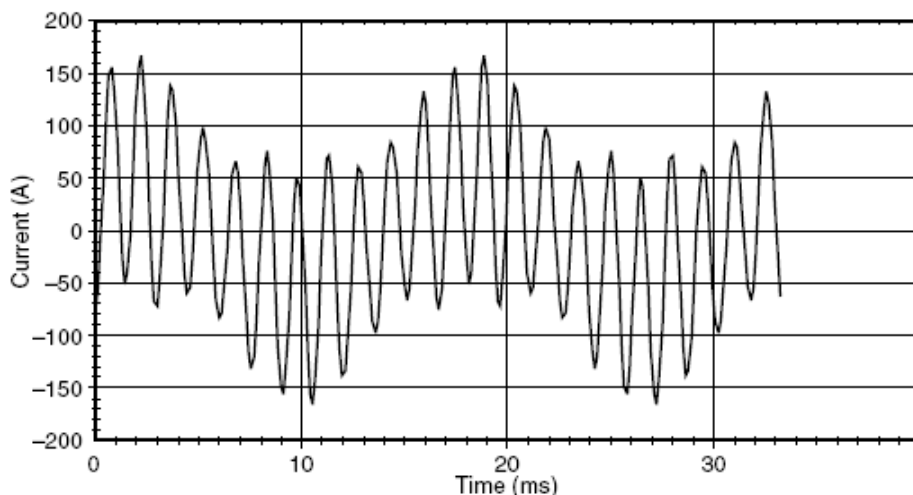
- Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας άρα την πληρωμή υψηλότερων λογαριασμών
- Αδικαιολόγητα σταματήματα στην παραγωγή – χαμένοι χρόνοι – πρόσθετο κόστος
- Ταχύτερη φθορά του εξοπλισμού η οποία έχει ως αποτέλεσμα επιπρόσθετες επενδύσεις
- Υψηλότερο κόστος συντήρησης και επισκευών
- Μειωμένη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος ή της παρεχόμενης υπηρεσίας.

## 2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από τα μη γραμμικά φορτία κυκλοφορούν στο σύστημα ισχύος και επιδρούν δυσμενώς σε ευρείας κλίμακος στοιχείων του συστήματος όπως στους πυκνωτές , τους μετασχηματιστές και τους κινητήρες , προκαλώντας υπερθέρμανση , υπερφόρτωση και επιπρόσθετες απώλειες (24).

### 2.5.1 Επίδραση στους πυκνωτές

Αν και οι πυκνωτές δεν παράγουν αρμονικές μπορούν εντούτοις σε συνδυασμό με μια αυτεπαγωγή του συστήματος να συντονισθούν και τότε τα αρμονικά ρεύματα που διέρχονται από τον πυκνωτή να ενισχυθούν και να ξεπεράσουν την ονομαστική τιμή των ρευμάτων που αντέχει ο πυκνωτής. Το σχήμα 3-1 δείχνει την κυματομορφή ρεύματος μιας συστοιχίας πυκνωτών εν συντονισμό με το σύστημα στην 11η αρμονική (θεμελιώδη αρμονική στα 60Hz).



Σχήμα 11 Κυματομορφή ρεύματος συστοιχίας πυκνωτών εν συντονισμό με το σύστημα.

Πέρα από το φαινόμενο του συντονισμού, η χωρητική αντίδραση των πυκνωτών στις υψηλές αρμονικές συχνότητες λαμβάνει χαμηλές τιμές με αποτέλεσμα οι πυκνωτές να υπερθερμαίνονται και να δέχονται διηλεκτρικές καταπονήσεις, οι οποίες μειώνουν την διάρκεια ζωής των πυκνωτών (25)

### 2.5.2 Επίδραση των αρμονικών στους μετασχηματιστές

Η ύπαρξη αρμονικών ρευμάτων προκαλεί επιπλέον απώλειες στους μετασχηματιστές και μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση και καταστροφή αυτών. Οι απώλειες ισχύος σε ένα μετασχηματιστή αποτελούνται από :

- Απώλειες χαλκού : Η ύπαρξη αρμονικών αυξάνει την ενεργό τιμή του ρεύματος που ρέει διαμέσου του Μ/Τ και μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή. Η αυξημένη τιμή του ρεύματος προκαλεί αυξημένες θερμικές απώλειες στα τυλίγματα του Μ/Τ.
- Απώλειες δινορευμάτων : Τα δινορεύματα είναι επαγόμενα ρεύματα στο Μ/Τ που προκαλούνται από τις μαγνητικές ροές. Αυτά τα επαγόμενα ρεύματα κυκλοφορούν στα τυλίγματα και τον πυρήνα του Μ/Τ και προκαλούν επιπρόσθετες θερμικές απώλειες. Οι



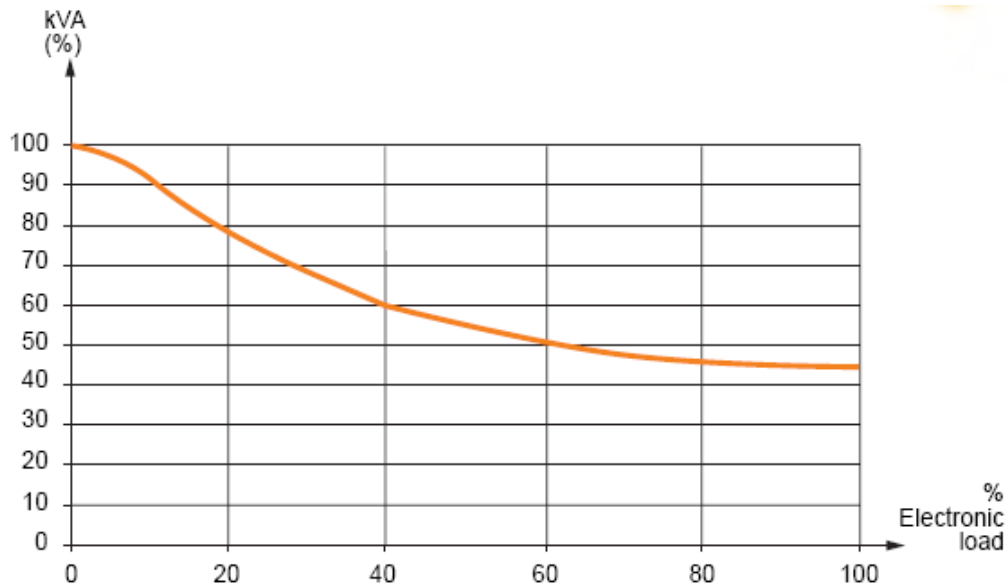
απώλειες αυτές αυξάνονται με το τετράγωνο της συχνότητας του ρεύματος που προκαλεί τα δινορεύματα.

- Απώλειες υστέρησης : Οι απώλειες αυτές προκαλούνται από τις αρμονικές της τάσης , αυξάνουν τις απώλειες σιδήρου του M/T και είναι ανάλογες της συχνότητας της μαγνητικής ροής.

Το standard UTE C15-112 δίνει τον συντελεστή υποδιαστασολόγησης του M/T K συναρτήσει των αρμονικών του ρεύματος

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right)}} \quad (2-1)$$

Π.χ για ένα μετατροπέα ισχύος με THD<sub>I</sub> = 50% έχουμε K = 0,8.



Σχήμα 12 Απαιτούμενη υποδιαστασολόγηση M/T που τροφοδοτεί ηλεκτρονικά φορτία ( πηγή : Schneider electric )

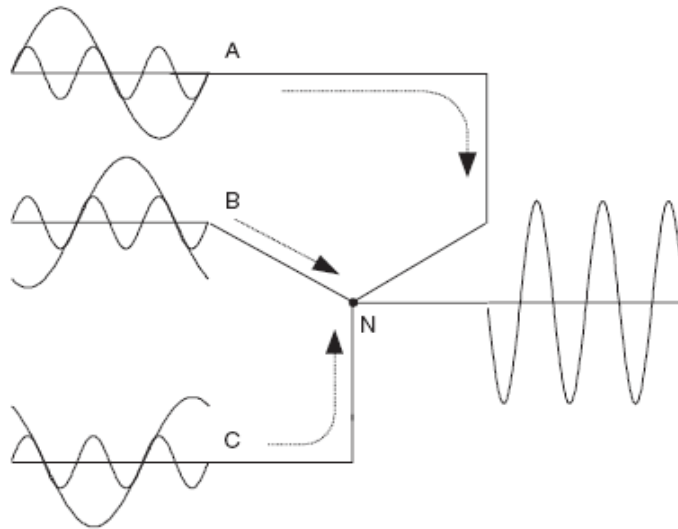
Εξαιτίας της ύπαρξης μη γραμμικών φορτίων οι κατασκευαστές M/T σχεδιάζουν ειδικούς M/T οι οποίοι καλούνται ‘K-factor rated’ με την δυνατότητα τροφοδότησης φορτίων συγκεκριμένου επιπέδου αρμονικού περιεχομένου. Αυτοί οι M/T έχουν αγωγούς μεγαλύτερων διατομών στα τυλίγματα τους και λεπτότερα ελάσματα σιδήρου , χαμηλών απωλειών στον πυρήνα τους για να μειώσουν τις απώλειες τους.

Ένας M/T τύπου K-1 δύναται να παρέχει το ονομαστικό του ρεύμα σε γραμμικά μόνο φορτία. Όταν το φορτίο είναι μη γραμμικό τότε ο M/T παρέχει το ονομαστικό του ρεύμα με υπερθέρμανση. Ένας M/T τύπου K-9 σηματοδοτεί ότι αυτός ο M/T μπορεί να δώσει το ονομαστικό του ρεύμα σε τέτοια φορτία που αν εφαρμοζόντουσαν σε M/T τύπου K-1 θα προκαλούσαν αύξηση απωλειών δινορευμάτων κατά ένα συντελεστή .Ο συντελεστής K ενός φορτίου μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο (26)

$$K = \sum h^2 \left( \frac{I_{h,rms}}{I_{ολικό,rms}} \right)^2 \quad (2-2)$$

### 2.5.3 Επίδραση των αρμονικών στους αγωγούς ουδέτερου των τριφασικών συστημάτων

Οι τριπλές αρμονικές προκαλούν υπερφόρτωση στον ουδέτερο αγωγό των τριφασικών κατά αστέρα συνδεδεμένων συστημάτων όπως αυτές του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 13 Υπερφόρτωση του αγωγού ουδέτερου από ρεύματα τριπλών αρμονικών

Όταν όμοια γραμμικά φορτία τοποθετούνται σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις, τότε τα φασικά ρεύματα στο σημείο N έχουν άθροισμα μηδέν και ο ουδέτερος δεν διαρρέεται από ρεύμα. Ακόμη όταν μη ισοσταθμισμένα γραμμικά φορτία εφαρμοσθούν στο σύστημα το ρεύμα του ουδέτερου δεν μπορεί να ξεπεράσει το maximum των τριών φασικών ρευμάτων.

Όταν όμως μη γραμμικά φορτία εφαρμοσθούν στο σύστημα τότε θα υπάρξουν αρμονικά ρεύματα σε κάθε φάση. Για ένα ισοσταθμισμένο σύστημα οι θεμελιώδεις συνιστώσες και όλες οι θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνιστώσες αρμονικών θα αθροιστούν στο σημείο N, με αλγεβρικό άθροισμα μηδέν. Αν υπάρχουν τριπλές αρμονικές συνιστώσες αυτές θα βρεθούν συμφασικές στο σημείο N, θα αθροιστούν και το ρεύμα του ουδέτερου θα ξεπερνάει τα φασικά ρεύματα. Επειδή ο ουδέτερος αγωγός δεν ασφαρίζεται, αυτά τα ρεύματα μπορεί να υπερθερμάνουν και να καταστρέψουν τον αγωγό αυτό (26).

$$I_{N,rms} = 3 \cdot \sqrt{(I_{3,rms}^2 + I_{6,rms}^2 + I_{9,rms}^2 + \dots)} \quad (2-3)$$

Σε περιπτώσεις , όπως αυτές των τυπικών εμπορικών εγκαταστάσεων όπου υπάρχουν πλήθος μη γραμμικών φορτίων όπως τα παλμοτροφοδοτικά των υπολογιστών, πρέπει ο κάθε αγωγός φάσης να συνοδεύεται από τον δικό του αγωγό ουδέτερου ή από κοινά χρησιμοποιούμενο ουδέτερο αγωγό που έχει διαστασολογηθεί ανάλογα.

#### 2.5.4 Επίδραση των αρμονικών στις απώλειες των αγωγών

Οι υψηλής τάξεως αρμονικές συνιστώσες προκαλούν επιπρόσθετες  $I^2R$  απώλειες θερμότητας στους αγωγούς που ρέουν , επειδή η αντίσταση του αγωγού αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας , ως αποτέλεσμα του επιδερμικού φαινομένου. Σύμφωνα με το επιδερμικό φαινόμενο καθώς η συχνότητα του ρεύματος αυξάνει τότε το ρεύμα δεν ισομοιράζεται σε όλη την διατομή του αγωγού αλλά παρουσιάζει υψηλότερη πυκνότητα στην εξωτερική πλευρά του αγωγού. Έτσι ένας αγωγός μπορεί να μεταφέρει ρεύμα εντός των ορίων της ονομαστικής του τιμής αλλά παρόλα αυτά να υπερθερμαίνεται. Συνεπώς κάθε αγωγός που φέρει αρμονικά ρεύματα θα έχει αυξημένες απώλειες και η απόδοση του συστήματος που ανήκει θα είναι υποβαθμισμένη.

#### 2.5.5 Επίδραση των αρμονικών στους κινητήρες

Αν κάποιος κινητήρας τροφοδοτείται από τάση που περιέχει αρμονικές , τότε αυτές θα δημιουργήσουν αρμονικές ροών εντός του κινητήρα. Αυτές παρόλο που δεν θα επηρεάσουν σημαντικά τη ροπή του κινητήρα θα επάγουν υψίσυχνα ρεύματα στο ρότορα και θα έχουν τις ίδιες συνέπειες με αυτές των αρνητικής ακολουθίας ρευμάτων στην θεμελιώδη συχνότητα, όπως μειωμένη απόδοση , υπερθέρμανση και υψηλής συχνότητας θόρυβοι. Το standard IEC 60892 ορίζει τον παράγοντα αρμονικών τάσης (Harmonic Voltage Factor) και την μέγιστη τιμή που πρέπει αυτός να λαμβάνει για την σωστή λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών.

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h}{h^2}} \leq 0.02 \quad (2-4)$$

Πρακτικά , η τάση τροφοδοσίας ενός τέτοιου κινητήρα πρέπει να έχει maximum τιμή  $THD_V=10\%$ .

### 2.5.6 Επίδραση των αρμονικών στον συντελεστή ισχύος του συστήματος ισχύος

Σε ένα σύστημα με μη γραμμικά φορτία τα οποία προκαλούν αρμονικές τα ρεύματα και οι τάσεις σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μπορούν να αναπαρασταθούν με σειρές Fourier:

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(k\omega_0 t + \delta_k) \quad (2-5)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2-6)$$

Η rms τιμές αυτών μπορεί να δειχθεί ότι είναι

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{k,rms}^2} \quad (2-7)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,rms}^2} \quad (2-8)$$

Η μέση ισχύς δίνεται από τον τύπο

$$P_{avg} = \sum_{k=1}^{\infty} V_{krms} \cdot I_{krms} \cdot \cos(\delta_k - \theta_k) = P_{1avg} + P_{2avg} + P_{3avg} + \dots \quad (2-9)$$

Βλέπουμε ότι η κάθε αρμονική συνεισφέρει στην μέση ισχύ με κάποιο ποσοστό.

Πολλές φορές το επίπεδο των αρμονικών εκφράζεται με την ολική αρμονική παραμόρφωση, η οποία είναι ο λόγος της rms τιμής των αρμονικών πάνω από την θεμελιώδη προς την rms τιμή της θεμελιώδους επί τοις εκατό.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{k,rms}^2}}{V_{1rms}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (2-10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,rms}^2}}{I_{1rms}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (2-11)$$

Εάν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (3-10), (3-11) στις (3-7), (3-8) αντίστοιχα παίρνουμε

$$V_{RMS} = V_{1rms} \cdot \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \quad (2-12)$$

$$I_{RMS} = I_{1rms} \cdot \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2} \quad (2-13)$$

$$\text{Και επειδή } pf_{true} = \frac{P_{avg}}{S} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \text{ έχουμε}$$

$$pf_{true} = \frac{P_{avg}}{S} = \frac{P_{avg}}{V_{1rms} \cdot I_{1rms} \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \cdot \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (2-14)$$

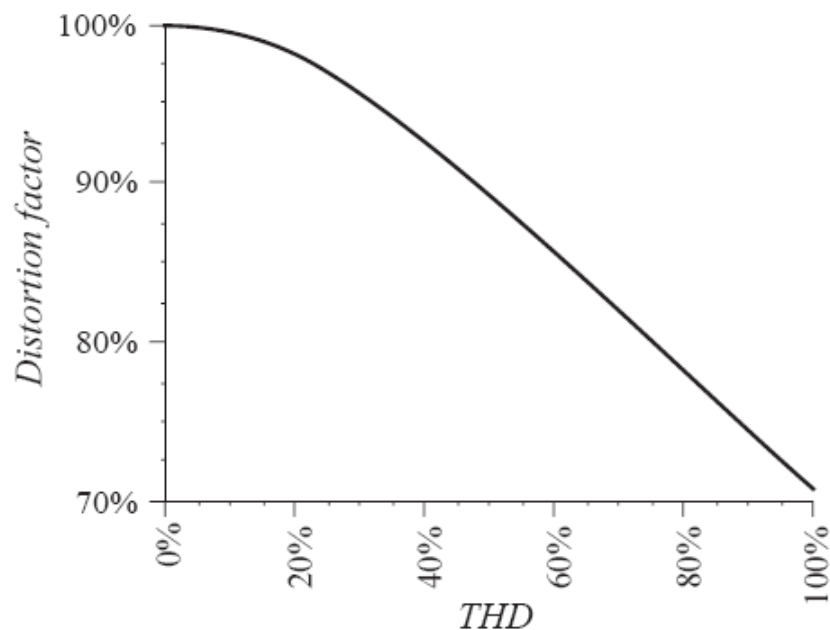
Επειδή η συνεισφορά των αρμονικών πάνω από τη θεμελιώδη στην μέση ισχύ είναι μικρή έχουμε  $P_{avg} = P_{1avg}$ , και επειδή συνήθως η  $THD_V$  είναι μικρότερη από 10% τότε έχουμε  $V_{rms} = V_{1rms}$ . Έτσι ο συντελεστής ισχύος γίνεται :

$$pf_{true} = \frac{P_{avg1}}{V_{1rms} \cdot I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} = pf_{disp} \cdot pf_{dist} \quad (2-15)$$

Και επειδή ο συντελεστής εκτόπισης  $pf_{disp}$  δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την μονάδα, τότε ο πραγματικός συντελεστής ισχύος έχει άνω όριο που δίνεται από τον τύπο

$$pf_{true} \leq pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (2-16)$$

Η παραπάνω εξίσωση η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3-4 μας δείχνει πόσο πολύ επηρεάζεται ο συντελεστής ισχύος όταν τα φορτία που τροφοδοτούνται είναι μη γραμμικά και παράγουν αρμονικές (28)



Σχήμα 14 Μεταβολή του συντελεστή παραμόρφωσης συναρτήσει της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης

Σε περιπτώσεις φορτίων όπως τα μονοφασικά φορτία γραφείων, υπολογιστές κλπ όπου η ολική αρμονική παραμόρφωση προσεγγίζει τιμές της τάξεως των 100%, ο πραγματικός συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος από 0,707. Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος μπορεί να διορθωθεί μόνο με φίλτρα αρμονικών, εν αντιθέσει με τον συντελεστή εκτόπισης που απλώς διορθώνεται με την απλή προσθήκη κάποιων πυκνωτών

## 2.6 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΟΙ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

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.

Ένας πιο συνήθης 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 (κίνδυνος υπερφόρτισης, 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 μία περισσότερο ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος (μειωμένη εκπομπή), αλλά επίσης αυξημένη ατρωσία σε παραμορφώσεις της τάσης (29).

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 την φτηνότερη λύση.

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).

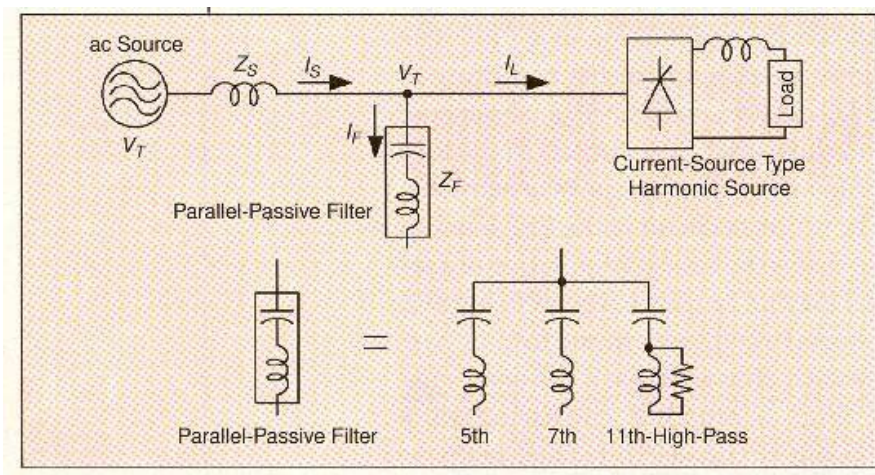
Η διαφοροποίηση πηγάζει από τον στόχο των κειμένων: τα πρότυπα της IEEE στοχεύουν στην κανονικοποίηση της σύνδεσης μεγάλων εργοστασιακών καταναλωτών, ενώ τα πρότυπα της IEC αναφέρονται κυρίως σε μικρούς καταναλωτές που δεν έχουν δυνατότητα επιλογής μεθόδων αντιμετώπισης των προβλημάτων. Στην επόμενη παράγραφο θα μελετηθούν εκτενέστερα τα φίλτρα απόσβεσης των αρμονικών, τα οποία αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τρόπο επίλυσης του προβλήματος.

## 2.7 ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

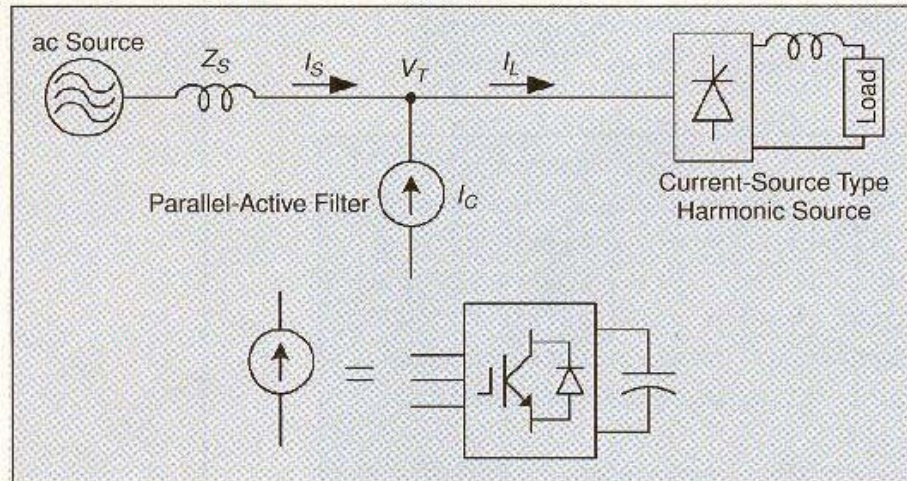
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αντιμετώπιση του προβλήματος των αρμονικών ρεύματος γίνεται με την εγκατάσταση κατάλληλων φίλτρων. Η επιλογή του τύπου του φίλτρου, του μεγέθους του και της συνδεσμολογίας, γίνεται μετά από μετρήσεις αρμονικών ρεύματος και τάσης στα διάφορα φορτία της εγκατάστασης. Επιπλέον απαιτούνται 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. Η επίλυση του προβλήματος των αρμονικών καθορίζεται από το εάν είναι επιθυμητά ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω (30)

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

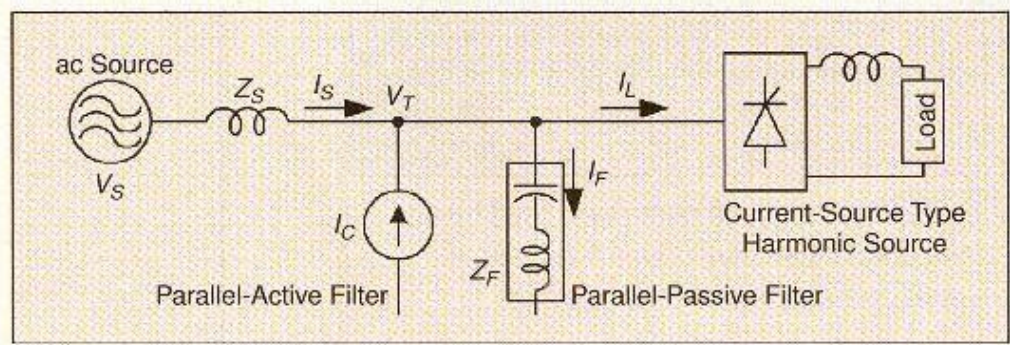
Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν ορισμένες από τις πιθανές λύσεις



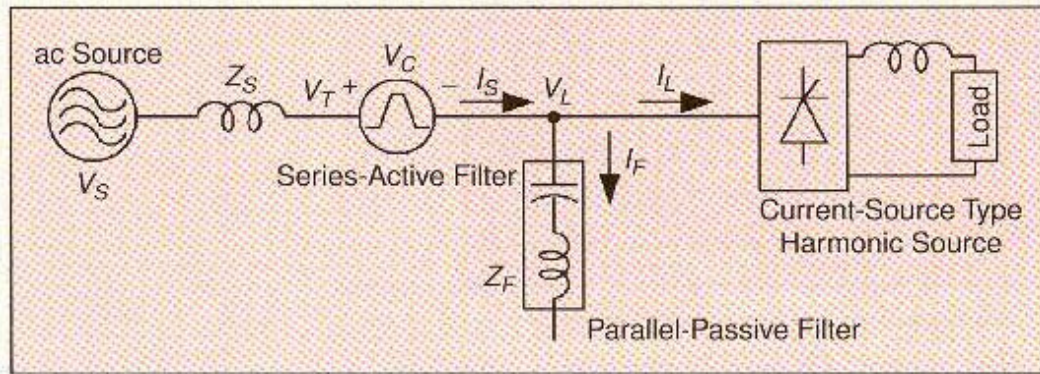
Σχήμα 15 Παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $F$  τα στοιχεία του φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.



Σχήμα 16 Ενεργό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $C$  τα στοιχεία του φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.



Σχήμα 17 Ενεργό και παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $C$  τα στοιχεία του ενεργού,  $F$  του παθητικού φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.

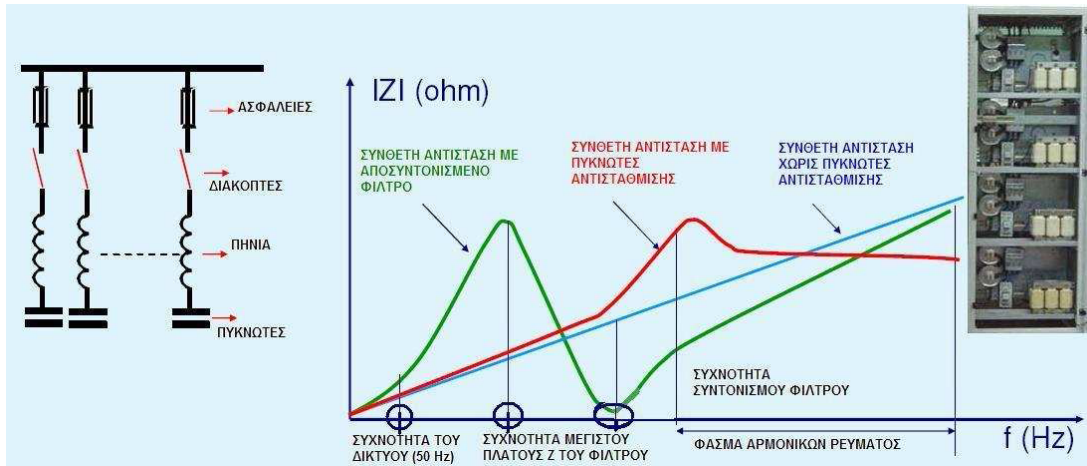


Σχήμα 18 Ενεργό εν σειρά και παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $C$  τα στοιχεία του ενεργού,  $F$  του παθητικού φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.

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 διαστασιολογημένων, ώστε να συντονίζονται (να ελαχιστοποιούν τη σύνθετη αντίδρασή 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.

Τα αποσυντονισμένα φίλτρα είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν ρεύματα σε συχνότητες κοντινές σε αυτές των ρευμάτων αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Ο λόγος που σχεδιάζονται κατ'αυτόν τον τρόπο είναι για να μπορούν να αποκόπτουν ένα εύρος ρευμάτων αρμονικών (στην περιοχή των συχνοτήτων που ενδιαφέρει), περιορίζοντας ταυτόχρονα περισσότερες από μία αρμονικές και μειώνοντας συγχρόνως την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD-I %). Είναι φίλτρα που απαιτούν ιδιαίτερη τεχνογνωσία κατά το σχεδιασμό τους, καθώς δε συντονίζονται απόλυτα στις αρμονικές που εμφανίζονται στο εκάστοτε δίκτυο κι έτσι δεν παρουσιάζεται κίνδυνος εμφάνισης πολύ υψηλών ρευμάτων στους βρόχους που συνδέονται (31).

Ο τρόπος με τον οποίο τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν τις αρμονικές του δικτύου φαίνεται καλύτερα και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 19) συσχέτισμού της σύνθετης αντίστασης ενός κλάδου και της συχνότητας του ρεύματος το οποίο τον διαρρέει.

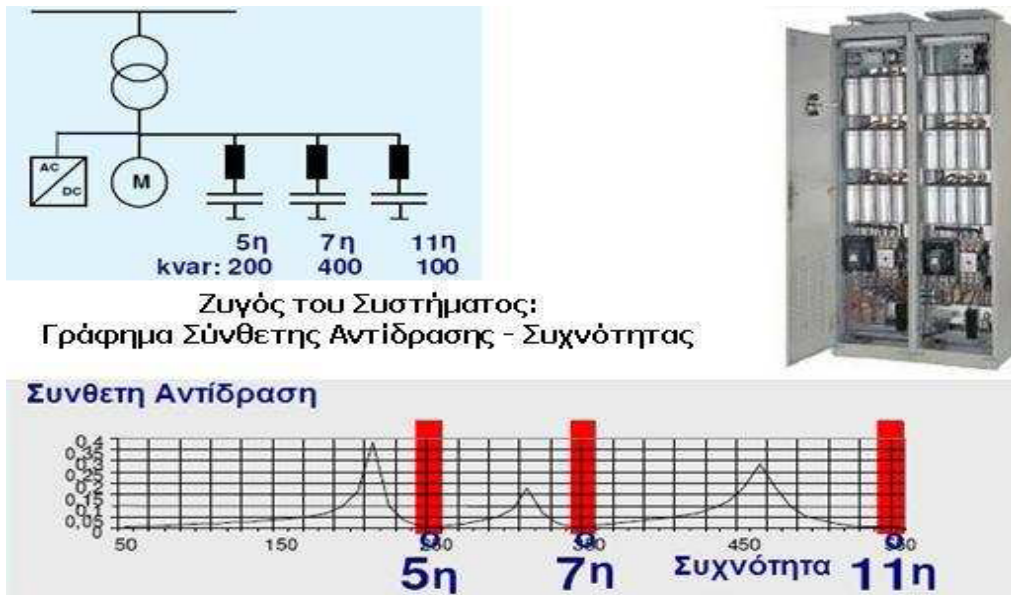


Σχήμα 19 Σχηματική απεικόνιση ενός αποσυντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του.

Στο πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης του κλάδου ενός αποσυντονισμένου φίλτρου σε σχέση με αυτήν που θα είχε ο κλάδος αυτός αν δεν υπήρχε το φίλτρο. Στην περίπτωση λοιπόν που τοποθετείται αποσυντονισμένο φίλτρο σε κάποιο σημείο του δικτύου, αυτό εμφανίζει μία πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού του, με αποτέλεσμα τα ρεύματα τόσο σε αυτήν όσο και σε κοντινές συχνότητες στη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου να διέρχονται όλα από τον εν λόγω κλάδο (αποκοπή). Έτσι τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν ένα εύρος αρμονικών ρευμάτων και όχι μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος.

Μειονέκτημά τους όμως είναι ότι έτσι δεν μπορούν να φιλτράρουν το 100% της αρμονικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να παραμένουν έπειτα και κάποιες αρμονικές στο δίκτυο.

Τα συντονισμένα 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 μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος. Αυτό φαίνεται αναλυτικά και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 20).

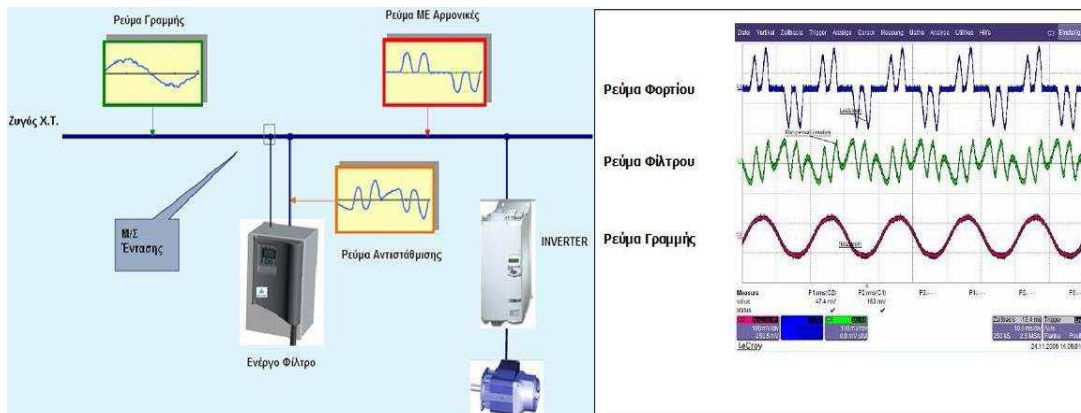


Σχήμα 20 Σχηματική απεικόνιση ενός συντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του.

Με τα συντονισμένα φίλτρα αποκοπής αρμονικών επιτυγχάνεται άριστη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο καθώς αποκόπτουν ακριβώς τις αρμονικές (5η, 7η, 11η...). Οι συχνότητες συντονισμού των συντονισμένων φίλτρων βρίσκονται πάρα πολύ κοντά (σχεδόν ακριβώς) στις αντίστοιχες συχνότητες των αρμονικών ρευμάτων που αποκόπτουν.

Αποτέλεσμα αυτού είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων να είναι υπερβολικά μικρές και έτσι να δημιουργούνται υψηλά ρεύματα αρμονικών που οδηγούν τις πυκνωτικές διατάξεις του φίλτρου σε μεγάλη καταπόνηση. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αντισταθμίζουν εύκολα την άεργο ισχύ σε δυναμικά φορτία και ενέχουν τον κίνδυνο απορρόφησης αρμονικών ρευμάτων από τη μεριά της υψηλής τάσης του μετασχηματιστή

ισχύος, τα καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικά στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και τελικά την εγκατάστασή τους στη βιομηχανία. Παράλληλα, βασικά τους πλεονεκτήματα αποτελούν η άριστη αποκοπή των αρμονικών του δικτύου, σε ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό που πετυχαίνεται με τα αποσυντονισμένα φίλτρα, καθώς και το γεγονός ότι παράλληλα με τον καθαρισμό των αρμονικών αντισταθμίζουν και την άεργο ισχύ του δικτύου (32). Τα ενεργά φίλτρα είναι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που παράγουν και διοχετεύουν στο δίκτυο το αντίθετο ρεύμα αρμονικών από αυτό που δημιουργούν οι πηγές αρμονικών του δικτύου. Σχηματικά αυτό φαίνεται στην εικόνα (Σχήμα 21) που ακολουθεί.



Σχήμα 21 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου.

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ο μη αντισταθμισμένος συντελεστής ισχύος είναι κοντά στη μονάδα και επομένως δεν απαιτείται τόσο αντιστάθμιση αέργου όσο μείωση της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD %). Είναι ιδιαίτερα ακριβές λύσεις και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ισχύουν αρκετές ή όλες από τις παρακάτω συνθήκες σε μια εγκατάσταση:

- Υπάρχει μεγάλο περιεχόμενο σε μη γραμμικά φορτία
- Οι απαιτήσεις για καλή ποιότητα τάσης και ρεύματος είναι ιδιαίτερα αυξημένες (THD V % < 3)
- Υπάρχει δυναμική μεταβολή της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης
- Υπάρχουν ταχέως μεταβαλλόμενα μη γραμμικά φορτία (π.χ. νοσοκομεία, ακτίνες X)

- Υπάρχει ευαίσθητος ηλεκτρονικός εξοπλισμός

Το βασικότερο πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων είναι ότι πετυχαίνουν ολοκληρωτική αποκοπή των αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο μειώνοντας σχεδόν 100% την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση. Επιπλέον, είναι εύκολα στην εγκατάσταση αφού δεν πιάνουν ιδιαίτερο χώρο. Ακόμη δεν υπερφορτίζονται, ενώ η δυναμική αλλαγή στην Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του δικτύου δεν επηρεάζει τη λειτουργία τους, αφού παράγουν και διοχετεύουν στο δίκτυο το αντίθετο ρεύμα από αυτό των αρμονικών την κάθε χρονική στιγμή.

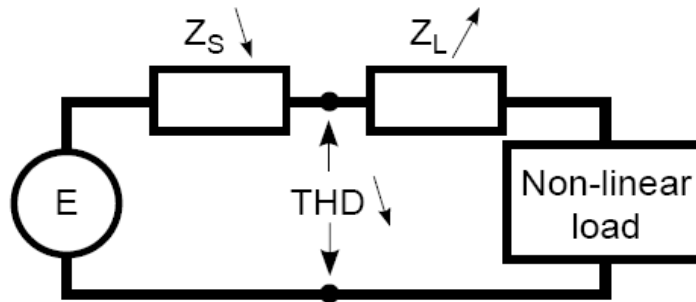
Το μεγαλύτερο τους μειονέκτημα αποτελεί το κόστος τους, το οποίο δεδομένου του γεγονότος ότι δεν αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ, είναι κατά πολύ αυξημένο σε σχέση με τη λύση ενός παθητικού φίλτρου, το οποίο πετυχαίνει και βελτίωση του συντελεστή ισχύος στο δίκτυο που τοποθετείται.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

### 3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

- Μείωση των παραγομένων από το φορτίο αρμονικών ρευμάτων Στην επιλογή του βιομηχανικού εξοπλισμού πρέπει να προτιμούμε διατάξεις με όσον το δυνατό μικρότερη αρμονική παραμόρφωση. Παρόλα αυτά στις είδη επιλεγμένες διατάξεις και ιδιαίτερα σε κάποιους μετατροπείς ισχύος η εν σειρά παρεμβολή κάποιας αυτεπαγωγής εξομάλυνσης του ρεύματος συνεισφέρει στην μείωση των αρμονικών ρευμάτων που εισέρχονται στο σύστημα ισχύος. Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι ότι η αρμονική παραμόρφωση στα άκρα του μη γραμμικού φορτίου αυξάνεται
- Μείωση της αρμονικής εμπέδησης της πηγής του συστήματος Μειώνοντας την αντίδραση  $Z_s$  τότε η συνολική αρμονική παραμόρφωση που εισέρχεται στο σύστημα μειώνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί δια της τροφοδότησης του μη γραμμικού φορτίου με παράλληλα συνδεδεμένα μικρότερης διατομής καλώδια αντί ενός μεγαλύτερης διατομής.

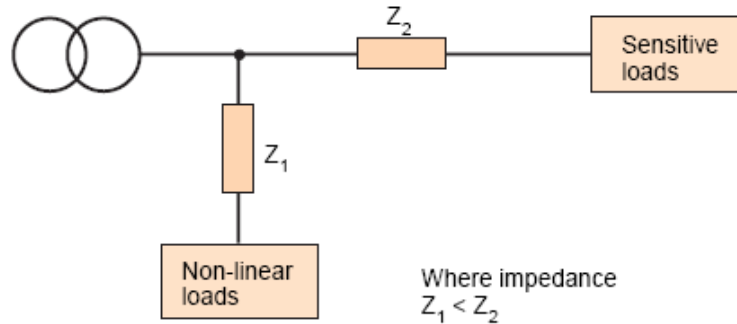


Σχήμα 22 Καταστολή αρμονικών με μείωση της συνθέτου αναστάσεως  $Z_s$ .

- Τροποποίηση της εγκατάστασης Οι παρακάτω λύσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κυρίως κατά την μελέτη και φάση σχεδίασης της βιομηχανικής εγκατάστασης.

1) Τοποθέτηση των μη γραμμικών φορτίων όσο τον δυνατό πιο κοντά στην πηγή

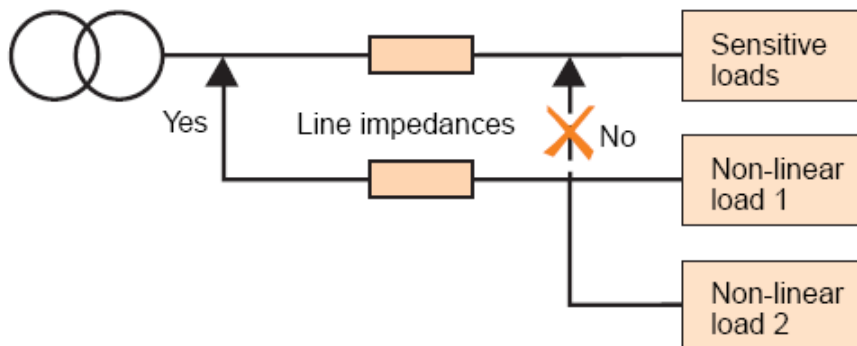
Οι ολικές αρμονικές διαταραχές που προκαλούνται στο σύστημα αυξάνονται καθώς η ισχύς βραχυκυκλώσεως μειώνεται.(17)



Σχήμα 23 Τοποθέτηση των μη γραμμικών φορτίων πλησίον της πηγής.

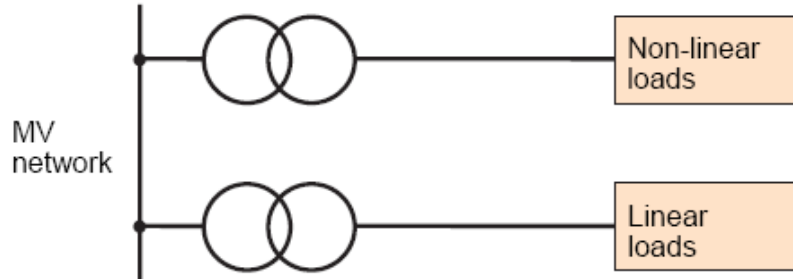
2) Ομαδοποίηση των μη γραμμικών φορτίων.

Τα μη γραμμικά φορτία πρέπει να τροφοδοτούνται ξεχωριστά από τα ευαίσθητα γραμμικά φορτία. Αυτό επιτυγχάνεται δια της τροφοδότησης αυτών μέσω ξεχωριστών ζυγών και καλωδίων.



Σχήμα 24 Ομαδοποίηση των μη γραμμικών φορτίων

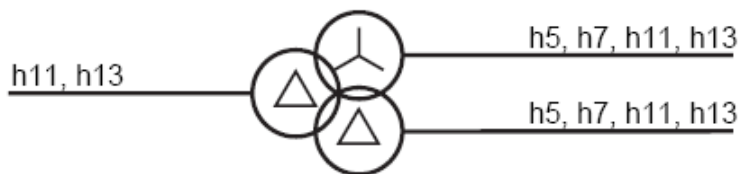
- Δημιουργία ξεχωριστών πηγών Η λύση αυτή απαιτεί την τροφοδότηση των μη γραμμικών φορτίων από ξεχωριστούς μετασχηματιστές. Το μειονέκτημα της είναι το αυξημένο κόστος της εγκατάστασης.



Σχήμα 25 Τροφοδότηση μέσω ανεξαρτήτων πηγών.

- Μετασχηματιστές με ειδικές συνδεσμολογίες

Διάφορες συνδεσμολογίες μετασχηματιστών μπορούν να καταστείλουν συγκεκριμένες τάξεις αρμονικών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μια ΔΥΔ (τριγώνου-αστέρα-τριγώνου) συνδεσμολογία καταστέλλει την 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> αρμονική. Μια ΔΥ (τριγώνου-αστέρα) συνδεσμολογία καταστέλλει την 3<sup>η</sup> αρμονική.



Σχήμα 26 Συνδεσμολογία ΔΥΔ (τριγώνου-αστέρα-τριγώνου)

### 3.2 ΦΙΛΤΡΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

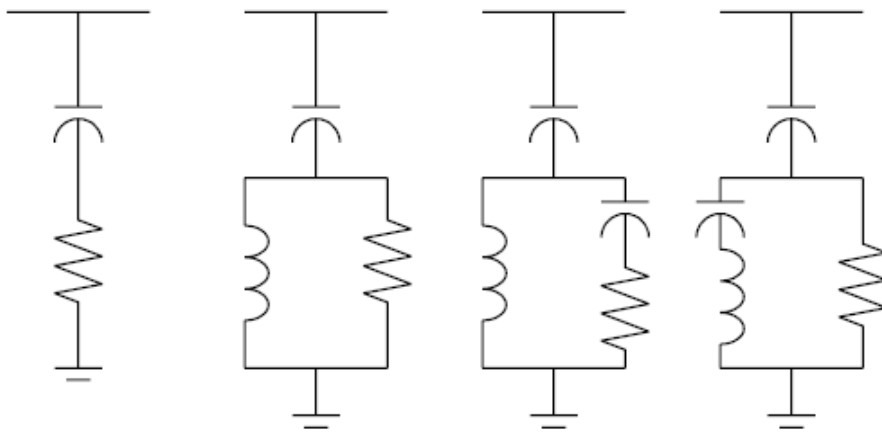
Γενικώς τα φίλτρα αρμονικών είναι φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας επειδή συνδέονται παράλληλα με το σύστημα ισχύος και σχηματίζουν κλάδους χαμηλής αντίστασης προς την γή για ένα ή περισσότερα ρεύματα αρμονικών. Στα συστήματα ισχύος τα εν

παραλλήλω συνδεσμολογημένα φίλτρα είναι πιο οικονομικά και πιο πρακτικά από τα εν σειρά συνδεσμολογημένα για τους ακόλουθους λόγους (33):

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

Τα εν παραλλήλω φίλτρα εμπίπτουν 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.



Σχήμα 27 Παθητικά φίλτρα αρμονικών

Τα μονό και διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα χρησιμοποιούνται συνήθως για να φιλτράρουν συγκεκριμένες συχνότητες , ενώ τα αποσβενόμενα φίλτρα χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα ευρείας κλίμακος συχνοτήτων. Σε φορτία που παράγουν μικρή ποσότητα αρμονικών, συχνά χρησιμοποιείται ένα μονοσυντονιζόμενο φίλτρο που συνήθως είναι συντονισμένο στην 5η αρμονική. Σε μεγαλύτερες εφαρμογές όπως αυτές των κλιβάνων τόξου χρησιμοποιούνται παράλληλα μονοσυντονιζόμενα και αποσβενόμενα φίλτρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα μονοσυντονιζόμενα φίλτρα συντονίζονται ελαφρώς χαμηλότερα ( 5%) από την συχνότητα της αρμονικής που θα αποκόψουν για τους ακόλουθους λόγους (15):

- Αν συντονισθούν ακριβώς στην συχνότητα της αρμονικής τότε θα υπερφορτωθούν γιατί θα γειώνουν πέρα από τις αρμονικές του φορτίου και αυτές του συστήματος.
- Επειδή οι πυκνωτές έχουν αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή , εν λειτουργία θερμαίνονται , μειώνεται η χωρητικότητα τους και άρα αυξάνει η συχνότητα που συντονίζονται.

Τα αποσβενόμενα φίλτρα ελέγχουν υψηλής τάξεως ομάδες αρμονικών και συνήθως συντονίζονται στα ζευγάρια των αρμονικών 11η,13η και 17η ,19η. Επειδή τα φίλτρα αυτά παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση από τα μονοσυντονιζόμενα και διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για να φιλτράρουν αρμονικές που βρίσκονται κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα ισχύος , έτσι ώστε να έχουν χαμηλές απώλειες ισχύος. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το C-τύπου φίλτρο όπως θα δούμε παρακάτω (22).

### **3.3 ΜΟΝΟΣΥΝΤΟΝΙΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ**

Τα φίλτρα αυτά είναι τα πιο οικονομικά αφού αποτελούνται από δύο μόλις στοιχεία, έναν πυκνωτή και μια αυτεπαγωγή και συνήθως επαρκούν σε τυπικές εφαρμογές. Τα μονοσυντονιζόμενα φίλτρα συντονίζονται εν σειρά και τοποθετούνται εν παραλλήλω στο

σύστημα παρέχοντας όπως προείπαμε μια χαμηλής αντίστασης διαδρομή προς την γή των αρμονικών ρευμάτων. Έτσι τα αρμονικά ρεύματα εκτρέπονται από την φυσιολογική τους ροή και δεν εισέρχονται στο σύστημα. Τα μονοσυντονιζόμενα φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος αφού ο πυκνωτής του φίλτρου LC μπορεί να είναι ο πυκνωτής διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Γενικά στα μονοσυντονιζόμενα ισχύουν οι ακόλουθοι τύποι :

$$\text{Αρμονική συντονισμού } n = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (3-1)$$

$$\text{Συντελεστής ποιότητας } Q = \frac{n \cdot X_L}{R} = \frac{X_c}{n \cdot R} \quad (3-2)$$

$$\text{Εύρος (Bandwidth) } B = \frac{f_n}{Q} \quad (3-3)$$

Άεργος ισχύς στην θεμελιώδη συχνότητα  $f_1$

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad (3-4)$$

Ενεργός ισχύς ( απώλειες του φίλτρου ) στην θεμελιώδη συχνότητα  $f_1$

$$P_{loss} = Q_c \frac{n}{(n^2 - 1)} \cdot \frac{1}{Q} \quad (3-5)$$

Όπου

$f_1$  = θεμελιώδη συχνότητα

$f_n$  = συχνότητα συντονισμού

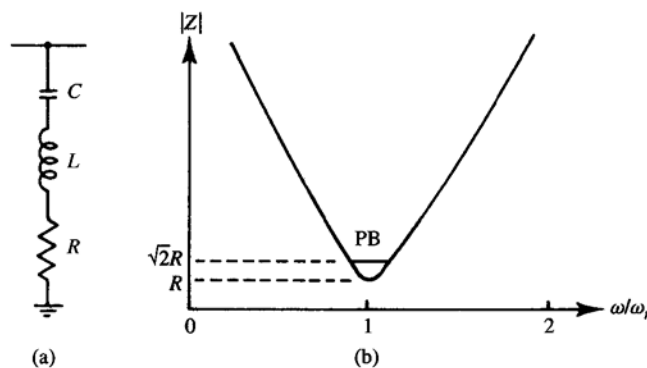
$\omega = 2\pi \cdot f_1$

$n$  = τάξη αρμονικής  $f_n/f_1$

$V$  = ονομαστική πολική τάση

$X_L = \omega \cdot L$  επαγωγική αντίδραση του πηνίου στην θεμελιώδη συχνότητα

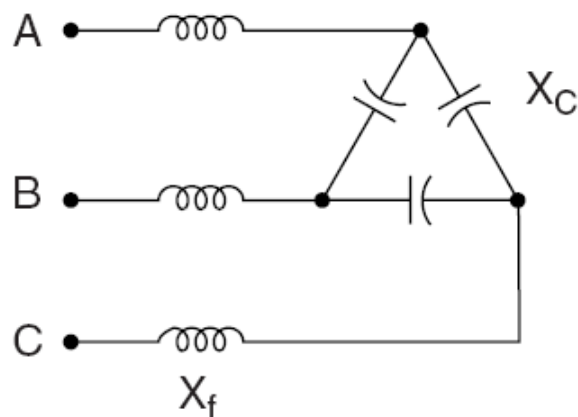
$X_C = 1/\omega \cdot C$  επαγωγική αντίδραση του πυκνωτή στην θεμελιώδη συχνότητα



Σχήμα 28 Κύκλωμα μονοσυντονιζόμενου φίλτρου (β) εμπέδηση συναρτήσεως της συχνότητας

Το παρακάτω σχήμα 29 απεικονίζει μια τράπεζα πυκνωτών που έχει μετατραπεί σε φίλτρο προσθέτοντας μια αυτεπαγωγή εν σειρά σε κάθε φάση. Σε αυτή την περίπτωση η αρμονική  $h$  που συντονίζεται το φίλτρο σχετίζεται με την θεμελιώδη (30)

$$\text{αρμονική σύμφωνα με τον τύπο } h = \sqrt{\frac{X_c}{3 \cdot X_f}} \quad (3-6)$$



Σχήμα 29 Μονοσυντονιζόμενο τριφασικό σύστημα διόρθωσης συντελεστή ισχύος και αποκοπής αρμονικών

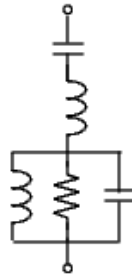
Ένα βασικό μειονέκτημα αυτού του είδους του φίλτρου είναι ότι εν συνδυασμό με την αυτεπαγωγή του συστήματος  $X_s$  συντονίζεται εν παραλλήλω σε μια συχνότητα συντονισμού πιο χαμηλά από την συχνότητα  $h$ . Αυτή η συχνότητα πρέπει να βρίσκεται μακριά από οποιαδήποτε παραγόμενη από το φορτίο αρμονική συχνότητα (11).

Συνήθως για να αποφύγουμε φαινόμενα ανεπιθύμητου συντονισμού τα φίλτρα αυτά προστίθενται στο σύστημα ξεκινώντας από την χαμηλότερη συχνότητα. Έτσι για παράδειγμα όταν εγκαθιστούμε φίλτρα για την 7η αρμονική συνήθως προαπαιτείτε ότι έχει εγκατασταθεί φίλτρο για την 5η αρμονική, διότι το φίλτρο της 7ης αρμονικής από μόνο του θα συντονισθεί πιθανώς με την βοήθεια του συστήματος στην 5η αρμονική.

Το φίλτρο της συνδεσμολογίας δεν επιτρέπει να φιλτραριστούν μηδενικής ακολουθίας ρεύματα επειδή οι πυκνωτές είναι συνδεσμολογημένοι σε διάταξη τριγώνου και επομένως το παραπάνω φίλτρο δεν είναι κατάλληλο για το φιλτράρισμα των μηδενικής ακολουθίας τριπλών αρμονικών.



### 3.4 ΔΙΠΛΟΣΥΝΤΟΝΙΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ ( DOUBLE TUNED)



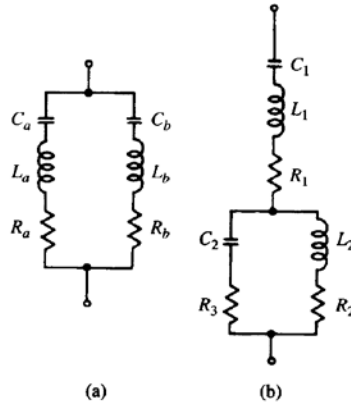
Σχήμα 30 Διπλοσυντονιζόμενο φίλτρο

Τα διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα συμπεριφέρονται βασικά ως δυο μονοσυντονιζόμενα φίλτρα , αλλά με το πλεονέκτημα χαμηλοτέρων απωλειών. Τα διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα αποτελούνται από ένα εν σειρά LC κύκλωμα και ένα εν παραλλήλω RLC κύκλωμα. Αν  $f_1$  και  $f_2$  είναι οι συχνότητες συντονισμού των δυο αυτών κυκλωμάτων ξεχωριστά τότε το συνδυασμένο προκύπτουν κύκλωμα συντονίζεται στην μέση γεωμετρική συχνότητα

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \cdot \quad (3-7)$$

Ο συντελεστής ποιότητας του διπλοσυντονιζόμενου φίλτρου είναι ο συντελεστής ποιότητας των εν παραλλήλω L και R στοιχείων στην συχνότητα  $f_m$ .

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L} = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot L} \quad (3-8)$$



Σχήμα 31 Μετασχηματισμός από (α) δύο μονοσυντονιζόμενα φίλτρα σε (β) ένα διπλοσυντονιζόμενο φίλτρο

$$C_1 = C_a + C_b \quad (3-9)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad (3-10)$$

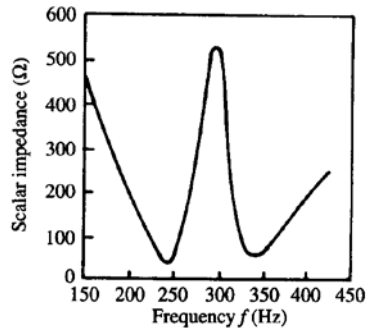
$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (3-11)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad (3-12)$$

$$R_2 = R_a \left[ \frac{a^2 (1-x^2)}{(1+ax^2)(1+x^2)} \right] + R_b \left[ \frac{(1-x^2)}{(1+ax^2)(1+x^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+x^2)(1+ax^2)} \right] \quad (3-13)$$

Στο διπλοσυντονιζόμενο φίλτρο οι απώλειες ισχύος στην θεμελιώδη συχνότητα είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές του μονοσυντονιζόμενου φίλτρου. Το κύριο πλεονέκτημα του

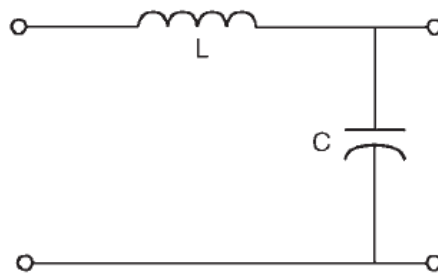
διπλοσυντονιζόμενου φίλτρου είναι στις εφαρμογές υψηλής τάσης εξαιτίας της μείωσης του αριθμού των πηνίων που υπόκεινται σε πλήρη τάση γραμμής (32).



Σχήμα 32 Η εμπέδηση συναρτήσει της συχνότητας σε ένα διπλοσυντονιζόμενο φίλτρο στην 5η και 7η αρμονική.

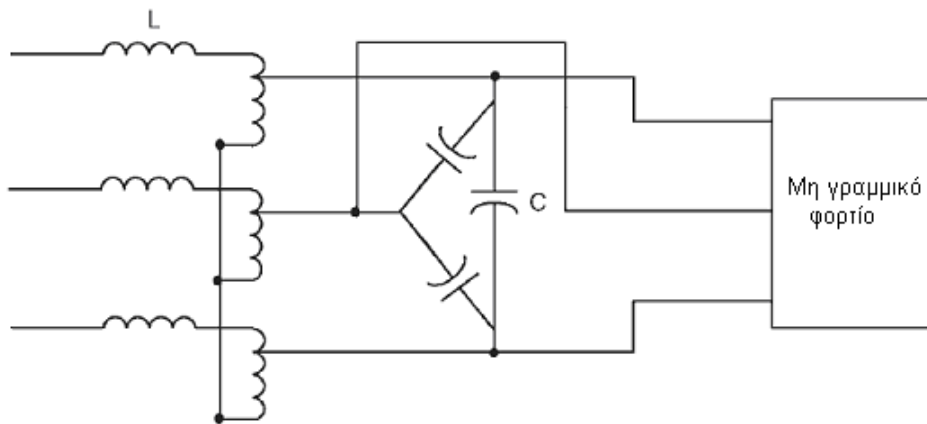
### 3.5 ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΑ ΦΙΛΤΡΑ

Σε πολλές εφαρμογές ισχύος δεν υπάρχουν μόνο μερικές συγκεκριμένες αρμονικές αλλά εμφανίζεται πλήθος αυτών αρκετά διεσπαρμένες. Έτσι για παράδειγμα ένας εξαπαλμικός μετατροπέας πέρα από τις κλασσικές 5η,7η,11η,13η κλπ αρμονικές μπορεί να παράγει μια ευρείας κλίμακος ενδοαρμονικές. Η απόρριψη όλων αυτών των αρμονικών με συντονιζόμενα φίλτρα είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία λόγω του πλήθους των αρμονικών. Τα βαθυπερατά φίλτρα προσφέρονται για το φιλτράρισμα πολλαπλών και διεσπαρμένων αρμονικών συχνοτήτων. Μια τυπική συνδεσμολογία ενός τέτοιου φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33 Βαθυπερατό φίλτρο απόρριψης αρμονικών

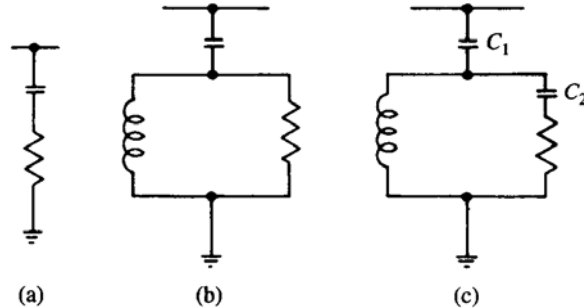
Ρεύματα αρμονικών με συχνότητα μεγαλύτερης της συχνότητας αποκοπής φίλτρου αποκόπτονται και δεν εισέρχονται στο σύστημα ισχύος. Τα στοιχεία του κυκλώματος LC πρέπει να προσδιορίζονται σε συνδυασμό με την αυτεπαγωγή του συστήματος. Επειδή η συχνότητα αποκοπής είναι αρκετά χαμηλή το μέγεθος του πυκνωτή C είναι αρκετά μεγάλο και αυτό συνήθως έχει ως παρενέργεια την αύξηση της τάσης στο σημείο αυτό. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ρυθμιστής τάσεως ή κάποια διάταξη αυτομετασχηματιστή. Μια τυπική διάταξη ενός βαθυπερατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 34



Σχήμα 34 Βαθυπερατό φίλτρο με διάταξη ρύθμισης της τάσης

Σε τυπικές εφαρμογές οδηγών ρυθμιζομένων στροφών η αρμονική παραμόρφωση ρεύματος μπορεί να μειωθεί από 90-100% χωρίς την χρήση φίλτρων σε 10-12% δια της χρήσης βαθυπερατών φίλτρων.

### 3.6 ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ



Σχήμα 35 Υψηπερατά αποσβενόμενα φίλτρα (α) Πρώτης τάξης (β) Δευτέρας τάξης (γ) Τρίτης τάξης

- Το πρώτης τάξης φίλτρο δεν χρησιμοποιείται συνήθως απαιτεί μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτή και έχει υπερβολικές απώλειες στην θεμελιώδη συχνότητα.
- Το δευτέρας τάξεως φίλτρο παρέχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά φιλτραρίσματος αλλά έχει υψηλότερες απώλειες στην θεμελιώδη συχνότητα εν συγκρίσει με αυτά της τρίτης τάξεως (17).
- Το κύριο πλεονέκτημα των τρίτης τάξης φίλτρων έναντι αυτών της δευτέρας τάξεως είναι η ουσιαστική μείωση των απωλειών στην θεμελιώδη συχνότητα που οφείλονται στην αυξημένη εμπέδηση στην συχνότητα αυτή λόγω της παρουσίας του πυκνωτή  $C_2$ . Επιπλέον η διαστασολόγηση του πυκνωτή  $C_2$  είναι πολύ μικρή εν συγκρίσει αυτής του πυκνωτή  $C_1$ .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \quad (3-14)$$

$$m = \frac{L}{R^2C} \quad (3-15)$$

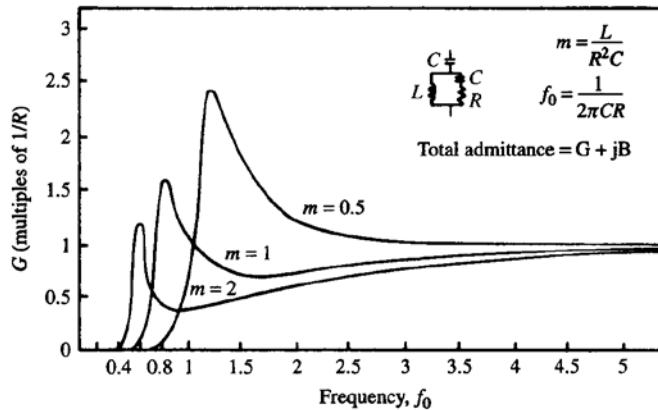
$$x = \frac{f}{f_0} \quad (3-16)$$

Αγωγιμότητα

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 \left[ (1 - mx^2)^2 + m^2 x^2 \right]} \quad (3-17)$$

Επιδεκτικότητα

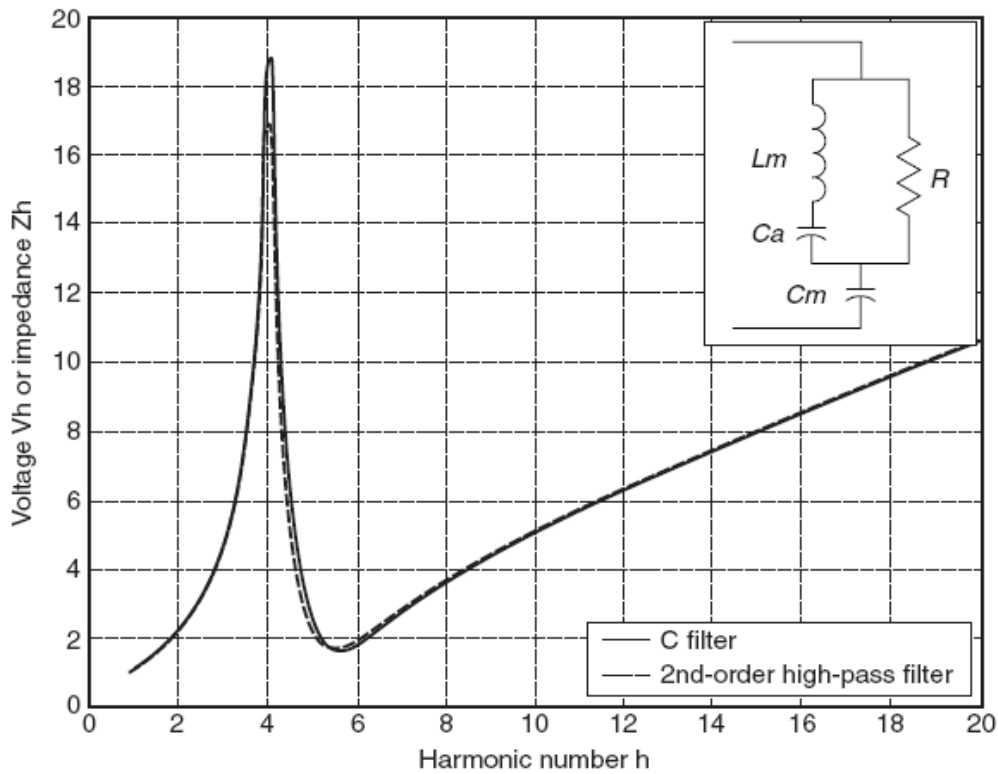
$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[ \frac{1 - mx^2 + m^2 x^2}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad (3-18)$$



Σχήμα 36 Συνιστώσα αγωγιμότητας ενός τρίτης τάξεως αποσβενομένου φίλτρου

### 3.7 ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ ΤΥΠΟΥ C

Τα φίλτρα αυτού του τύπου προσφέρονται ως εναλλακτική λύση των βαθυπερατών φίλτρων σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευρείας ζώνης αποκοπή αρμονικών και ενδοαρμονικών. Έτσι βρίσκουν εφαρμογή σε μετατροπείς ισχύος, σε επαγωγικούς κλιβάνους και κυκλομετατροπείς για τον προαναφερόμενο σκοπό. Μια τυπική διάταξη ενός τέτοιου φίλτρου όπως και η απόκριση συχνότητας του φαίνονται στο σχήμα 37



Σχήμα 37 Αποσβενόμενο φίλτρο αρμονικών τύπου C

Ο βοηθητικός πυκνωτής  $C_a$  έχει τέτοιο μέγεθος ώστε η χωρητική του αντίδραση να αναιρεί την επαγωγική αντίδραση του πηνίου  $L_m$  στην θεμελιώδη συχνότητα και ως αυτού να παρακάμπτεται η αντίσταση απόσβεσης  $R$ . Έτσι οι απώλειες που σχετίζονται με την αντίσταση  $R$  εξαλείφονται και επιτρέπουν στα φίλτρα τύπου C να συντονισθούν σε χαμηλές συχνότητες. Σε υψηλής τάξεως αρμονικές η αντίδραση του  $C_a$  είναι μικρή ενώ του  $L_m$  μεγάλη με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική απόκρισης να ομοιάζει αυτής ενός 2ης τάξης υπερβατικού φίλτρου. Με δεδομένη την χωρητικότητα  $C_m$  όπου παρέχει αντιστάθμιση της αέργου ισχύος και με δεδομένο το ποσοστό ρεύματος αρμονικών  $I_{sf}(hT)$  που θα ρέει προς το σύστημα, τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος του φίλτρου δίνονται από τους ακόλουθους τύπους.

$$R = \frac{R_f^2 + \left(\frac{X_{c_M}}{h_T}\right)^2}{R_F} \quad (3-19)$$

$$X_{L_M} = X_{c_A} = \frac{R_f^2 + \left(\frac{X_{c_M}}{h_T}\right)^2}{\left(\frac{X_{c_M}}{h_T}\right)\left(h_T - \frac{1}{h_T}\right)} \quad (3-20)$$

$$R_F = \frac{h_T \cdot X_S}{\sqrt{\left|\frac{1}{I_{SF}(h_T)}\right|^2 - 1}} \quad (3-21)$$

- XLM = Η αντίδραση του πηνίου LM στην θεμελιώδη συχνότητα
- XCA= Η αντίδραση του πυκνωτή Ca στην θεμελιώδη συχνότητα
- Xs = Η αντίδραση βραχυκύκλωσης του συστήματος στην θεμελιώδη συχνότητα

### 3.8 ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ

Σε πολλές εφαρμογές η χρήση των συμβατικών λύσεων (παθητικά φίλτρα) για την καταστολή των αρμονικών μπορεί να είναι αναποτελεσματική ή ακόμα και να δημιουργήσει προβλήματα όπως παράλληλους συντονισμούς με την αντίδραση του συστήματος και υπεραντιστάθμιση της αέργου ισχύος στην θεμελιώδη συχνότητα (9).

Έτσι προέκυψε η ανάγκη για την εξεύρεση διατάξεων οι οποίες θα προσφέρουν δυναμικά προσαρμοζόμενες λύσεις στα θέματα ποιότητας ισχύος όπως είναι ο περιορισμός και η

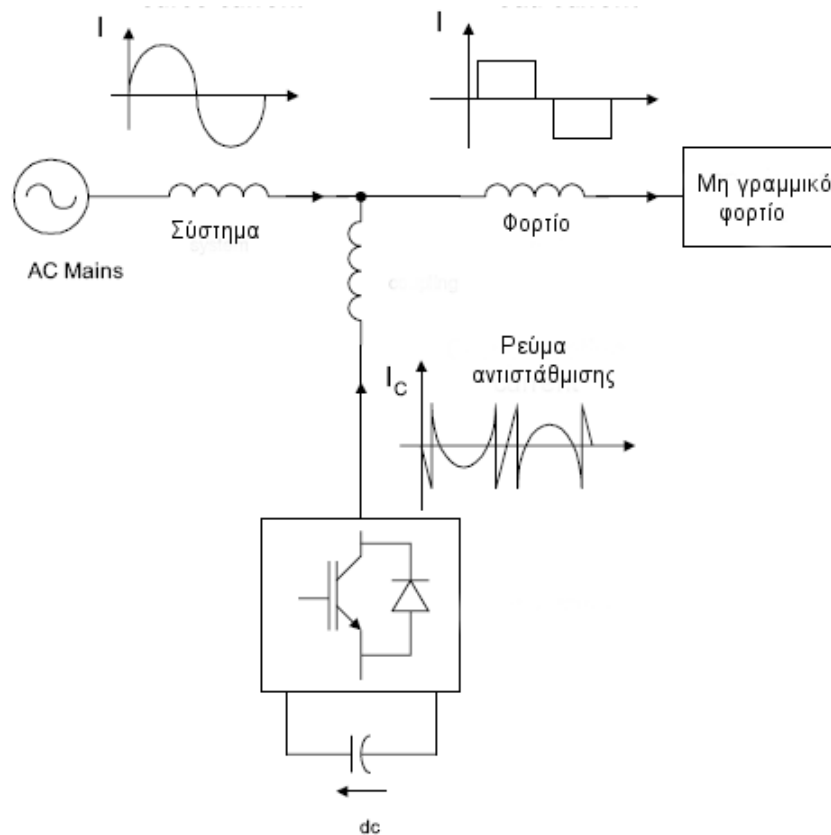


εξάλειψη των αρμονικών. Τέτοιες διατάξεις είναι γνωστές ως ενεργά φίλτρα και είναι ικανές να αντισταθμίσουν τάσεις και ρεύματα αρμονικών, άεργο ισχύ, να ρυθμίζουν την τάση, να καταστέλλουν διακυμάνσεις τις τάσεις και να εξισορροπούν την τάση στα τριφασικά συστήματα ισχύος. Το πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων είναι ότι αυτομάτως προσαρμόζονται στις αλλαγές και διακυμάνσεις των στοιχείων του δικτύου και του φορτίου. Έτσι μπορούν να αντισταθμίσουν διάφορες τάξεις αρμονικών και δεν κινδυνεύουν να συντονισθούν με την αντίδραση του συστήματος όπως στην περίπτωση των παθητικών φίλτρων.

Τα ενεργά φίλτρα ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τύπο του μετατροπέα που χρησιμοποιηθούν, την τεχνική ελέγχου, την τοπολογία και τα χαρακτηριστικά αντιστάθμισης που παρουσιάζουν.

#### Παράλληλα (shunt) ενεργά φίλτρα ισχύος

Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου φίλτρου απεικονίζεται στο σχήμα 38.



Σχήμα 38 Παράλληλο ενεργό φίλτρου ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση το ενεργό φίλτρο λειτουργεί ως πηγή ρεύματος, η οποία εγχέει στο σύστημα ισχύος τις ίδιες αρμονικές συνιστώσες που παράγονται από το φορτίο αλλά με διαφορά φάσης 180°. Έτσι ως αποτέλεσμα έχουμε την αναίρεση των αρμονικών που παράγονται από το φορτίο και το ρεύμα εισόδου του συστήματος φορτίο- ενεργό φίλτρο να είναι ημιτονοειδές και συμφασικό με την τάση εισόδου. Αυτή η αρχή μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιοδήποτε τύπο φορτίου που παράγει αρμονικές και με την κατάλληλη τεχνική ελέγχου του φίλτρου μπορούμε να επιτύχουμε και διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Έτσι ένα μη γραμμικό φορτίο με την βοήθεια του ενεργού φίλτρου φαίνεται από την μεριά του συστήματος ισχύος ως μια ιδανική ωμική αντίσταση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μετρήσεις σε μια εγκατάσταση ή σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται είτε για λόγους ελέγχου κατανάλωσης ισχύος και ενέργειας είτε λόγω προβλημάτων στον εξοπλισμό. Οι έρευνες στον τομέα της ποιότητας ισχύος συχνά απαιτούν παρακολούθηση, έτσι ώστε να προσδιορίζεται με ακρίβεια το πρόβλημα και στη συνέχεια να επαληθεύονται οι λύσεις που έχουν εφαρμοστεί(30).

Πριν όμως γίνει εκτεταμένη παρακολούθηση, είναι σημαντικό να έχουμε μελετήσει και κατανοήσει πλήρως τις εγκαταστάσεις του καταναλωτή, τον εξοπλισμό που επλήγη, την καλωδίωση και τη γείωση, τις πρακτικές και λειτουργικές παραμέτρους. Συχνά, τα προβλήματα ποιότητας ισχύος μπορούν να επιλυθούν χωρίς εκτεταμένη παρακολούθηση, απλώς και μόνο κάνοντας τις σωστές ερωτήσεις στον καταναλωτή και εκτελώντας μια αρχική έρευνα.

### 4.1 ΕΠΙΤΟΠΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

Η αρχική έρευνα θα πρέπει να έχει ως στόχο να ληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εγκατάσταση και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει. Οι πληροφορίες που θα πρέπει να λαμβάνονται στο στάδιο αυτό περιλαμβάνουν τα εξής:

- Φύση των προβλημάτων (απώλεια δεδομένων, όχληση, βλάβες, δυσλειτουργίες στο σύστημα ελέγχου)
- Χαρακτηριστικά του ευαίσθητου εξοπλισμού που αντιμετωπίζουν προβλήματα (πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό του εξοπλισμού ή τουλάχιστον οδηγίες εφαρμογής)
- Πότε εμφανίζονται τα προβλήματα;
- Πιθανές πηγές των διακυμάνσεων στην ποιότητα ισχύος εντός της εγκατάστασης (εκκίνηση μηχανών, μεταγωγή πυκνωτών, μηχανική λειτουργία ηλεκτρονικού εξοπλισμού, εξοπλισμός εκκενώσεων τόξου)
- Ενδεχόμενη χρήση κλιματιστικών

- Δεδομένα για το ηλεκτρικό σύστημα (μονοφασικά διαγράμματα, μεγέθη μετασχηματιστών, πληροφορίες για τα φορτία, πληροφορίες για τους πυκνωτές, δεδομένα καλωδίων)

Η παρακολούθηση της ποιότητας ισχύος μετά την αρχική έρευνα γίνεται για να χαρακτηριστούν οι διακυμάνσεις της σε συγκεκριμένες τοποθεσίες του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Οι απαιτήσεις της παρακολούθησης αυτής εξαρτώνται άμεσα από το συγκεκριμένο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί (11).

Προβλήματα που έχουν να κάνουν με αρμονική παραμόρφωση θα πρέπει να παρακολουθούνται για περίοδο τουλάχιστον μίας εβδομάδας για να έχουμε μια σαφή εικόνα του πώς οι αρμονικές ποικίλλουν ανάλογα με το φορτίο. Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν σημαντικές πτυχές της διαδικασίας μετρήσεων για σωστή παρακολούθηση της ποιότητας ισχύος.

#### Προσδιορισμός της τοποθεσίας ελέγχου

Κατά τη διάρκεια της λήψης των μετρήσεων, συνιστάται το σημείο παρακολούθησης να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον ευαίσθητο εξοπλισμό που επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της ισχύος. Είναι σημαντικό να καταγράψει η συσκευή παρακολούθησης τις ίδιες διακυμάνσεις που βλέπει και ο ευαίσθητος εξοπλισμός. Ειδικότερα ταχείες μεταβολές της τάσης μπορεί να καταγράφονται πολύ διαφορετικά όταν υπάρχει σημαντική απόσταση ανάμεσα στη συσκευή παρακολούθησης και τον εξοπλισμό.

Μια άλλη σημαντική τοποθεσία είναι το σημείο στο οποίο γίνεται η σύνδεση της υπό μέτρηση εγκατάστασης με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ταχείες μεταβολές της τάσης που μετρώνται σε αυτή τη θέση είναι πολύ πιθανό να εμφανίζονται στο σύνολο των

συσκευών της εγκατάστασης, μολονότι είναι πολύ πιθανό οι διαταραχές στην είσοδο να προκαλούνται από γεγονότα που συμβαίνουν μέσα στην εγκατάσταση.

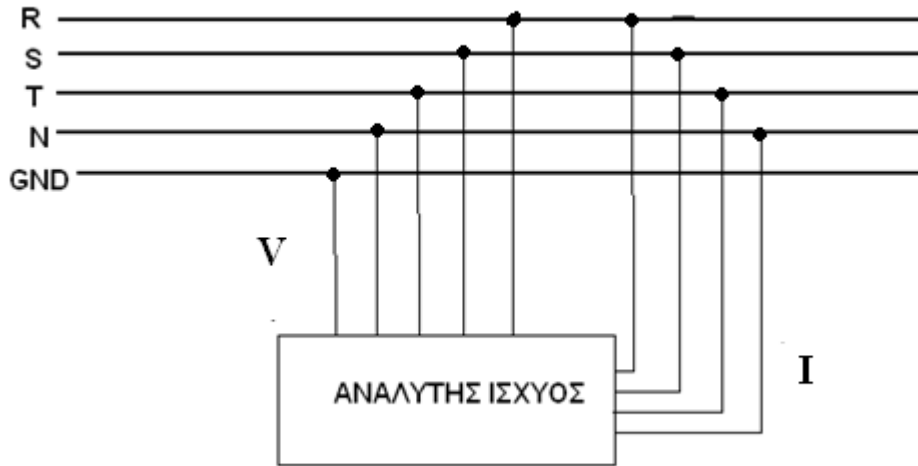
#### Φόρμα εγγραφής των διαταραχών

Είναι σημαντικό να διατηρείται ένα λεπτομερές αρχείο καταγραφής του εξοπλισμού και των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την περίοδο των μετρήσεων. Αυτό θα επιτρέψει την συσχέτιση των διαταραχών και των αλλαγών του συστήματος με τα πραγματικά προβλήματα όσον αφορά την ποιότητα της ισχύος.

Στο αρχείο αυτό θα πρέπει επίσης να αναφέρονται οι σημαντικές αλλαγές που πιθανόν να έγιναν στο σύστημα κατά την περίοδο που διεξάγονται οι μετρήσεις (πυκνωτές διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, συνθέσεις του κυκλώματος, καινούριος εξοπλισμός κ.α.). Τέλος, θα καταγράφονται διαταραχές οι οποίες δεν έχουν άμεσες συνέπειες για τον εξοπλισμό. Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση των διαταραχών αυτών από τα γεγονότα που πραγματικά προκαλούν προβλήματα (14).

#### Σύνδεση της συσκευής παρακολούθησης στην τοποθεσία έλεγχου

Η παρακολούθηση της Ποιότητας Ισχύος είναι δυνατή με τη χρησιμοποίηση ενός τριφασικού αναλυτή ισχύος. Συγκεκριμένα, ο τριφασικός αναλυτής ισχύος που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι το μοντέλο 434/435 της εταιρίας fluke,. Ο συγκεκριμένος αναλυτής ισχύος διαθέτει 4 εισόδους τύπου BNS για το ρεύμα και 5 εισόδους τύπου ‘μπανάνα’ για την τάση. Για τη σύνδεσή του με το υπό μέτρηση δίκτυο, αρχικά τοποθετούνται οι ακροδέκτες για τη μέτρηση του ρεύματος γύρω από τους αγωγούς της φάσης R, S, T και N (ουδέτερος). Έπειτα συνδέονται οι ακροδέκτες για τη μέτρηση της τάσης. Πρώτα συνδέονται οι ακροδέκτες γείωσης (Ground) και μετά διαδοχικά οι ακροδέκτες για τις φάσεις N, R, S και T. Οι συνδέσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως δίνονται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 39 Σύνδεση του αναλυτή ισχύος στην τοποθεσία ελέγχου

#### Καθορισμός του κατάλληλου χρονικού διαστήματος καταγραφής

Για να αποκτήσει κανείς επαρκείς πληροφορίες για την συμπεριφορά ενός δικτύου, πρέπει τα συμβάντα που έχουν να κάνουν με την ποιότητα ισχύος να καταγραφούν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην διεθνή βιβλιογραφία το διάστημα της μίας εβδομάδας θεωρείται σαν το ελάχιστο όριο όπου μπορούν να παρατηρηθούν όλα τα φαινόμενα διαφορετικών καταστάσεων σε ένα δίκτυο (20).

## **4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΥΝ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ**

Οι παράμετροι οι οποίοι πρέπει να καταγραφούν είναι επιγραμματικά οι ακόλουθοι:

- Συχνότητα συστήματος

- Πλάτος της παρεχόμενης τάσης
- Φλίκερ
- Ασυμμετρία της παρεχόμενης τάσης
- Αρμονική τάση
- Τάση ενδιάμεσων αρμονικών
- Απότομες (ταχείες) μεταβολές της τάσης
- Βυθίσεις της τάσης
- Παροδικές υπερτάσεις
- Σύντομες διακοπές
- Μόνιμες διακοπές
- Μεταβατικές υπερτάσεις

Για την Ελλάδα η ονομαστική συχνότητα του συστήματος παροχής τάσης είναι τα 50 Hz. Οι διακυμάνσεις στην συχνότητα τροφοδοσίας δημιουργούνται όταν η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των φορτίων αλλάξει. Σε κανονικές συνθήκες, δεν παρατηρείται σημαντική διακύμανση. Διακυμάνσεις στην συχνότητα αναμένεται να παρατηρηθούν όταν το σύστημα λειτουργεί σε “απομόνωση” από το υπόλοιπο διασυνδεδεμένο δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Συνήθως οι περισσότερες συσκευές από κατασκευαστικής άποψης μπορούν να αντέξουν μία διακύμανση στη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Στην περίπτωση που η συχνότητα απομακρυνθεί πολύ από αυτά τα όρια οι συνέπειες ενδέχεται να είναι καταστροφικές για τις συσκευές, εφόσον αυτό συμβεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (11).

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ποιότητα ισχύος είναι ένας καινούργιος σχετικά όρος που αφορά όμως προβλήματα που είναι γνωστά εδώ και πολλά χρόνια. Η επαναθεώρηση αυτών των παλιών προβλημάτων έχει ως αφετηρία το γεγονός ότι στο δίκτυο συνδέονται συνεχώς περισσότερα φορτία ευαίσθητα σε διαταραχές της παρεχόμενης ισχύος. Ταυτοχρόνως, τα ίδια αυτά φορτία προκαλούν καινούργια προβλήματα για το δίκτυο και υπάρχει ανάγκη να καθοριστούν και να εφαρμοστούν όρια για τη λειτουργία τόσο του δικτύου όσο και των καταναλωτών, αφού οι οικονομικές παράμετροι αυτών των προβλημάτων είναι σημαντικές: από τις απώλειες στην παραγωγή ενός εργοστασίου όταν σταματήσει μια διαδικασία έως το κόστος του UPS για τον υπολογιστή στο γραφείο μας. Προδιαγραφές επίσης πρέπει να τεθούν και για τους κατασκευαστές συσκευών οι οποίες είναι ευαίσθητες σε διαταραχές.

Οι μετρήσεις, είτε πρόκειται για τον εντοπισμό ενός συγκεκριμένου προβλήματος είτε για την καταγραφή των παραμέτρων της ποιότητας ισχύος σε ένα δίκτυο, είναι το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της υπάρχουσας κατάστασης. Τα οφέλη από τις μετρήσεις είναι πολλαπλά: ταχύτερη επίλυση προβλημάτων, αποδοτικότερη επικοινωνία των εμπλεκόμενων μερών, οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου και ελαχιστοποίηση απωλειών για τους πελάτες.