

**Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ**  
**ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ ΠΛΗΘΑΡΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2012**

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 –ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
(ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ- ΜΕΤΡΑ-ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ).....	4
Γενικά.....	4
Διακύμανση της συχνότητας της τάσης.....	6
1.1.0 Γενικά.....	6
1.1.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	6
1.1.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	7
Διακύμανση του πλάτους της παρεχόμενης τάσης.....	7
1.2.0 Γενικά.....	7
1.2.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	7
1.2.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	8
1.2.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	8
Ταχείες μεταβολές της τάσης.....	8
Παροδική πτώση τάσης.....	8
1.3.0 Γενικά.....	8
1.3.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	11
1.3.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	12
1.3.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	14
1.3.4 Μελλοντικές λύσεις υπο έρευνα.....	17
Παροδική υπέρταση.....	17
1.4.0 Γενικά.....	17
1.4.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	18
1.4.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	18
1.4.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	18
Διακοπές της τάσης.....	18
1.5.0 Γενικά.....	18
1.5.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	19
1.5.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	19
1.5.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	20
Flicker.....	20
1.6.0 Γενικά.....	20
1.6.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	22
1.6.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	23
1.6.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	24
Ασυμμετρία των φάσεων.....	27
1.7.0 Γενικά.....	27
1.7.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	30
1.7.2 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	30
1.7.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	34
Μεταγωγική υπέρταση.....	35
1.8.0 Γενικά και τι προκαλεί την διαταραχή.....	35
1.8.1 Προβλήματα που προκαλεί στα φορτία και τους εξοπλισμούς.....	37
Αρμονικές.....	39
1.9.0 Γενικά.....	39
1.9.1 Τι προκαλεί την διαταραχή.....	42
1.9.2 Προβλήματα που προκαλούν οι αρμονικές κ λύσεις.....	45
1.9.3 Τρόποι επίλυσης των προβλημάτων.....	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ	
ΙΣΧΥΟΣ.....	55
2.1 Μονοφασικές ανορθώσεις κοινού σημείου .....	55
2.1.1 Παράδειγμα 1 .....	59
2.1.2 Παράδειγμα 2.....	63
2.2 Τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου .....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ -3 ΕΝΕΡΓΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ .....	69
3.1 Σύγκριση ενεργών κ παθητικών φίλτρων.....	69
3.2 Αρχή λειτουργίας των ενεργών φίλτρων .....	69
3.3 Κατηγορίες ενεργών φίλτρων .....	70
3.4 Σχεδίαση ενός ενεργού φίλτρου .....	71
3.5 Η λειτουργία ενός ενεργού φίλτρου αναλυτικά .....	72
3.5.1 Η γεννήτρια ρεύματος αντιστάθμισης .....	73
3.5.2 Αρχή λειτουργίας του PWM.....	74
Βήμα 1 .....	74
Βήμα 2.....	78
Βήμα 3 .....	80
3.5.3 Κύκλωμα έλεγχου .....	80
3.5.4 Επιδόσεις.....	82
3.5.5	
Προστασία.....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

## Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζεται ο ορος της ποιότητας τις ισχύος. Για το λόγο αυτό επεξηγούνται φαινόμενα όπως οι βυθίσεις τάσης, οι διακοπές, οι υπερτάσεις, καθώς κ πληθώρα άλλων φαινομένων, λιγότερο γνωστών, που περιλαμβάνονται στον ορο αυτό. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην μελέτη του φαινομένου των αρμόνικων, πως αυτές δημιουργούνται, τα περιβλήματα που προκαλούν στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό και στους τρόπους με τους οποίους μπορούν να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην διαδικασία κατασκευής φίλτρων των αρμονικών όπως ορίζουν τα διεθνή πρότυπα.

Σε κάθε ένα από τα τρία κεφάλαια αναλύεται ένα ξεχωριστό μέρος της εργασίας αυτής.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** αναλύεται ο ορος τις ποιότητας της ισχύος κ των αρμόνικων στην θεωρητική τους μορφή καθώς και τα χαρακτηριστικά, μετρά, προβλήματα και βελτιώσεις των διαταραχών που ακολουθούν. Συγκεκριμένα η ποιότητα τις ισχύος εξαρτάται από κάποιους παράγοντες που είναι οι εξής.

- **Συχνότητα**
- **Επίπεδο τάσης**
- **Κυματομορφή τάσης ή ρεύματος**
- **Συμμετρία των τριών φάσεων**

Τους παράγοντες αυτούς μπορούμε να τις κατατάξουμε σε κατηγορίες διαταραχών.

- **διακυμάνσεις της συχνότητας της τάσης**
- **διακυμάνσεις του πλάτους της παρεχομένης τάσης**
- **παροδική πτώση τάσης (sag, dip)**
- **παροδική υπέρταση (swell)**
- **διακοπές της τάσης**
- **flicker**
- **ασυμμετρία των φάσεων**
- **μεταγωγική υπέρταση**
- **αρμονικές**

Σ το **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μια ανάλυση των αρμονικών στα ηλεκτρονικά ισχύος κ έχουμε ως αντικείμενο ανάλυσης ένα μονοφασικό ελεγχόμενο ανορθωτή κοινού σημείου και τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου. Μπορούμε να δούμε πως γίνεται η ανάλυση αυτή στα παραδείγματα που υπάρχουν στο κεφάλαιο αυτό με κυματογράφο, κυκλώματα και μαθηματικές αναλύσεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** κ τελευταίο γίνεται μια λεπτομερή αναφορά στα αρμονικά φίλτρα και ειδικά στα ενεργά αρμονικά φίλτρα. Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να καταλάβουμε πως λειτουργούν και πως δημιουργείτε ένα ενεργό αρμονικό φίλτρο καθώς κ τους παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας για τον σωστό σχεδιασμό του φίλτρου.

Ποιο αναλυτικά αυτά που θα γνωρίσουμε στο κεφάλαιο αυτό είναι.

- αρχή λειτουργίας των ενεργών φίλτρων
- κατηγορίες ενεργών φίλτρων
- σχεδίαση ενός ενεργού φίλτρου

- λειτουργία ενός ενεργού φίλτρου αναλυτικά

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ,ΜΕΤΡΑ , ΠΡΟΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ )

### ΓΕΝΙΚΑ

Όταν γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της ποιότητας ισχύος τότε εννοούνται τα χαρακτηριστικά εκείνα της παρεχόμενης τάσης, η απόκλιση των οποίων από τις ονομαστικές τους τιμές, προκαλεί δυσλειτουργία στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Ιδανική μορφή της τάσης θα ήταν ένα καθαρό συνημίτονο με σταθερή συχνότητα και πλάτος. Κάθε απόκλιση από αυτή την μορφή, την ονομάζουμε διαταραχή. **Η απόδοση μιας συσκευής ενός πελάτη μπορεί να μειωθεί σημαντικά από την παρουσία κάποιας διαταραχής** . Βάσει της συχνότητας, μία διαταραχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως χαμηλής συχνότητας (<9kHz) ή υψηλής συχνότητας (>9kHz). Οι παρακάτω παράμετροι της παρεχόμενης τάσης επηρεάζονται έντονα από τις διαταραχές:

- ➔ Συχνότητα
- ➔ Επίπεδο τάσης
- ➔ Κυματομορφή τάσης ή ρεύματος
- ➔ Συμμετρία των τριών φάσεων

Οι διαταραχές μπορεί να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους (δηλαδή να τις κατατάξουμε σε κατηγορίες διαταραχών).

1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ (VARIATIONS) είναι **μικρές** αποκλίσεις των χαρακτηριστικών της τάσης και του ρεύματος από τις ονομαστικές και τις ιδανικές τους τιμές, που παρατηρούνται για αρκετές περιόδους. Παραδείγματα είναι η διακύμανση της ενεργού τιμής της τάσης και της συχνότητας από τις ονομαστικές τους τιμές και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος. Οι διακυμάνσεις είναι διαταραχές που μπορούν να μετρηθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Οι αρμονικές παραμορφώσεις είναι ένα παράδειγμα αυτού του τύπου διαταραχών.
2. ΣΥΜΒΑΝΤΑ (EVENTS) είναι μεγαλύτερες διακυμάνσεις οι οποίες όμως παρουσιάζονται περιστασιακά, όπως διακοπές της τάσης ή μεγάλα ρεύματα λόγω ζεύξης ή απόζεύξης κάποιου μεγάλου φορτίου. Τα συμβάντα είναι διαταραχές που αρχίζουν και τελειώνουν περνώντας ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Παράδειγμα τέτοιων διαταραχών μπορούν να θεωρηθούν και οι βυθίσεις.

Η διαφορά μεταξύ *διακυμάνσεων* και *συμβάντων* δεν είναι πάντα εμφανής και εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μέτρηση της κάθε διαταραχής. Ο καλύτερος τρόπος διαχωρισμού μεταξύ των δύο διαταραχών είναι ο ακόλουθος:

οι διακυμάνσεις μπορούν να μετρηθούν *οποιοδήποτε χρονική στιγμή*, ενώ για τα συμβάντα χρειάζεται κανείς να *περιμένει έως* ότου κάποιο από τα χαρακτηριστικά της τάσεως ή του ρεύματος *υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο*. Καθώς το όριο μίας διαταραχής είναι πολλές φορές *αυθαίρετα ορισμένο* είναι πολύ συχνά στενή η νοητή γραμμή που χωρίζει διακυμάνσεις και συμβάντα. Παρόλα αυτά ο διαχωρισμός τους παραμένει χρήσιμος και στην πραγματικότητα γίνεται σε κάθε μελέτη ποιότητας ισχύος. Για παράδειγμα, μετρήσεις της ενεργού τιμής της τάσης μπορεί να είναι βάση τόσο για διακυμάνσεις (μετρείται η rms κάθε 10 λεπτά) όσο και βάση για συμβάν (αρχίζοντας και τελειώνοντας όταν περνάει η rms τιμή το 90% της ονομαστικής).

Ο ορισμός των διακυμάνσεων και των συμβάντων της ποιότητας ισχύος όπως δόθηκε παραπάνω είναι πολύ πλατύτερος από την γενική ερμηνεία της ποιότητας ισχύος. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι η ποιότητα ισχύος συνήθως είναι μέρος της έκφρασης *‘κακή ποιότητα ισχύος’*. Μία διαταραχή στην ποιότητα ισχύος φαίνεται μόνο σαν πρόβλημα αν δημιουργεί πρόβλημα είτε στους καταναλωτές, είτε στο ίδιο το σύστημα.

*Βυθίσεις και αρμονικές είναι προβλήματα του δικτύου και αποτελούν μέρος του προβλήματος της ποιότητας ισχύος για πολλούς. Από την άλλη η διακύμανση της συχνότητας και της τάσης, δεν θεωρούνται πλέον πρόβλημα γιατί έχουν συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό των εγκαταστά*

Για την δημιουργία του σκελετού αυτού του κεφαλαίου και τον τρόπο που γίνεται η παρουσίαση των διαταραχών υιοθετήθηκε η τελευταία περίπτωση. Η κάθε διαταραχή δίνεται στον **Πίνακα** σε σχέση στο οποίο αναπτύσσεται.

Διακύμανση της	Παράμετρος	Επεξήγηση
Συχνότητας	Διακύμανση της συχνότητας τροφοδοσίας	1.1

Τάσης	Διακύμανση του πλάτους της παρεχόμενης τάσης	1.2
	Βύθιση τάσης	1.3
	Παροδική υπέρταση	1.4
	Διακοπές της τάσης	1.5
	Φλίκερ	1.6
	Ασυμμετρία φάσεων	1.7
	Μεταγωγική υπερταση	1.8
	Αρμονικές	1.9

πίνακας διαταραχών της τάσης ανά κεφάλαιο

Ο τρόπος που γίνεται η **διάρθρωση του κάθε κεφαλαίου** και κατ' επέκταση η παρουσίαση της κάθε διαταραχής έχει να κάνει με τον τρόπο που θα αντιμετωπίζεται λογικά ένα πρόβλημα. Πρώτα αναλύεται η **φύση της κάθε διαταραχής** και την **μορφή αυτής**. Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της **πηγής δημιουργίας του φαινομένου**. Τρίτον εξετάζεται ο **τρόπος επίδρασης κάθε διαταραχής στον εξοπλισμό, τόσο των καταναλωτών όσο και του δικτύου**. Και τέλος αναφέρονται **τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που δημιουργεί**.

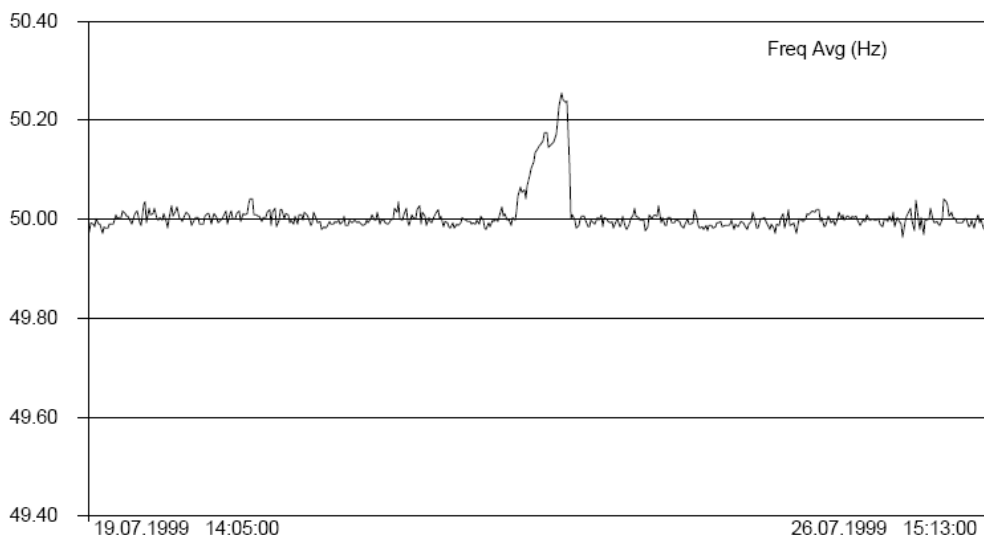
## ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

### 1.1.0 ΓΕΝΙΚΑ

Η μέτρηση της συχνότητας τροφοδοσίας πραγματοποιείται συχνά με βάση την ανίχνευση των περασμάτων της τάσης από το μηδέν (**zero crossing detection**). Εξαιτίας των μεταβατικών φαινομένων και των αρμονικών<sup>1</sup> πρέπει να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές απόρριψης του πολλαπλού περάσματος από το μηδέν.

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

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



**Σχήμα 1** Καταγραφή από ένα πραγματικό δίκτυο όπου φαίνεται χαρακτηριστικά ένα παράδειγμα διακύμανσης της συχνότητας που δεν ξεφεύγει βέβαια από τα επιτρεπτά όρια

### **1.1.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Οι διακυμάνσεις στην συχνότητα τροφοδοσίας δημιουργούνται όταν **η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των φορτίων αλλάξει**. Σε κανονικές συνθήκες, δεν είναι και πολύ πιθανό να παρατηρηθεί σημαντική διακύμανση. Διακυμάνσεις στην συχνότητα αναμένεται να παρατηρηθούν όταν το σύστημα λειτουργεί σε **‘απομόνωση’** από το υπόλοιπο διασυνδεδεμένο δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται εξαιτίας της συνεχούς ζεύξης και απόζεύξης μεγάλων φορτίων στο σύστημα ή λόγω της **έλλειψης κανονισμών<sup>ii</sup>** για τα φορτία που συνδέονται (π.χ. τα φορτία που συνδέονται δεν ικανοποιούν τα όρια για καλή ποιότητα ισχύος όπως δίνονται από τα διεθνή πρότυπα, όμως δεν υπάρχει κάποιος κανονισμός που να απαγορεύει σε ένα τέτοιο καταναλωτή να συνδεθεί στο σύστημα).

### **1.1.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ**

Συνήθως οι περισσότερες συσκευές από κατασκευαστικής άποψης μπορούν να αντέξουν μία διακύμανση της τάξης του 1% στην συχνότητα της τάσης που δέχονται. Αν απομακρυνθεί πολύ από αυτά τα όρια οι συνέπειες ενδέχεται να είναι καταστροφικές για τις συσκευές αν έχει μεγάλη διάρκεια. Όπως όμως αναφέραμε μετά την διασύνδεση της Ελλάδας με το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι διακυμάνσεις της τάσης που παρατηρούνται είναι αμελητέες και μόνο στην περίπτωση που **‘κοπεί’**, έστω και για λίγο, η διασύνδεση μπορεί να πάρουν κάποιες τιμές που να είναι ανησυχητικές, αλλά όχι καταστροφικές. Πρόβλημα παρατηρείται κυρίως σε απομονωμένα συστήματα, όπως είναι τα πολλά νησιά που έχουμε στην Ελλάδα.

### **ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΗΣ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ**



## **1.2.0 ΓΕΝΙΚΑ**

Το εύρος της παρεχόμενης τάσης αναπαρίσταται με την RMS τιμή της τάσης για χρόνο ίσο με το μισό της περιόδου. Στατιστικοί υπολογισμοί για κάποια συγκεκριμένα δεδομένα γίνονται για μία περίοδο. Χρησιμοποιείται ένα κενό διάστημα ολοκλήρωσης ώστε να μειώνεται ο όγκος των μετρήσεων και αυτό μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και 10 λεπτά. Σαν διακύμανση της τάσης συνήθως ορίζεται η **μακράς διάρκειας απόκλιση της τάσης από την ονομαστική της τιμή (θα μπορούσε κανείς να την αποκαλέσει και μόνιμη γιατί παρατηρείται σε αρκετές περιόδους).**

## **1.2.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Μια αλλαγή στην RMS τιμή της τάσης μπορεί να συμβεί εξαιτίας της **διακύμανσης των φορτίων του δικτύου**, αλλά με μία εγκατάσταση αυτόματου ρυθμιστή τάσης θα ήταν δυνατό να γίνει μία αντιστάθμιση αυτών των αλλαγών εντός κάποιων δεκάτων του δευτερολέπτου. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα σε πολύ μεγάλες γραμμές.

## **1.2.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

Οποιαδήποτε διαταραχή στο πλάτος της τάσης εκτός των ορίων του +10% / -15% της ονομαστικής τιμής του πλάτους της τάσης μπορεί να προκαλέσει πρόωρη γήρανση, υπερθέρμανση ή δυσλειτουργία του συνδεδεμένου εξοπλισμού.

## **1.2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

- Ο καλύτερος τρόπος επίλυσης αυτών των προβλημάτων είναι η **χρήση μικρότερων γραμμών** από τους παραγωγούς προς τους καταναλωτές. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της πτώσης τάσης από την παραγωγή στην κατανάλωση.
- Άλλος τρόπος είναι η **χρήση των APT** (Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης) που ήδη γίνεται στις μονάδες παραγωγής.
- Τέλος είναι γνωστή και η μέθοδος **χρήσης μετασχηματιστών με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού**, ώστε να διορθώνεται πιθανή μακρά διακύμανση στην τάση (αυτή την μέθοδο την χρησιμοποιούν εκτός της ΔΕΗ και αρκετοί μεγάλοι καταναλωτές).
- Μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους παροχείς είναι η **αντιστάθμιση της τάσης σε πολλούς ζυγούς χωριστά και όχι σε κεντρικό επίπεδο**. Όμως υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες από την χρήση πυκνωτών.

## **TAXEIEΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ**

Ταχεία μεταβολή της τάσης καλείται μία γρήγορη μεταβολή στη τάση μεταξύ δύο κανονικών συνθηκών. Μπορεί να προκληθεί με την ζεύξη ή απόζευξη μεγάλων φορτίων στο δίκτυο. Ένα τυπικό παράδειγμα μία ταχείας μεταβολής στην τάση μπορεί να παρατηρηθεί με την εκκίνηση ενός μεγάλου κινητήρα. Αν η απότομη μεταβολή στην τάση ξεπερνάει κάποια όρια τότε θεωρείται σαν βύθιση ή υπέρταση. Για την μέτρηση ενός φαινομένου ταχείας μεταβολής της τάσης πρέπει να οριοθετηθούν οι τιμές των κατωφλίων για κάθε ένα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά: *ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή μεταβολής (a), ελάχιστη διάρκεια που πρέπει να βρισκόμαστε σε κανονική κατάσταση λειτουργίας (b), ελάχιστη διαφορά μεταξύ δύο καταστάσεων κανονικής λειτουργίας (c) το διάστημα σταθερότητας για τις καταστάσεις κανονικής λειτουργίας (d).*

Οι ταχείες μεταβολές της τάσης παρουσιάζονται σε δύο κατηγορίες μία είναι η παροδική πτώση τάσης και μία η παροδική υπέρταση που αναπτύσσονται στην συνέχεια.

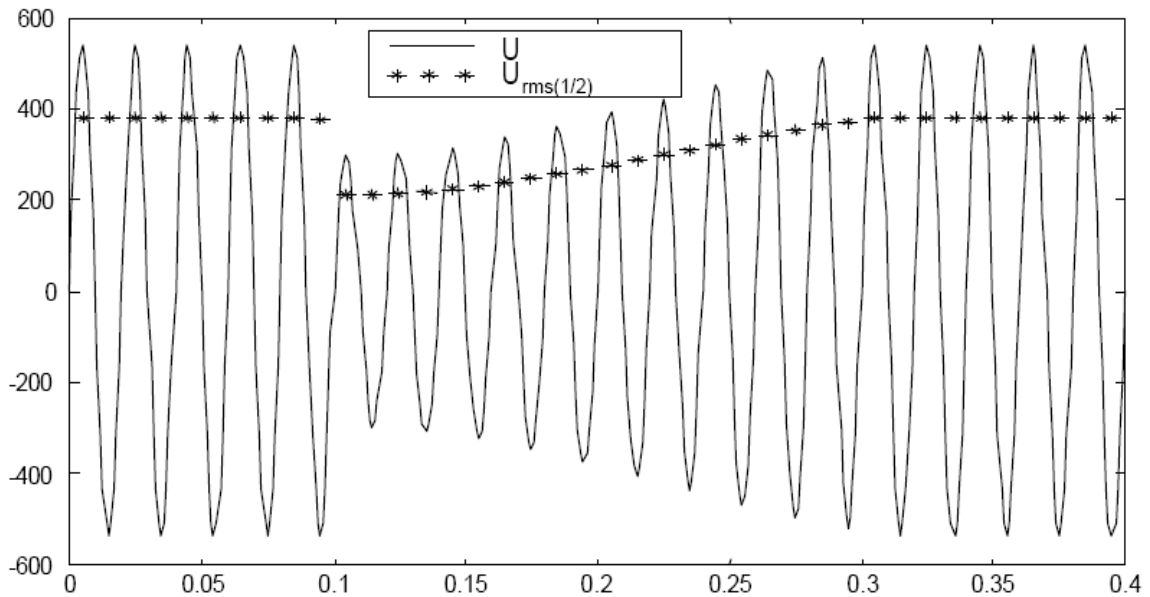
## **ΠΑΡΟΔΙΚΗ ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ (SAG, DIP)**

### **1.3.0 ΓΕΝΙΚΑ**

**Βύθιση** είναι ο όρος που χρησιμοποιείται διεθνώς για να ορίσει μία παροδική μείωση της παρεχόμενης τάσης κάτω από ένα κατώφλι για *χρόνο* μικρότερο του *ενός λεπτού*. Μείωση της τάσης για μεγαλύτερη διάρκεια από το ένα λεπτό κατατάσσονται στις διακυμάνσεις του πλάτους, όπως και παρουσιάσαμε στην ενότητα 2.2.

Στην διεθνή βιβλιογραφία ο όρος **sag** χρησιμοποιείται από ένα σημαντικό αριθμό ερευνητών, αλλά τελευταία η επιτυχία της EMC (ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας) έχει ορίσει τον όρο **dip** ως τον καταλληλότερο.

Για την εκτίμηση των βυθίσεων της RMS τιμής της τάσης, αυτή υπολογίζεται στο διάστημα μιας περιόδου ή μιας ημπεριόδου, κάθε 10ms (κάθε μισό κύκλο). Αυτή η τιμή φαίνεται σαν  $U_{\text{rms}(1/2)}$ . Η αρχή της μέτρησης της  $U_{\text{rms}(1/2)}$  τιμής φαίνεται στο **σχήμα** . Κάθε 10ms μία καινούργια τιμή της ενεργού τιμής της τάσης (φαίνεται στο σχήμα σαν \*) παρουσιάζεται για την σύγκριση με το κατώφλι.

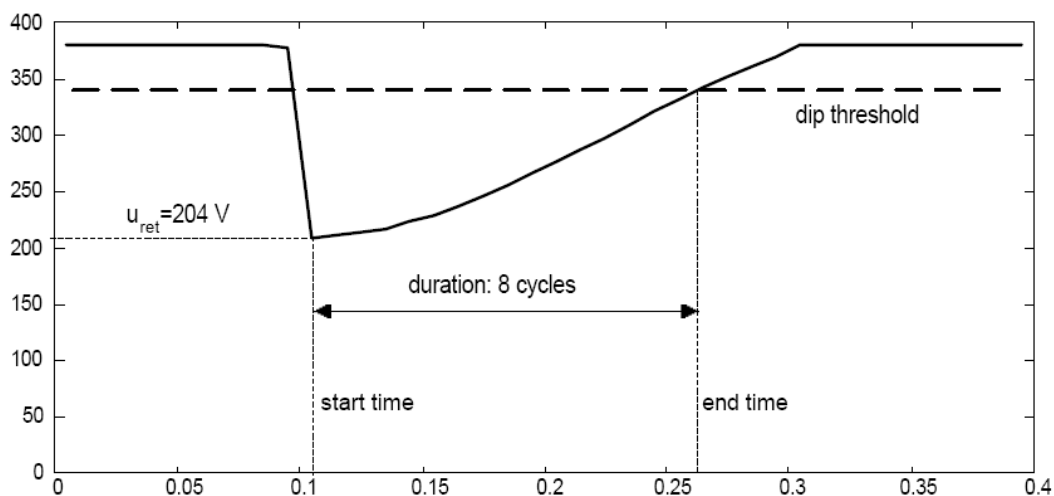


στο **Σχήμα 2** αυτό φαίνεται η ενεργός τιμή  $U_{rms(1/2)}$  όπως αυτή καταγράφεται σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής της τάσης

Η βύθιση της τάσης χαρακτηρίζεται από 4 στοιχεία :

- 1) Κατώφλι βύθισης
- 2) Ώρα εκκίνησης της βύθισης
- 3) Διάρκεια βύθισης
- 4) Ύψος τάσης (retained voltage)  $U_{ret}$  (ο όρος από την άποψη ότι δεν πάει παρακάτω)

Στο παρακατω **Σχήμα** παρουσιάζονται τα 4 χαρακτηριστικά σε μια βύθιση τάσης όπως απεικονίζονται γραφικά. Το κατώφλι βύθισης μπορεί να τεθεί από τον χρήστη και είναι σαν ποσοστό της ονομαστικής τάσης  $U_n$  ή συμφωνημένης τάσης (**declared voltage**)  $U_c$  (ή  $U_{dec}$  σε μερικές περιπτώσεις). Μπορεί να κυμαίνεται από  $0.9 U_c$  για αποφυγή προβλημάτων έως  $0.65 U_c$  σε κάποιες συμβατικές περιπτώσεις. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το κατώφλι βύθισης τέθηκε στα 0.85, το οποίο και σημαίνει 340volts (πολική τάση).



**Σχήμα 3.** χαρακτηριστικά της βύθισης τάσεως

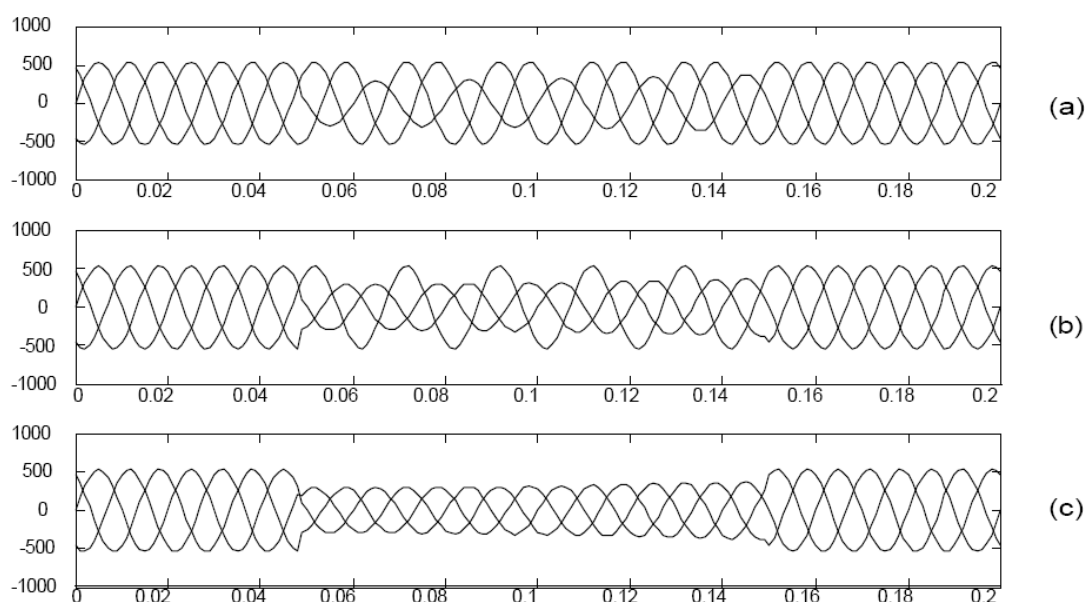
Η βύθιση *ξεκινάει* όταν η τάση πέσει *κάτω από το κατώφλι*. *Τερματίζεται* όταν η τάση πάρει τιμή *μεγαλύτερη από το κατώφλι*. Η χρονική διαφορά μεταξύ της εκκίνησης και του τερματισμού είναι η διάρκεια της βύθισης και καταγράφεται συνήθως σε δευτερόλεπτα ή περιόδους. Το βάθος της βύθισης είναι η μικρότερη τιμή τάσης που παρατηρείται στην συγκεκριμένη βύθιση ( βάθος της βύθισης καλούμε την μέγιστη διαφορά που θα έχει η τάση κατά την βύθιση από την ονομαστική).

Το ελάχιστο σύνολο χαρακτηριστικών που μπορούν να περιγράψουν μια βύθιση είναι η διάρκεια και του ύψους της βύθισης [ $U_{ret}$ , διάρκεια], παρόλα αυτά μερικά όργανα μπορούν να εμφανίσουν περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά, όπως τον μέσο όρο της τάσης κατά την διάρκεια της βύθισης. Το παράδειγμα της σχήματος μπορεί να περιγραφεί π.χ. με [209V,160ms].

Ιδιαίτερη προσοχή χρίζει το κατώφλι της βύθισης. Αντί να χρησιμοποιείται κάποια προκαθορισμένη τιμή της τάσης για τον χαρακτηρισμό της κάθε βύθισης θα μπορούσε να γίνει μια **κανονικοποίηση** σε κάποια ανοιγμένη μονάδα (όπως είναι το ανά μονάδα σύστημα).

Με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγονταν προβλήματα επαναπροσδιορισμού της βύθισης για διαφορετικές τιμές της τάσης. Επίσης σημαντική είναι η διαφοροποίηση στο κατώφλι ανάλογα με το αν ξεκινάει ή τελειώνει η βύθιση. **Το τέλος της βύθισης είναι συνήθως 1% υψηλότερα από το κατώφλι στην έναρξη της βύθισης**. Η σύμβαση αυτή έγινε για να αποφευχθεί το πρόβλημα που μπορεί να προκύψει αν η τάση κινείται σε επίπεδα οριακά σε σχέση με το κατώφλι.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται μία μονοφασική (a), μια διφασική (b) και τριφασική βύθιση (c) βύθιση της τάσης.



**Σχήμα 4** τρεις διαφορετικές τριφασικές βυθίσεις

Η διαδικασία χαρακτηρισμού μιας βύθισης γίνεται ακόμα πιο περίπλοκη όταν υπάρχουν τρεις φάσεις και / ή πολλά διαδοχικά συμβάντα βύθισης. Το ερώτημα που τίθεται σε αυτήν την περίπτωση είναι αν πρέπει να χαρακτηριστούν ως διαφορετικές

βυθίσεις ή ως ένα σύνθετο φαινόμενο βύθισης πολλαπλών φάσεων; Η απάντηση εξαρτάται από το αν η συχνότητά τους προκάλεσε ένα ή περισσότερα περιστατικά διακοπής λειτουργίας των μηχανημάτων και παράπονα πελατών.

Στην περίπτωση παροχής μέσης τάσης, θεωρήθηκε ότι οι περισσότεροι πελάτες είναι τριφασικοί και μία βύθιση στις τρεις φάσεις δεν είναι περισσότερο σοβαρή από μία βύθιση σε μία φάση. Όταν γίνονται ταυτόχρονες βυθίσεις σε διαφορετικές φάσεις, τότε η βύθιση με το μεγαλύτερο βάθος θεωρείται ως αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε για το χαρακτηρισμό – μία διαδικασία που ονομάζεται «σύζευξη φάσεων».

Όταν οι βυθίσεις γίνονται με μεγάλη συχνότητα, συνήθως ως αποτέλεσμα λειτουργίας γρήγορης ζεύξης - απόζευξης διακοπών, είναι σχεδόν απίθανο η κάθε βύθιση να προκαλέσει εκ νέου διακοπή λειτουργίας του ίδιου μηχανήματος, αφού χρειάζεται χρόνος για την επανεκκίνησή του

### **1.3.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Οι βυθίσεις τάσεως δημιουργούνται κυρίως λόγω καταστάσεων σφαλμάτων στο δίκτυο ή λόγω εξαιρετικά μεγάλων ρευμάτων που διαρρέουν στιγμιαία το δίκτυο, όπως για παράδειγμα λόγω κεραυνού που έπληξε κάποια εναέρια γραμμή μεταφοράς ή λόγω εκκίνησης κάποιων πολύ μεγάλων φορτίων<sup>1</sup>.

Βύθιση μπορεί να προκληθεί από τις βλάβες στη λειτουργία ή από το ξεκίνημα των μεγάλων φορτίων όπως οι συνδεδεμένοι DOL επαγωγικοί κινητήρες.

Πρέπει επίσης να γίνει σαφές ότι μπορεί και να προκληθούν «τοπικές» βυθίσεις είτε σε οικιακές, είτε σε εμπορικές, είτε ακόμα και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις οι οποίες συμβαίνουν λόγω της εκκίνησης κάποιων φορτίων και είναι ικανές να επηρεάσουν τον υπόλοιπο εξοπλισμό της εγκατάστασης αλλά δεν μπορούν να επηρεάσουν στην ίδια κλίμακα και γειτονικές εγκαταστάσεις.

Οι βυθίσεις λοιπόν είναι μικρής διάρκειας πτώσεις τάσης, που οφείλονται σε μικρής διάρκειας αύξησης του ρεύματος, συνήθως σε διαφορετικό σημείο από αυτό που μετράται η βύθιση. Η πιο συνήθεις λόγοι υπερεντάσεων, που οδηγούν σε βυθίσεις είναι, όπως είπαμε η εκκίνηση κινητήρων, η ενεργοποίηση μετασχηματιστών και οι καταστάσεις σφάλματος. Όμως η ζεύξη πυκνωτών και η αυτόματη και ταχεία ζεύξη και απόζευξη φορτίων με την τεχνολογία που προσφέρουν τα ηλεκτρονικά ισχύος οδηγούν σε μικρής διάρκειας υπερεντάσεις. Η διάρκεια της υπερέντασης είναι μικρή για να προκαλέσει σημαντική μείωση στην τάση. Αυτά τα γεγονότα συνήθως δεν αναφέρονται σαν βυθίσεις, αλλά σαν αιχμές (notches) ή μεταγωγικές τάσεις (transient voltages) αντίστοιχα. Από την πλευρά των τεχνικών θεωρείται πως οι βυθίσεις τάσεως εξαιτίας σφαλμάτων είναι ο λόγος της πλειοψηφίας δημιουργίας προβλημάτων στον εξοπλισμό.

Οι βυθίσεις συνήθως παρουσιάζονται σαν ανεπιθύμητες καταστάσεις στην λειτουργία του συστήματος και όχι άδικα. Μία άλλη πιο θετική οπτική όμως θα μπορούσε να τις παρουσιάσει σαν **αποτέλεσμα της μεγάλης αξιοπιστίας του συστήματος παροχής**. Χωρίς την ευρεία χρήση εξοπλισμού προστασίας, **κάθε σφάλμα θα οδηγούσε σε απώλεια της παροχής, διακοπή, για μία μεγάλη μερίδα**

**καταναλωτών.** Η προστασία **περιορίζει** σημαντικά τον αριθμό των καταναλωτών που αντιλαμβάνονται μόνιμη διακοπή. Σε πολλές περιπτώσεις προσεγγίζει το μηδέν. Κατά αυτόν τον τρόπο καταναλωτές που άλλοτε θα αντιμετώπιζαν μία μόνιμη διακοπή, **τώρα αντιμετωπίζουν μια βύθιση τάσεως.**

Αυτός ο τρόπος προστασίας αποδείχθηκε αρκετά καλός για πολλά χρόνια αλλά τελευταία όλο και περισσότερα είναι τα προβλήματα που καταγράφονται εξαιτίας αυτών των πτώσεων τάσης στους τελικούς καταναλωτές. Αυτό δεν είναι αποτέλεσμα μόνο του γεγονότος πως ο εξοπλισμός, ειδικά τα ηλεκτρονικά κυκλώματα, έχουν γίνει πιο ευαίσθητα σε πτώσεις τάσεως, αλλά και στο γεγονός πως και οι εταιρίες έχουν γίνει λιγότερο ανθεκτικές σε απώλειες λόγω διακοπής της παραγωγικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα των βυθίσεων στον εξοπλισμό των καταναλωτών παρουσιάζονται παρακάτω.

### **1.3.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

Η μείωση στην τάση οδηγεί σε μείωση στην δυνατότητα ενεργειακής μεταφοράς ενός συστήματος. *Αυτό αποτελούσε την λογική βάση της μεταβατικής σταθερότητας:* η υπόταση εξαιτίας σφάλματος οδηγεί σε μείωση της ενέργειας που μεταφέρεται από τις γεννήτριες στους κινητήρες. Οι κινητήρες επιβραδύνουν και οι γεννήτριες επιταχύνουν για να καλυφθεί το κενό στην ενέργεια.

Η βύθιση τάσης θεωρείται το ποιοτικό πρόβλημα ισχύος με την περισσότερη ανησυχία στους βιομηχανικούς πελάτες. Πολλοί διανομείς έχουν διεξάγει έρευνες στο δίκτυό τους πραγματοποιώντας υπολογισμό απλών αριθμών για να μετρήσουν την αξιοπιστία του δικτύου τους ώστε να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο.

- Να δοθούν πληροφορίες για το σωστότερο προσδιορισμό των κρίσιμων προδιαγραφών εξοπλισμού που προσφέρουν περισσότερη εμπιστοσύνη στις νέες εγκαταστάσεις ή να καθορίσουν οικονομικώς αποδοτικές τεχνικές μετριάσεως των βυθίσεων στις παλαιές εγκαταστάσεις που προκαλούν προβλήματα.
- Να δοθούν οι απαραίτητες προδιαγραφές ώστε να καταδειχθεί ένα αποδεκτό επίπεδο ποιοτικών διαταραχών ισχύος. **Ανάπτυξη διεθνών προτύπων τα οποία θα γίνουν μέρος της νομοθεσίας κάθε χώρας, ώστε να μην είναι απλά προτρεπτικά όπως είναι σήμερα.**
- Να δημιουργηθεί ένα εργαλείο μέτρησης που να αξιολογεί τα προβλήματα. Έτσι μπορούν να κριθούν σχετικά με άλλους παροχείς ενέργειας, μερικοί από τους οποίους ενδέχεται να είναι οι ανταγωνιστές τους. **Το σκεπτικό αυτό που ακούγεται σωστό για ένα καθεστώς ελεύθερης αγοράς έχει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα στα ήδη υπάρχοντα διεθνώς δεδομένα. Παντού υπάρχουν σε ελεύθερη αγορά πολλοί παροχείς, αλλά δεν υπάρχουν πολλά δίκτυα παροχής που να μπορεί κάποιος να συνδεθεί.**  
*Έτσι για την βύθιση που αποτελεί μέρος ενός συστήματος δεν σημαίνει ότι αν κάποιος κλείσει μία συμφωνία με κάποιον παροχέα ισχύος ότι η ισχύς που θα*

*καταναλώνει κάθε στιγμή θα είναι και αυτή που θα παράγει ο παραγωγός που συμφώνησε. Έτσι βύθιση είναι αναπόφευκτη και για αυτόν. Μάλιστα όπως αναπτύχθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο όταν αυξάνεται η απόσταση παραγωγού καταναλωτή (εισαγωγή ενέργειας από εξωτερικό) τότε υπάρχει σοβαρή περίπτωση να εμφανιστεί μόνιμη διακοπή σε όλο το σύστημα στην περίπτωση που χαθεί η διασύνδεση.*

- *Να δημιουργηθεί ένα σταθερό επίπεδο κανονικής ποιότητας ενέργειας ως βάση για τις συμβάσεις με τους πελάτες. Αυτό το ζήτημα το τίθεται προς απάντηση από τους καταναλωτές και στο ερωτηματολόγιο που συντάχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής.*
- *Να επιτραπούν οι συγκρίσεις των διαφορετικών μερών ενός δικτύου ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες πρακτικές επέκτασης, βελτίωσης και συντήρησης δικτύων. Και αυτό τίθεται προς απάντηση από τους καταναλωτές και στο ερωτηματολόγιο που συντάξαμε στα πλαίσια της διπλωματικής.*

Οι Ηλεκτρονόμοι και οι ημιαγωγοί μπορεί να βγουν εκτός λειτουργίας στην περίπτωση που υπάρξει βύθιση τάσης 60% για διάστημα μεγαλύτερο της μιας περιόδου. Υποθετικές καταστροφές εξαρτώνται από την ικανότητα του εξοπλισμού να αντέξει χαμηλότερη τάση για μικρή χρονική περίοδο. Ιδιαίτερα ευαίσθητες στις βυθίσεις είναι οι συσκευές των νέων τεχνολογιών. Κυκλώματα οδήγησης (electronic drives), μετατροπείς και συσκευές με ψηφιακή είσοδο (τύπου 0 και 1, δηλαδή 0V και 5V) είναι επίσης ευαίσθητα στις βυθίσεις.

*Στην επαναφορά μετά από βύθιση οι ασύγχρονοι κινητήρες θα τραβήξουν μεγαλύτερο ρεύμα από το ρεύμα εκκίνησης τους. Αυτό αποτελεί και μία από τις σοβαρότερες αιτίες δημιουργίας προβλημάτων λόγω των βυθίσεων, αφού τα επαγωγικά φορτία θα απαιτήσουν μεγαλύτερο ρεύμα κατά την επανεκκίνηση τους και θα προκαλέσουν περαιτέρω πτώση τάσης, οξύνοντας το πρόβλημα και οδηγώντας σε διακοπή της παροχής, αφού ο διαχειριστής του συστήματος αναγκάζεται να βγάλει εκτός κάποιες γραμμές (συνήθως ολόκληρες περιοχές οικιακών καταναλωτών) προκειμένου να είναι εφικτή η αποκατάσταση της τάσης στα φυσιολογικά επίπεδα. Εν συνεχεία ο διαχειριστής εισάγει σταδιακά τα φορτία ανά περιοχή για αποφευχθεί το ίδιο πρόβλημα.*

## **ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ**

Αρκετές συσκευές που περιέχουν σύγχρονη τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος, όπως είναι οι υπολογιστές, ελεγκτές και οδηγοί μεταβλητής ταχύτητας, PLC, κ.α. ήδη παρουσιάζουν πρόβλημα στην λειτουργία τους όταν η τάση πέσει κάτω από το 85% για πάνω από 40ms. Αυτό είναι αποτέλεσμα των διακοπών παροχής ρεύματος (SMPS) που είναι σύνηθες κομμάτι στο μπροστινό μέρος των ηλεκτρονικών μηχανημάτων. Τα σημαντικά τους εξαρτήματα είναι η γέφυρα ανορθωτή πλήρους κύματος και ο πυκνωτής εξομάλυνσης για την τάση συνεχούς ρεύματος, που περνάει από το επόμενο στάδιο του κυκλώματος. Κατά τη διάρκεια μίας μεγάλης βύθισης, η παροχή δεν είναι αρκετή για να φορτίσει τον πυκνωτή, του οποίου η τάση αντίστοιχα μειώνεται από το ρεύμα που απορροφάται από το επόμενο στάδιο. Εάν η διάρκεια της βύθισης είναι αρκετά μεγάλη, η τάση του πυκνωτή θα πέσει πολύ χαμηλά για να

υπάρχει σωστή λειτουργία και θα μειωθεί η απόδοσή του ή θα δυσλειτουργήσει. Η μέγιστη διάρκεια βύθισης κατά την οποία μπορεί να υπάρξει σωστή λειτουργία εξαρτάται από το μέγεθος του πυκνωτή, το ρεύμα που τραβάει και τα περιθώρια αποδεκτής τάσης του, και μπορεί να είναι 1 – 20 κύκλοι για τα ηλεκτρονικά μηχανήματα. Στην περίπτωση των ψηφιακών ρολογιών, το περιθώριο είναι μεγαλύτερο, από 1 – 10 δευτερόλεπτα.

## **ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**

Οι επαγωγικοί κινητήρες συνδεδεμένοι σε σειρά μπορούν να παρουσιάζουν προβλήματα στη λειτουργία τους ή να αποκλίνουν από την αποδεκτή ταχύτητα σε βυθίσεις διάρκειας από 10 κύκλους έως κάποια δευτερόλεπτα. Η συμπεριφορά τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μηχανικού φορτίου. Όταν τελειώσει η βύθιση, ***η μειωμένη ταχύτητα του κινητήρα τραβάει μεγαλύτερο ρεύμα, το οποίο μπορεί να μειώσει την επαναφορά της τάσης. Για το λόγο αυτό, οι επιπτώσεις της βύθισης σε μια βιομηχανική εγκατάσταση μπορούν να βελτιωθούν με την αποσύνδεση όλων των μη κυρίων κινητήρων υπό δεδομένες συνθήκες.***

Οι αυτόματοι εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πολύ ευαίσθητοι και ανέχονται 60% τάση για μόνο λίγους κύκλους πριν σταματήσουν να λειτουργούν. Προτείνεται η αντικατάστασή τους από ειδικούς, κατάλληλους αυτόματους συνεχούς ρεύματος, καθώς αποτελεί τρόπο βελτίωσης της απόδοσης της εγκατάστασης κατά τη βύθιση.

### **1.3.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

Αυτό που πρέπει να αποφευχθεί σε αυτήν την περίπτωση είναι το τριπάρισμα (βγαίνουν εκτός λειτουργίας, *tripping*) του εξοπλισμού εξαιτίας των βυθίσεων.

- ***Μείωση αριθμού των σφαλμάτων.*** Υπάρχουν πολλές γνωστές μέθοδοι για αυτό (βασισμένοι στις αιτίες πρόκλησης σφαλμάτων), όπως: tree-trimming, οδηγοί ζώων και προστατευτικά σύρματα, όπως και αντικατάσταση των υπέργειων από υπόγειες καλωδιώσεις. Αφού οι σοβαρότερες από τις βυθίσεις προκαλούνται από σφάλματα αυτός ο τρόπος θα επηρεάσει άμεσα την συχνότητα εμφάνισης των βυθίσεων.
- ***Ταχύτεροι τρόποι εκκαθάρισης σφαλμάτων.*** Αυτό απαιτεί βελτίωση των τεχνικών προστασίας και των συσκευών που χρησιμοποιούνται για την προστασία. Μεγάλο κέρδος από αυτήν την μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί στα δίκτυα διανομής, αλλά στο επίπεδο της μεταφοράς ο χρόνος εκκαθάρισης είναι ήδη πολύ μικρός. Περαιτέρω βελτίωση στο επίπεδο μεταφοράς μπορεί να απαιτεί την ανάπτυξη μίας νέας γενιάς κυκλωμάτων διακοπών και ηλεκτρονόμων.
- ***Βελτιωμένη σχεδίαση και λειτουργία του δικτύου.*** Το δίκτυο μπορεί να αλλάξει έτσι ώστε ένα σφάλμα να μην οδηγήσει σε σοβαρή βύθιση σε μία τοποθεσία. Αυτό ήταν συνήθης πρακτική στο σχεδιασμό των εργοστασιακών εγκαταστάσεων, αλλά όχι και σε αυτό του δημόσιου δικτύου. Πιθανή επιλογή είναι η απομάκρυνση μεγάλου μήκους υπέργειων τροφοδοσιών από ζυγούς που τροφοδοτούν ευαίσθητα φορτία και η σύνδεση (on-site generators) γεννήτριες σε στρατηγικής σημασίας τοποθεσίες. Επίσης η χρήση πολύ γρήγορων



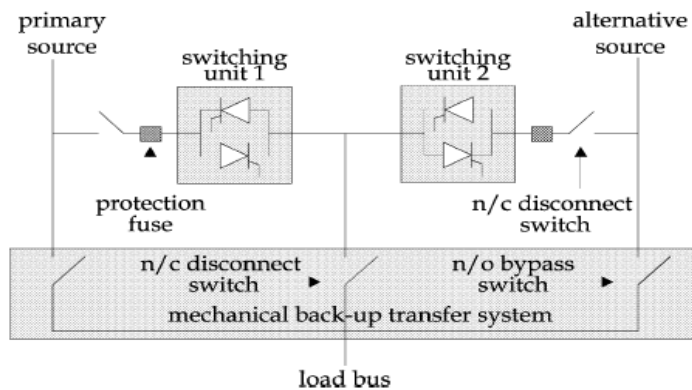
διακοπών (*fast transfer switches*) μπορεί να θεωρηθεί σαν μία λύση από πλευράς δικτύου.

- **Βελτίωση του εξοπλισμού στην διασύνδεση.** Η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της βύθισης τάσεων είναι η σύνδεση UPS ή μετασχηματιστών σταθερής τάσης στο δευτερεύον μεταξύ συστήματος και ευαίσθητων φορτίων. Για μεγάλα φορτία οι στατοί πυκνωτές αντιστάθμισης (αναλύονται στην εξομάλυνση φλίκερ και αρμονικών) της δυναμικής αποκατάστασης τάσης (DVR Dynamic Voltage Restorer) είναι μία πιθανή λύση.
- **Βελτιωμένος εξοπλισμός στον τελικό καταναλωτή.** Κάνοντας τον εξοπλισμό πιο ανθεκτικό σε όλες τις βυθίσεις θα ήταν επίσης μια λύση του προβλήματος αλλά δεν είναι ακόμα για τον περισσότερο εξοπλισμό εφικτό.

Η συζήτηση που είναι σε εξέλιξη για την βελτίωση των προβλημάτων από βυθίσεις αφορά τον καταλογισμό ευθύνης μεταξύ καταναλωτών και δικτύου: θα έπρεπε η λύση να αναζητηθεί στην πλευρά του δικτύου ή του καταναλωτή; Σε μερικές των περιπτώσεων το κόστος του εξομαλυντικού εξοπλισμού διαμοιράζεται. Σε άλλες υπάρχουν συμβόλαια που αφορούν την ποιότητας ισχύος καθορίζουν την ευθύνη. Σε βάθος χρόνου πρέπει να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ του τι είναι 'κανονικές βυθίσεις' και τι 'μη-επιτρεπτές'. Μετά να γίνει προσπάθεια ώστε για κανονικές βυθίσεις ο εξοπλισμός του τελικού χρήστη να αναμένεται να είναι ανθεκτικός, ενώ οι μη-επιτρεπτές βυθίσεις θα πρέπει να έχουν μικρή συχνότητα

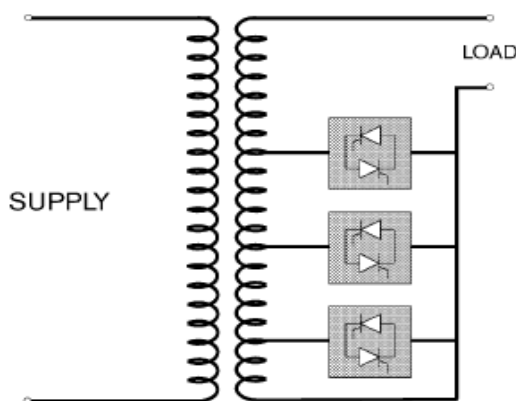
Πέραν των παραπάνω γενικών κατηγοριών παραθέτουμε και επιγραμματικά κάποιες λύσεις.

- **Στατοί αντισταθμιστές σειράς (Static Series Compensator).** Το SSC είναι ένα VSC (Voltage Source Converter) συνδεδεμένος εν σειρά με μια πηγή διαταραχών, που παρέχει ελεγχόμενη πηγή τάσης, η οποία αν προστεθεί στην τροφοδοσία μπορεί να προκύψει η επιθυμητή τάση.
- **Στατοί χειρισμοί στην μεταφορά (Static Transfer Switch).** Οι STS αποτελούνται από δύο ηλεκτρονικούς τριφασικούς διακόπτες, όπου ο καθένας αποτελείται από δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ ανά φάση. Κανονικά ο στατός διακόπτης στην πηγή πυροδοτείται κανονικά, ενώ ο άλλος είναι εκτός. Κατά την διάρκεια της διαταραχής της τάσης, ο STS χρησιμοποιείται για να μεταφέρει από την επιλεγμένη πηγή σε μία εναλλακτική πιο υγιή πηγή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αντιμετώπιση τόσο των βυθίσεων όσο και της διακοπής με μεγάλη επιτυχία, μειώνοντας ουσιαστικά την διάρκεια τους που γίνεται αντιληπτή στο φορτίο.



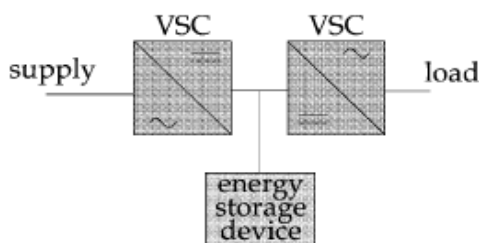
Σχήμα 5 δομή του STS σε μία φάση

- Καλή λύση του προβλήματος που ήδη εφαρμόζεται και στις βιομηχανίες αποτελούν ηλεκτρονικοί tap-changer που μπορούν να συνδεθούν σε μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ευαίσθητα φορτία, ώστε να μπορεί να αλλάζει τον λόγο ανάλογα με την τάση που δέχεται στην είσοδο. Αυτό δίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα.. Αυτός ο μηχανισμός καλείται στατός ρυθμιστής τάσης (*Static Voltage Regulator*).



Σχήμα 6 SVR

- Μία κλασική λύση είναι τα UPS (Uninterrupted Power Supply) τα οποία και χρησιμοποιούνται για προστασία τόσο βυθίσεων όσο και διακοπών, αφού παρέχουν αυτονομία για κάποια λεπτά μέχρι να επανέλθει η τάση σε φυσιολογικά επίπεδα. Η δομή τέτοιων διατάξεων αδιάλειπτης λειτουργίας φαίνεται στο Σχήμα



Σχήμα 7 συσκευή αδιάλειπτης παροχής

### 1.3.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟ ΕΡΕΥΝΑ

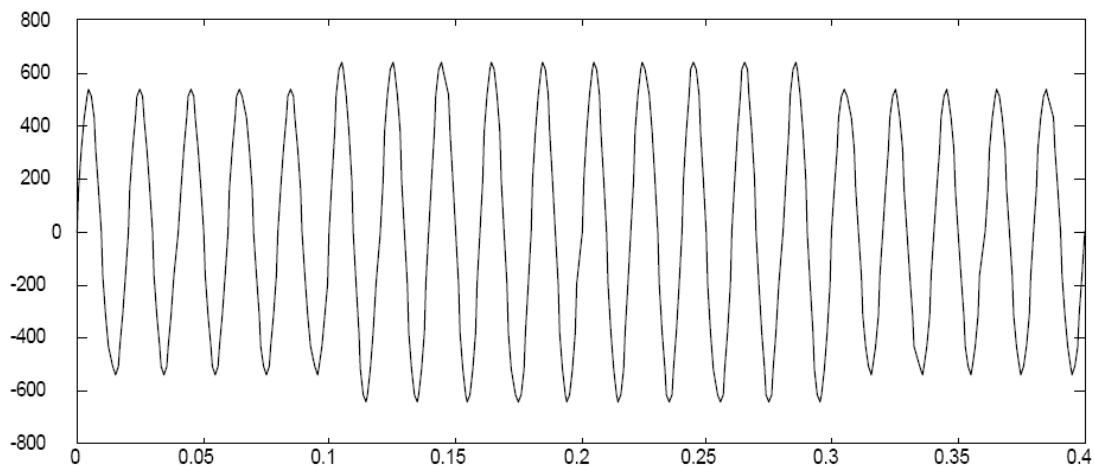
Έρευνες πάνω στις βυθίσεις συμπεριλαμβάνουν μελέτες για εξομαλυντικό εξοπλισμό και την βελτίωση του εξοπλισμού του τελικού χρήστη. Επίσης περιλαμβάνει εκπαίδευση σχετική με την έρευνα μεταξύ συχνότητας βυθίσεων και σχεδιασμού και λειτουργία του συστήματος. Πρωταρχική έρευνα χρειάζεται για τα χαρακτηριστικά των βυθίσεων και τους δείκτες για την μέτρηση τους. Έρευνα χρειάζεται ειδικά για ανάπτυξη μεθόδων για συστημάτων εξαγωγής δεικτών, με περιορισμένο αριθμό μετρήσεων και μεθόδων κατάλληλα εφαρμόσιμων για κάθε δείκτη. Σχετική δουλειά χρειάζεται για την εξαγωγή πρόσθετων πληροφοριών από τις καταγεγραμμένες βυθίσεις. Αυτή είναι μία από τις πιθανές εφαρμογές για τεχνικές ανάλυσης σήματος.

Βασική έρευνα επίσης χρειάζονται για στοχαστικές μεθόδους πρόβλεψης, συμπεριλαμβανομένου μεγάλου αριθμού συγκρίσεων με αποτελέσματα μετρήσεων για να βρεθούν τα καταλληλότερα όρια στην στοχαστική πρόβλεψη. Η περισσότερη δουλειά στις επιπτώσεις των βυθίσεων έχουν κατευθυνθεί προς τους ελεγκτές μεταβαλλόμενης ταχύτητας των κινητήρων (adjustable speed drives).

## **ΠΑΡΟΔΙΚΗ ΥΠΕΡΤΑΣΗ (SWELL)**

### **1.4.0 ΓΕΝΙΚΑ**

Οι παροδικές υπερτάσεις (**swells**) είναι στιγμιαίες ανυψώσεις της τάσης (αντίθετα στις βυθίσεις). Οι ίδιοι παράμετροι για κατηγοριοποίηση των βυθίσεων χρησιμοποιούνται και για την κατηγοριοποίηση των παροδικών ανυψώσεων.



**Σχήμα 8:** Γραφική αναπαράσταση παροδικής υπέρτασης (swells)

### **1.4.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Η εμφάνιση των υπερτάσεων οφείλεται σε μονοφασικά σφάλματα ως προς γη (**single line ground failure SLG**), σε ανάστροφη διάσπαση (**upstream failure**), αποσύνδεση ενός μεγάλου φορτίου από το δίκτυο ή σύνδεση μεγάλων σε χωρητικότητα συστοιχιών πυκνωτών.

### **1.4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

Επειδή οι παροδικές υπερτάσεις διαρκούν πολύ σύντομο χρονικό διάστημα δεν προκαλούν σημαντικά προβλήματα στα φορτία. Παρόλα αυτά, υπάρχει περίπτωση να καούν οι λάμπες πυρακτώσεως και να σπάσει το γυαλί τους καθώς επίσης και να προκύψουν πολλά προβλήματα ασφαλείας.

### **1.4.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

Τρόποι επίλυσης θα μπορούσε 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.

## **ΔΙΑΚΟΠΕΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ**

### **1.5.0 ΓΕΝΙΚΑ**

Μία μόνιμη διακοπή μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ‘η απομόνωση του δικτύου από την πηγή παροχής ισχύος στο δίκτυο’. Λόγω του παραμένουτος μαγνητισμού (συσσωρευμένη ενέργεια στο δίκτυο) παρατηρείται μία μικρή τάση πάνω από το μηδέν για μικρό διάστημα αφού συνέβη η διακοπή της τάσης. Για αυτό το λόγο και η διακοπή προσδιορίζεται σαν μία πτώση της ενεργού τιμής της τάσης κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Το κατώφλι αυτό μπορεί να κυμαίνεται αλλά συνήθως είναι 1%, 5% ή 10% της καθορισμένης τάσης (συνήθως της ονομαστικής). Η διάρκεια μιας διακοπής μετριέται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που μετράμε και την διάρκεια των βυθίσεων με διαφορετικό προφανώς κατώφλι σε αυτή τη περίπτωση.

Λόγω των τεχνικών μέτρησης ένα σύντομο σφάλμα στο κύκλωμα μπορεί να εμφανισθεί σαν σύντομη διακοπή σε ένα τμήμα του δικτύου και σαν βύθιση σε ένα άλλο (στο ένα σημείο του δικτύου η τάση αποκαθίσταται νωρίτερα από ότι στο άλλο).

Τις διακοπές της τάσης τις κατηγοριοποιούμε σε δύο κατηγορίες:

- Σύντομες διακοπές (*short interruption*) ή Παροδικές Διακοπές (*momentary interruption*)
- Μόνιμες διακοπές (*long interruption*)

### **1.5.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Σύντομες διακοπές παρουσιάζονται στο δίκτυο σε καταστάσεις σφαλμάτων, που αναγκάζουν το διακοπτικό εξοπλισμό να λειτουργήσει. Για αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιούνται σύνθετες διαδικασίες επανάζευξης για να αποφεύγεται αυτό το φαινόμενο. Η διάρκεια μίας σύντομης διακοπής μπορεί να κυμαίνεται μέχρι 1 έως 3 λεπτά ανάλογα με την διαδικασία επανάζευξης (*reclosing operation*), τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται ή τη συμφωνία μεταξύ καταναλωτή και παραγωγού.

Μόνιμη διακοπή θεωρείται οποιαδήποτε διακοπή ξεπερνάει σε χρόνο τα όρια που έχουν τεθεί για τις σύντομες διακοπές. Παρουσιάζονται όταν μία κατάσταση σφάλματα δεν μπορεί να επιλυθεί με την διαδικασία προστασίας και οδηγείται στην οριστική έξοδο του διακόπτη .

### **1.5.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

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.

Οι νέες τεχνολογίες επηρεάζονται με δύο τρόπους. Πρώτον τα υπάρχοντα δεδομένα μπορεί να χαθούν και το σύστημα να καταστραφεί. Δεύτερον μετά το πέρας της διακοπής, η διαδικασία επανεκκίνησης, ειδικά σε ένα μεγάλο και πολύπλοκο σύστημα, μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες. Εξαιτίας των παραπάνω λόγων σημαντικά υπολογιστικά συστήματα και τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός πρέπει να προστατεύονται επιπλέον και από σύστημα **UPS (Uninterrupted Power Supply)**, που κρατούν την τάση σε σταθερό επίπεδο ακόμα και για μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να αποκατασταθεί η τάση του δικτύου. (ή μέχρι να μπορέσει ο χρήστης να θέσει σε λειτουργία κάποια εφεδρική πηγή τροφοδοσίας ή να τερματίσει το σύστημα με ασφάλεια)

### **1.5.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τους τρόπους επίλυσης ενός προβλήματος θα πρέπει πρώτα να κατανοηθούν οι αιτίες δημιουργίας του φαινομένου.

Οι αιτίες πρόκλησης διακοπής είτε προσωρινής είτε μόνιμης δεν διαφέρουν και πολύ από αυτές των βυθίσεων. Πολλές φορές, δε, συνεχόμενες βυθίσεις είναι υπεύθυνες για την πρόκληση διακοπών. Χαρακτηριστικό ότι οι διακοπές δεν είναι τίποτα άλλο από βυθίσεις που δεν μπόρεσαν να αντιμετωπιστούν ([11]). Για τον λόγο αυτό όλες οι μέθοδοι που προτάθηκαν για την βελτίωση των προβλημάτων από βυθίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την επίλυση των μόνιμων διακοπών.

Ένας διαφορετικός τρόπος σκέψης είναι εκ του αποτελέσματος. Να προτείνουμε λύσεις βασισμένες στα προβλήματα που δημιουργούνται από τις διακοπές:

- Παράλληλη χρήση HZ (Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος) με μπαταρία και το δίκτυο. Θα τροφοδοτεί αυτό το φορτίο μέσω ενός ρελέ στην περίπτωση που έχουμε διακοπή ρεύματος.
- Μπαταρίες υγρών. (όπως αυτές του αυτοκινήτου) Δεν προτείνονται για μακράς διάρκειας χρήση, αλλά μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες για κάποιες ώρες μέχρι την αποκατάσταση της βλάβης.

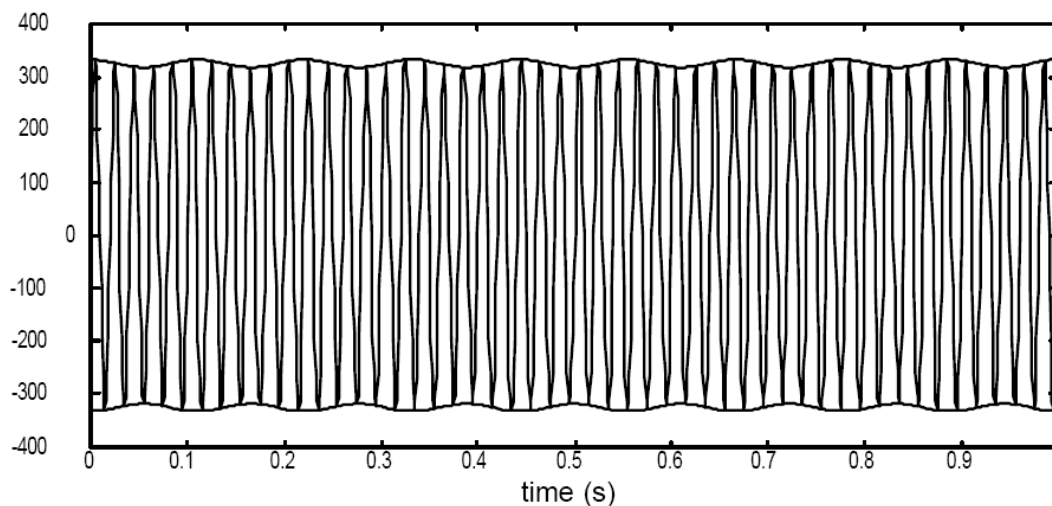
- Εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών που να δουλεύουν σε παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο της ΔΕΗ ή και ανεξάρτητα με α αντίστοιχα προβλήματα ευστάθειας.
- Τροφοδότηση του καταναλωτή με δύο ανεξάρτητες γραμμές τροφοδοσίας από τον διανομέα.

## **FLICKER**

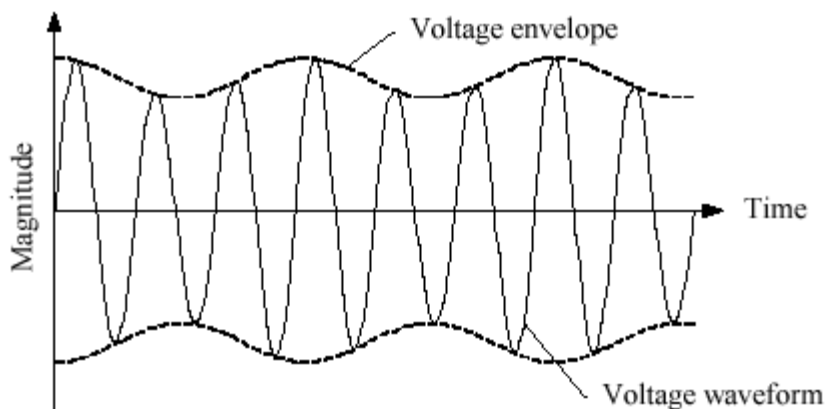
### **1.6.0 ΓΕΝΙΚΑ**

Το φλίκερ ή αλλιώς γρήγορη διακύμανση της τάσης που οδηγεί σε τρεμόπαιγμα στο φως είναι μία οπτική ενόχληση λόγω αστάθειας της έντασης του φωτός (τρεμόπαιγμα). Το επίπεδο της ενόχλησης εξαρτάται από την συχνότητα και το πλάτος της αλλαγής της έντασης του φωτός και από τον παρατηρητή (δεν αντιλαμβανόμαστε όλοι την ίδια ενόχληση στην ίδια διακύμανση της τάσης).

Αλλαγή της ροής του φωτός μπορεί να συνδυαστεί με την κυμάτωση του πλάτους όπως φαίνεται και στην παρακάτω



**Σημα 9** διακύμανση της τάσης που οδηγεί σε τρεμόπαιγμα στο φως



## Σχῆμα 10 χαρακτηριστικά κυματομορφής φλίκερ

Στο Σχῆμα το πλάτος της διακύμανσης της τάσης λαμβάνει ημιτονοειδή μορφή όπως φαίνεται και στο σχῆμα με τον ὄρο περίγραμμα (envelope). Ωστόσο, οι αλλαγές της τάσης μπορούν επίσης να ἔχουν ορθογώνιο ἢ ακανόνιστο σχῆμα. Το προφίλ των αλλαγών τάσης θα εξαρτηθεῖ ἀπὸ τὸ ρεύμα που καταναλώνεται ἀπὸ τὸ κυμαινόμενο φορτίο.

Τὸ φλίκερ μετρεῖται σύμφωνα με τὰ στάνταρτ IEC 61000-4-15 “flickermeter-function and design specifications”. Βασίζεται σε μία 230V/60W σῆμα –λαμπτήρας – αισθητήρια οφθαλμοῦ –διέγερση εγκεφαλικῶν κύτταρων (*lamp-eye-brain chain response*).

**Φλικερόμετρο** εἶναι ἓνα ὄργανο σχεδιασμένο να μετράει οποιαδήποτε ποσότητα αντιπροσωπεύει τὸ φλίκερ (IEV 161-08-14). Μετράει τὴν διακύμανση τῆς τάσης, πραγματοποιεῖ φιλτραρισμένους υπολογισμούς και παρέχει δύο δείκτες για τὸ φλίκερ, τὸν σύντομης διάρκειας (*short-term*) Pst και αὐτὸν μακρῆς (*long-term*) Plt.

**Δείκτης φλίκερ σύντομης διάρκειας (short-term flicker indicator)** ἔχει τιμὴ ἴση με μονάδα για διακύμανση τῆς φωτεινότητας που ἦταν ενοχλητικὴ για τὸ 50% τοῦ κοινού. Ἡ μέτρηση αὐτοῦ τοῦ δείκτη γίνεται για διάστημα 10 λεπτῶν.

**Δείκτης φλίκερ μακρῆς διάρκειας (long-term flicker indicator)** υπολογίζεται ἀπὸ τοὺς τελευταίους 12 σύντομης διάρκειας δείκτες, δηλαδή στο διάστημα τῶν τελευταίων 2 ὡρῶν ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=0}^{11} P_{st}(i)^3}$$

### 1.6.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ

Κύρια πηγή δημιουργίας τοῦ φαινομένου τῆς διακύμανσης τῆς τάσης εἶναι τὰ ηλεκτρικὰ τόξα τῶν ηλεκτρικῶν κλιβάνων, οἱ μηχανές συγκόλλησης και παρόμοια «βαριά» φορτία που καταναλώνουν ρεύματα με μεγάλη διακύμανση. Φλίκερ μπορεί να εμφανιστεῖ με τὴν παρουσία ἐνδιάμεσων αρμονικῶν σε μία συχνότητα κοντὰ στὴν θεμελιώδη ἢ και σε αρμονικὴ.

Οἱ διακυμάνσεις τάσεως προκαλοῦνται ὅταν τὰ φορτία καταναλώνουν ρεύματα που ἔχουν σημαντικὲς αἰφνίδιες ἢ περιοδικές διακυμάνσεις. Τὸ κυμαινόμενο ρεύμα που καταναλώνεται ἀπὸ τὴν παροχὴ προκαλεῖ πρόσθετες μειώσεις τάσεως στο σύστημα τροφοδοσίας, που οδηγοῦν σε διακυμάνσεις τῆς παρεχόμενης τάσης. Τὰ φορτία που παρουσιάζουν συνεχεῖς, γρήγορες διακυμάνσεις εἶναι λοιπὸν ἐκεῖνα που πιθανότατα θα προκαλέσουν διακυμάνσεις τάσεως. Παραδείγματα φορτίων που μπορούν να παράγουν διακυμάνσεις τάσεως στὴν παροχὴ εἶναι:

- Ηλεκτρικοὶ κάμινοι
- Ηλεκτροσυγκολλητές
- Εγκαταστάσεις με συχνές ἐκκινήσεις κινητῆρων (μονάδες κλιματισμοῦ, ανεμιστήρες)

- Μηχανισμοί κινητήρων με κυκλική λειτουργία (βαρούλκα ναρκών, ελασματοουργεία)
- Μηχανήματα με μεγάλες αλλαγές ταχύτητας των κινητήρων (πριόνια, μηχανήματα διάλυσης αυτοκινήτων)

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.

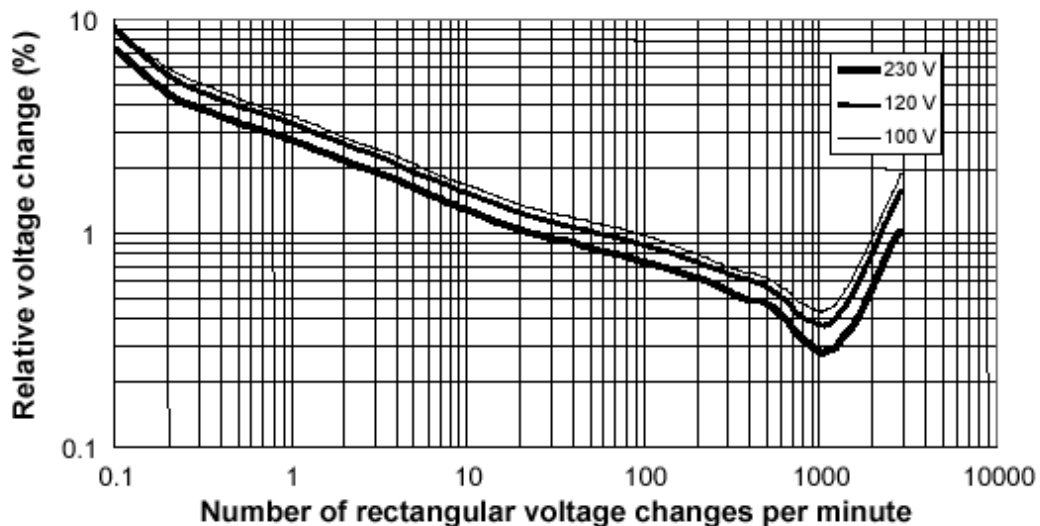
Σημαντική πηγή δημιουργίας φλίκερ είναι τα αιολικά πάρκα λόγω του φαινομένου της σκίασης του πύργου βάσης όπου μειώνεται η ταχύτητα (ή καλύτερα η ροπή της έλικας κάθε φορά που περνάει μπροστά από τον πύργο λόγω του ότι ο τελευταίος εμποδίζει τον άνεμο να κινηθεί όπως κατά την απουσία του).

#### **1.6.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

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. Η ευαισθησία στον ερεθισμό από το τρεμοπαίξιμο των λαμπών είναι διαφορετική για κάθε άτομο. Από τεστ που έχουν γίνει έχει φανεί ότι γενικά το ανθρώπινο μάτι είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην διακύμανση της κυματομορφής με συχνότητα περίπου 6-8 Hz. Ωστόσο, φλίκερ που προκαλούνται από διακύμανση της τάσης με συχνότητα 9Hz θεωρούνται ενοχλητικά μόλις το 0.2% αυτών.

Οι διακυμάνσεις τάσεως μπορεί επίσης να προκαλέσουν εσφαλμένη ενεργοποίηση των ρελέ, να κάνουν παρεμβολές στα μηχανήματα επικοινωνίας και να θέσουν εκτός λειτουργίας τα ηλεκτρονικά μηχανήματα. Σοβαρές διακυμάνσεις, σε μερικές περιπτώσεις, μπορούν να εμποδίσουν άλλα φορτία να ξεκινήσουν λόγω της μείωσης της παρεχόμενης τάσης. Επιπλέον, οι επαγωγικοί κινητήρες που λειτουργούν στη μέγιστη στροφορμή τους μπορεί να καθυστερήσουν, αν οι διακυμάνσεις της τάσης είναι σημαντικού μεγέθους.





*Σχημα 11* Καμπύλη ‘τρεμοπαίγματος’ για ορθογώνια διαμορφωμένες συχνότητες

Οι διακυμάνσεις τάσεως στο δημόσιο σύστημα παροχής ρεύματος χαμηλής τάσης πρέπει να είναι μέσα στα αποδεκτά όρια που έχουν τεθεί. Γενικά τα αποδεκτά όρια διακυμάνσεων τάσης είναι κάτω από την καμπύλη μαρμαρυγής που απεικονίζεται στο Σχήμα. Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα οι καμπύλες που παρουσιάζονται είναι μετά από στατιστικά στοιχεία (όπως ακριβώς αναφέραμε ότι προκύπτει συμβατικά ο ορισμός του συντελεστή για το φλίκερ ίσως με την μονάδα) δείχνουν το όριο μέχρι το οποίο μπορεί να επιτρέπεται η διακύμανση της τάσης. Έτσι αν ο δείκτης για το φλίκερ είναι πάνω από την καμπύλη τότε είναι εκτός ορίων ενώ αν είναι κάτω τότε εντός. Όπως παρατηρούμε και από την επεξήγηση των αξόνων η καμπύλη είναι μία συνάρτηση των επί τοις εκατό αλλαγών της τάσης σε σχέση με την συχνότητα των αλλαγών ή αλλιώς με τον αριθμό των αλλαγών σε χρόνο ενός λεπτού.

### 1.6.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

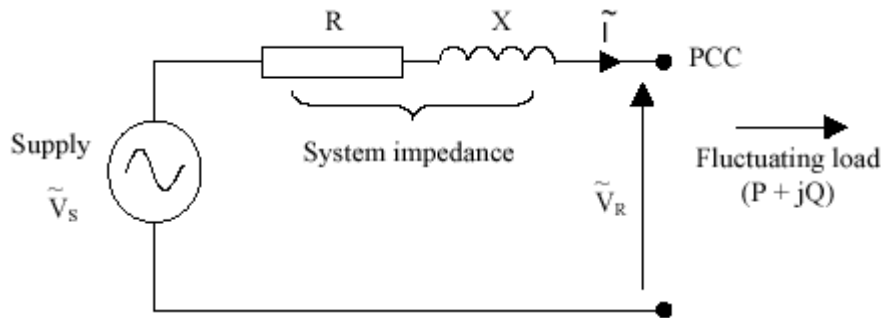
Αν ήθελε κανείς να προσπαθήσει να λύσει το πρόβλημα της ύπαρξης φλίκερ θα έπρεπε να καταφέρει να λύσει το πρόβλημα της κατανάλωσης απότομα και με μεγάλη διακύμανση τόσο αέργου όσο και ενεργού ισχύος.

Φανταστείτε το απλό μοντέλο που αναπαριστά ένα κυμαινόμενο φορτίο που καταναλώνει πραγματική ισχύ  $P$ , και ισχύ από φανταστική  $Q$ , συνδεδεμένο με ένα σύστημα τροφοδοσίας με εμπέδηση αντίστασης  $R$ , και αντίδρασης  $X$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα**. Η τάση  $V_R$  που βλέπει ο πελάτης συνήθως μπορεί να ρυθμιστεί λειτουργώντας το σύστημα τάσης  $V_S$  σε ελαχίστως μεγαλύτερη τιμή, ώστε να διασφαλιστεί το  $V_R$  θα παραμείνει στην απαιτούμενη τιμή, π.χ. 230 V σε ένα μονοφασικό σύστημα.

Κατά τη διάρκεια σταθερής λειτουργίας αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αυτόματων ασφαλειών στους μετασχηματιστές, αντισταθμιστές γραμμής και **ρυθμιστές τάσης** (κυρίως ρυθμιστές τάσης με άμεση απόκριση). Για πιο γρήγορες αλλαγές στο ρεύμα του φορτίο, η λειτουργία τέτοιων συσκευών δεν είναι αρκετά

γρήγορη για να ρυθμίσει αποτελεσματικά την τάση και να παραμείνει αυτή στην ίδια τιμή.

Η τάση που προκύπτει από το ρεύμα που τραβάει το φορτίο απεικονίζεται στο φασικό διάγραμμα του Σχήματος 4 όπου  $V_S$  είναι η παρεχόμενη τάση και  $V_R$  η τελική τάση που φαίνεται στο φορτίο στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC).



Σχήμα 12 Απλό μοντέλο ενός συστήματος ισχύος

Η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από το κυμαινόμενο φορτίο και τους φάσορες τάσης μπορεί να περιγραφεί με τις παρακατω εξισώσεις

$$\tilde{V}_R \tilde{I}^* = P + jQ$$

$$\tilde{V}_S = \tilde{V}_R + \tilde{I}(R + jX)$$

Αναλύοντας την παραπάνω εξίσωση (για τους φάσορες τάσης, προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$\tilde{V}_S = \tilde{V}_R + (I_d - jI_q)(R + jX) \quad (3)$$

$$= (V_R + R I_d + X I_q) + j(X I_d - R I_q) \quad (4)$$

Αγνοώντας

τις διαφορές φάσης μεταξύ  $V_R$  και  $V_S$  στην εξίσωση και εξισώνοντας μόνο τα πραγματικά μέρη

$$V_S = V_R + R I_d + X I_q \quad (5)$$

Υποθέτοντας ότι το  $V_S$  είναι ένα άπειρο δίκτυο, αυτό σημαίνει ότι το  $V_S$  παραμένει σταθερό ότι φορτίο και να συνδέσουμε σε αυτό, άρα παραμένει σταθερό παρά το ρεύμα που καταναλώνεται από το κυμαινόμενο φορτίο, για όποιες αλλαγές στα  $I_d$  και  $I_q$ , οι αλλαγές στο  $V_R$  θα είναι ο εξής:

$$0 = \Delta V_R + R \Delta I_d + X \Delta I_q$$

$$\Delta V_R = - (R \Delta I_d + X \Delta I_q)$$

Η εξίσωση (μπορεί να ξαναγραφεί ανά μονάδα, π.χ. με βάση τις αλλαγές στην πραγματική ή φανταστική ισχύ που καταναλώνει το κυμαινόμενο φορτίο

$$\Delta V_R = - (R \Delta P + X \Delta Q)$$

Εάν το R είναι αμελητέο, τότε η αντίδραση  $X = 1 / \text{επίπεδο λάθους}$  (για την ακρίβεια  $Z = \frac{1}{\text{σταθμηβραχυκύκλωσης}}$ , όπου στάθμη βραχυκύκλωσης είναι ίση με το επίπεδο σφάλματος στο συγκεκριμένο σημείο), οδηγεί στην παρακατω εξίσωση

$$\Delta V_R = - \Delta Q / \text{Fault level}$$

Παρατηρείται με αυτό τον τρόπο ότι η τάση στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης είναι ουσιαστικά συνάρτηση της διακυμάνσης της φανταστικής ισχύος του φορτίου και των χαρακτηριστικών του συστήματος παροχής. Σημειώστε ότι για συστήματα χαμηλής τάσης, όπου το R είναι σημαντικά μεγαλύτερο, η πραγματική ισχύς μπορεί επίσης να συμβάλλει σημαντικά στις διακυμάνσεις της τάσεως (όμως πρέπει να πούμε ότι το φλίκερ δημιουργείται από φορτία που καταναλώνουν ισχύ συνδεδεμένα στην μέση τάση).

Έτσι μετά από αυτή την ανάλυση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αν θέλει κάποιος να ελέγξει τις διακυμάνσεις της τάσης πρέπει να χρησιμοποιήσει εξοπλισμό τέτοιο που να μπορεί να ελέγξει δυναμικά και ανά πάσα στιγμή την κατανάλωση άεργου ισχύος και να μπορέσει να την περιορίσει αν όχι να την εξαλείψει.

Για την εξάλειψη της παρουσίας των φλίκερ μία σειρά από μεθόδους έχουν παρουσιασθεί κι διαφέρουν σε αποτελεσματικότητα, κόστος και αν είναι εφαρμόσιμες στην εκάστοτε περίπτωση. Γενικά οι μέθοδοι που έχουν προταθεί μπορούν να διαχωριστούν σε άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Κυρίως φλίκερ δημιουργούν οι κλίβανοι και γι' αυτούς και έχουν αναπτυχθεί και οι περισσότερες λύσεις. Με την ανάπτυξη που έχουν όμως τα αιολικά πάρκα και με τα επίπεδα φλίκερ που εισάγουν κάποιες από τις μεθόδους προσπαθούν να απευθύνονται και στις δύο κυριότερες πηγές δημιουργίας. Οι άμεσες μέθοδοι έχουν συσκευές που συνδέονται απευθείας με τον κλίβανο, ενώ οι έμμεσες δεν επεμβαίνουν πάνω στο τόξο, όμως κόβουν τις παρενέργειες αυτού με κάποιες συσκευές που συνδέονται παράλληλα. Τρόποι να μειωθεί το φλίκερ δίνονται παρακάτω:

- Προσεκτικός έλεγχος της ισχύος εισόδου στο τόξο. Ειδικοί μετασχηματιστές έχουν χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση των κλιβάνων.
- Ενίσχυση του δικτύου θα ήταν ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, όμως είναι αρκετά ακριβή μέθοδος και χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις επέκτασης των εγκαταστάσεων του κλιβάνου, χωρίς να σημαίνει ότι είναι και εφαρμόσιμη μέθοδος εξαιτίας περιβαλλοντικών λόγων.
- Ρυθμιστές του επιπέδου της ισχύος (*dimmer*) που εισάγονται εν σειρά με τον κλίβανο και μπορούν σε μερικές των περιπτώσεων να ελέγξουν το ρεύμα που αυτός απορροφά. Οι ελεγκτές αυτοί είναι σειριακές συσκευές με αντιπαράλληλα θυρίστορ και μια σειριακή επαγωγή. Το μειονέκτημα είναι ο αργός χρόνος απόκρισης και η μεγάλη αρμονική παραμόρφωση που εισάγουν.

Εξαιτίας και της υψηλής αξίας της συσκευής μπορεί ο όλος εξοπλισμός να γίνει πολύ ακριβός.

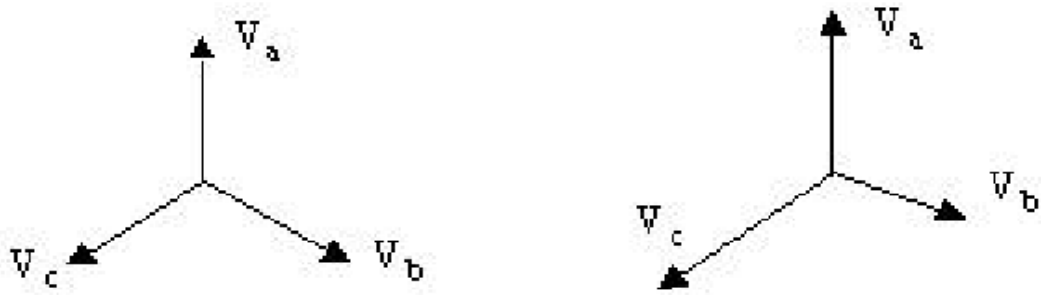
- Σειριακοί πυκνωτές έχουν επίσης ερευνηθεί και εγκατασταθεί για την επίλυση του φαινομένου. Χωρητικότητες εν σειρά με τον κλίβανο με κατάλληλη τιμή χωρητικότητας είναι κατάλληλοι για την αντιστάθμιση επαγωγών μεταξύ της πηγής και του κλιβάνου. Παρόλα αυτά ο κίνδυνος συγχρονισμού με την επαγωγή των γραμμών αποτελεί έναν από τους λόγους που η συγκεκριμένη μέθοδος αποφεύγεται στην πράξη.
- Είσοδος σειριακής αντίστασης στην σειρά με τον κλίβανο. Το ρεύμα που απορροφάει ο κλίβανος μειώνεται εξαιτίας της μεγάλης επαγωγικής αντίδρασης. Επίσης μεγαλύτερη επαγωγή αυξάνει την διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης και κατ' επέκταση σταθερότερο ηλεκτρικό τόξο. Ο αντιστάτης πρέπει να επιλεγεί με προσοχή αφού μεγάλες τιμές επαγωγικής αντίδρασης μπορεί να σημαίνει μείωση της παρεχόμενης προς τον κλίβανο ισχύος και κατ' επέκταση και της δυνατότητας παραγωγής χάλυβα.
- Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μηχανήματα εξάλειψης του φλίκερ είναι οι στατοί πυκνωτές (*static var compensator*) και *D-Statcom*. Και οι δύο αυτοί εξοπλισμοί χρησιμοποιούν τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι ο SVC μπορεί να λειτουργήσει σαν ελεγκτής της τάσης με την παραγωγή ή κατανάλωση έργου ισχύος από το σύστημα που έχει. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν εξισορρόπηση ασύμμετρων φορτίων.
- Λίγα λόγια και για τον D-Statcom, που είναι πιο γρήγορος από τους SVC, αλλά και πιο ακριβός. Το πλεονέκτημα του να χρησιμοποιεί κανείς δυναμικούς μετατροπείς με θυρίστορ είναι η δυνατότητα παραγωγής και κατανάλωσης τόσο ενεργούς όσο και έργου ισχύος. Χρησιμοποιώντας VSC (Voltage Source Converter) με PWM (pulse width modulation) μπορεί να γίνει ταχύτερη μετατροπή, πράγμα που χρειάζεται για την αντιμετώπιση και του φλίκερ. Ο SVC με PWM φαίνεται να είναι σήμερα ο καταλληλότερος εξοπλισμός για αντιμετώπιση φλίκερ. Η πρόσθεση IGBTs αυξάνει την απόδοση και βελτιώνει την ταχύτητα της απόκρισης. Το όλο σύστημα λέγεται ***D-Statcom***.

## **ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ**

### **1.7.0 ΓΕΝΙΚΑ**

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). Ασυμμετρία τάσεως εμφανίζεται όταν είτε υπάρχει διαφορά στην ενεργό τιμή της τάσης μεταξύ των φάσεων είτε επειδή η γωνία μεταξύ των φάσεων αποκλίνει από τις

120°. Στην αγγλική βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται δύο όροι *unbalance* και *imbalance*.



Αντιπαράβολή συμμετρικού με ασύμμετρο τριφασικό σύστημα

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τον προσδιορισμό της επίδρασης της ασυμμετρίας των φάσεων. Δύο από αυτούς είναι οι πιο γνωστοί και αυτοί είναι: (α) ο λόγος τάσεων αρνητικής προς την θετική ακολουθία και (β) μέγιστη απόκλιση από τον μέσο των τριών πολικών τάσεων προς τον μέσο αυτών.

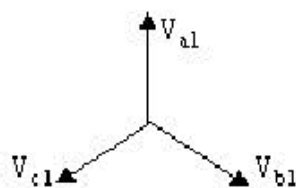
(α) Για τον πρώτο αυτό ορισμό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μετασχηματισμού ενός ασύμμετρου τριφασικού κυκλώματος σε τρία τριφασικά. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή κάθε τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε τρία τριφασικά συστήματα, δύο συμμετρικά, ευθύ και αντίστροφο και ένα ομοπολικό. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{a0} \\ \tilde{V}_{a1} \\ \tilde{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix}$$

και

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a0} \\ \tilde{V}_{a1} \\ \tilde{V}_{a2} \end{bmatrix}$$

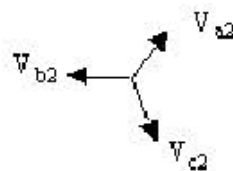
όπου  $V_a, V_b, V_c$  το τριφασικό σύστημα τάσεων και  $V_{a0}, V_{a1}, V_{a2}$  οι συμμετρικές συνιστώσες της  $V_a$ .



positive sequence

Ευθύ Σύστημα  
(θετικής ακολουθίας)

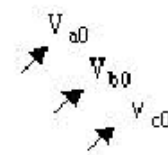
1  
+



negative sequence

Αντίστροφο Σύστημα  
(θετικής ακολουθίας)

2  
-



zero sequence

Ομοπολικό Σύστημα  
(μηδενικής ακολουθίας)

0  
0

## Συμμετρικά στοιχεία ενός ασύμμετρου συστήματος τάσεων

Το τριφασικό σύστημα με τον μετασχηματισμό των τριφασικών συνιστωσών μετασχηματίζεται σε μία ισοδύναμη ομάδα τριών μονοφασικών συστημάτων. Όταν το δίκτυο είναι γραμμικό τα ρεύματα φάσεως μπορούν να προκύψουν με επαλληλία των συμμετρικών συνιστωσών τους. Το τριφασικό δίκτυο όμως πρέπει να είναι και συμμετρικό, δηλ. να παρουσιάζει τουλάχιστον διαγώνια συμμετρία **για να είναι τα τρία μονοφασικά κυκλώματα ακολουθίας ανεξάρτητα και μη συζευγμένα.**

Η επιτυχία της εφαρμογής των συμμετρικών συνιστωσών έγκειται στο γεγονός ότι είναι δυνατόν για ορισμένες συνθήκες ασυμμετρίας να επιτευχθούν σχετικά απλές διασυνδέσεις μεταξύ των κυκλωμάτων ακολουθίας στο σημείο της ασυμμετρίας.

Εάν όμως μία γραμμή με μη αντιμετατεθειμένους αγωγούς θεωρηθεί με  $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$  η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών δεν προσφέρει σχεδόν καμία απλοποίηση. Οπωσδήποτε όμως μεγάλος αριθμός μελετών μπορεί να βασιστεί στην υπόθεση ενός συμμετρικού δικτύου και κατά αυτόν τον τρόπο η ανάλυση των συμμετρικών συνιστωσών έχει διαδοθεί ευρύτατα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να αγνοηθούν οι ασυμμετρίες των κυκλωμάτων χωρίς σοβαρό σφάλμα. Τέτοια είναι π.χ. η ανάλυση των οδοντών κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή η προσπάθεια έγκειται στην εύρεση ενός κατάλληλου μετασχηματισμού προς μετατροπή του τριφασικού δικτύου σε μονοφασικά ανεξάρτητα κυκλώματα χωρίς συζεύξεις. Σε μαθηματική γλώσσα ζητείται η διαγωνοποίηση μιας μήτρας φυσικών αντιστάσεων, όσο ασύμμετρη και αν είναι αυτή. Στην γλώσσα των μηχανικών μιλάμε για συνιστώσες ρυθμών και μετασχηματισμό ρυθμών. Χωρίς να προχωρήσουμε περισσότερο αναφέρουμε ότι τόσο ο μετασχηματισμός συνιστωσών όσο και ο μετασχηματισμός Clark αποτελούν περιπτώσεις τέτοιου μετασχηματισμού.

Αυτό που μπορούμε επίσης να κάνουμε είναι μία ερμηνία του μετασχηματισμού με φυσικούς όρους. Η κατεύθυνση της περιστροφής ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, όταν γίνεται με τάσεις αρνητικής συχνότητας, είναι αντίθετη από αυτήν που προκύπτει όταν χρησιμοποιούνται τάσεις θετικής συχνότητας. Όταν χρησιμοποιείται σε τριφασικό επαγωγικό κινητήρα σύστημα μηδενικής συχνότητας, όπου δεν υπάρχει μετατόπιση φάσεων μεταξύ των τριών τάσεων, δεν θα υπάρξει καμία περιστροφή, καθώς δεν θα υπάρχει κανένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ασυμμετρία των φάσεων λοιπόν ορίζεται ως ο λόγος των τάσεων της αρνητικής προς αυτόν της θετικής ακολουθίας

$$u = \frac{|V_i|}{|V_d|} * 100\% = \frac{\text{negative sequence}}{\text{positive sequence}} * 100\%$$

εναλλακτικός ορισμός με την ίδια ισχύ είναι ο:

$$u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 + 6\beta}}} * 100\%$$

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

(β) Ο δεύτερος αυτός ορισμός είναι ο ορισμός είναι ο βασικός ορισμός τ Ένωσης Ηλεκτρικών Κατασκευαστών στις ΗΠΑ (NEMA), ο οποίος δίδει εξίσωση:

$$u = \max * \frac{U_i - U_{avg}}{U_{avg}} * 100\%$$

$$U_i - \text{phase voltage}, U = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}$$

Ο ορισμός της IEC είναι μεγαλύτερης μαθηματικής ακρίβειας από αυτόν τ και γι' αυτό όταν υπολογίζεται η ασυμμετρία τάσης οι δύο ορισμοί μπορεί να διαφορετικά αποτελέσματα.

Τέλος πρέπει να πούμε ότι υπάρχει ακόμα ένας εναλλακτικός ορισμός για την επίδραση της ασυμμετρίας των τάσεων. Είναι παρόμοιος με τον δεύτερο ορισμό που δώσαμε της IEC αλλά μαθηματικά δίνει διαφορετικό αποτέλεσμα

$$u = \sqrt{\frac{6(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})}} * 100\%$$

$$U_{12}, U_{23}, U_{31} - \text{line voltage}$$

### **1.7.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Ασυμμετρία συμβαίνει όταν η κατανάλωση ρεύματος είναι ασύμμετρα κατανεμημένη στις τρεις φάσεις ή κατά την διάρκεια σφαλμάτων πριν προλάβει να λειτουργήσει η προστασία.

### **1.7.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

Η ασυμμετρία των φάσεων επηρεάζει κυρίως του τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες στους προκαλεί υπερθέρμανση και επίσης επηρεάζει τον εξοπλισμό προστασίας των κυκλωμάτων. (*Tripping*)

Τα προβλήματα παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω:

#### **Επιπτώσεις σε επαγωγικούς κινητήρες**

Η σημαντικότερη επίπτωση της ασυμμετρίας της τάσης είναι στους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες. Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες είναι από τα πιο συνηθισμένα φορτία στο δίκτυο και υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες ειδικά σε βιομηχανικό περιβάλλον. Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από ένα ασύμμετρο δίκτυο, το ρεύμα γραμμής που απορροφά παρουσιάζει ένα σημαντικό βαθμό ασυμμετρίας, ο οποίος είναι πολλές φορές πολλαπλάσιος του βαθμού ασυμμετρίας της τάσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί βάσει των δύο αντίθετα στρεφόμενων πεδίων, τα οποία δημιουργούνται όταν ο κινητήρας υπόκειται σε ασυμμετρία τάσης. Για να προσπαθήσουμε να επεξηγήσουμε πως επηρεάζεται ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας από την ασυμμετρία των φάσεων θα χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό της IEC. Για τον λόγο αυτό θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια αναγωγή των τιμών στα ισοδύναμα κυκλώματα ακολουθίας. Όσον αφορά το κύκλωμα θετικής ακολουθίας, εάν ο κινητήρας έχει ολίσθηση που δίνεται από τον τύπο:

$$S_1 = \frac{N_s - Nr}{N_s}$$

$N_s$  – σύγχρονη ταχύτητα

$N_r$  – η ταχύτητα του δρομέα

Τότε η ολίσθηση που «βλέπει» το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας είναι:

$$S_2 = \frac{-N_s - Nr}{-N_s}$$

Η ολίσθηση  $s_2$  μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την ολίσθηση  $s_1$  όπως φαίνεται από κάτω:

$$S_2 = \frac{-N_s - Nr}{-N_s} = (2 - S_1)$$

Αφού η ολίσθηση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας  $s_1$  είναι συνήθως (κοντά στο μηδέν), η ολίσθηση της αρνητικής συχνότητας  $s_2$  θα είναι κοντά στο 2). Βάσει της βασικής θεωρίας των επαγωγικών κινητήρων, η σύνθετη αντίδραση ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ολίσθηση, όπου όταν αυτή είναι μεγάλη (π.χ. στην αρχή ή σε συνθήκες κλειδωμένου κινητήρα, δηλ. ακινητοποιημένου  $N_r=0 \Rightarrow s_1=1$ ) η εμπέδηση είναι μικρή και αντίστροφα, σε μικρή ολίσθηση είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, μπορούμε κατά προσέγγιση να πούμε ότι η αναλογία της σύνθετης αντίδρασης θετικής ακολουθίας ως προς τη σύνθετη αντίδραση αρνητικής ακολουθίας είναι:

$$\frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{I_{start}}{I_{running}}$$

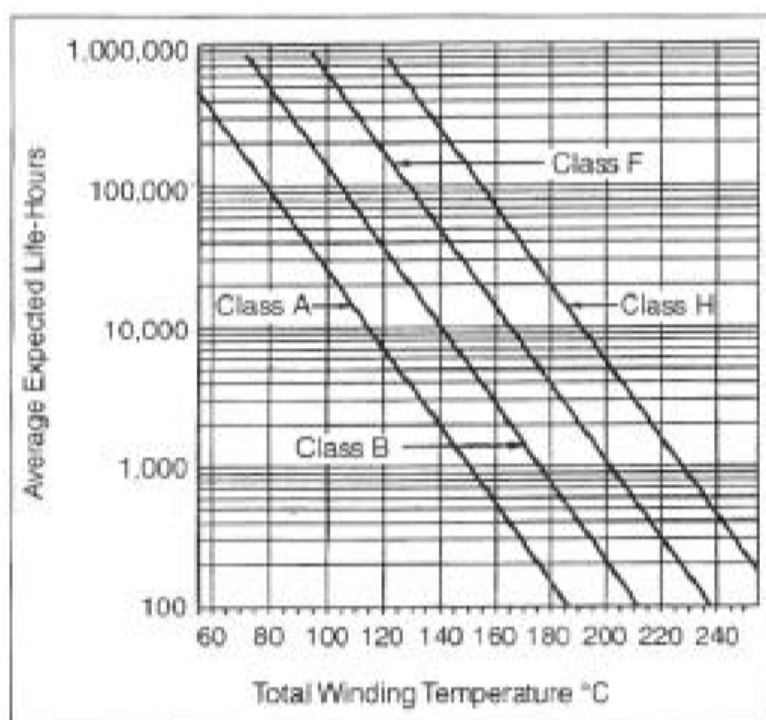
Καθώς το ρεύμα στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας είναι  $I_1 = V_1/Z_1$  και το ρεύμα στο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας είναι  $I_2 = V_2/Z_2$  μπορεί γρήγορα να βρούμε ότι:



$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2}{V_1} * \frac{I_{start}}{I_{running}}$$

Για παράδειγμα, ένας κινητήρας με ρεύμα στροφείου, το οποίο είναι 5 φορές το ρεύμα λειτουργίας θα προκαλούσε σημαντική ασυμμετρία 30% στη γραμμή ρεύματος του κινητήρα, εάν η ασυμμετρία της τάσης ήταν 5%.

Εάν ο κινητήρας λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, κάποια από τα τυλίγματα των φάσεων του στάτη και ο δρομέας θα απορροφούν περισσότερο ρεύμα από ότι επιτρέπεται και έτσι θα προκληθούν επιπλέον απώλειες στον κινητήρα. Αυτό θα οδηγήσει στην μείωση της απόδοσης του κινητήρα και παράλληλα θα μειώσει και την χρόνο ζωής των μονώσεων λόγω υπερθέρμανσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης μειώνεται κατά 50% για κάθε 1° Κελσίου που ανεβαίνει η θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα**



**Σχήμα 13** Μεταβολή του χρόνου ζωής της μόνωσης με τη θερμοκρασία

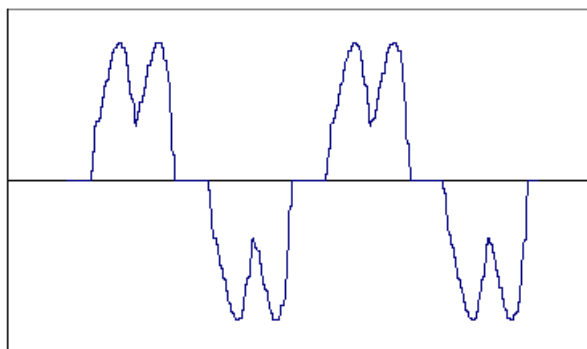
Επιπλέον της μειωμένης απόδοσης, της υπερθέρμανσης και της μείωσης του χρόνου ζωής της μόνωσης, οι επαγωγικοί κινητήρες που λειτουργούν σε κατάσταση ασυμμετρίας θα κάνουν πολύ θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, λόγω των κραδασμών από την στροφορμή και την ταχύτητα. Προφανώς σε τέτοιες περιπτώσεις η κατάλληλη στροφορμή και ταχύτητα θα είναι μικρότερη της κανονικής.

Έχοντας συνειδητοποιήσει ότι η ασυμμετρία της τάσης προκαλεί επιπλέον απώλειες, προκειμένου να προφυλαχθούν οι κινητήρες από την υπερφόρτωση, η NEMA δημιούργησε μία καμπύλη μείωσης της απόδοσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.31**. Η καμπύλη αυτή υποθέτει ότι ο κινητήρας ήδη παράγει το αναγραφόμενο φορτίο. Βάσει αυτής της καμπύλης, κάθε κινητήρας πρέπει να είναι κατασκευασμένος να αντέχει 1% ασυμμετρία και σε μεγαλύτερες καταστάσεις ασυμμετρίας θα μειώνεται η απόδοσή του ανάλογα με το επίπεδο της ασυμμετρίας. Για παράδειγμα, εάν η

ασυμμετρία είναι 3%, ένας κινητήρας ονομαστικής ισχύος 10 kW θα πρέπει να λειτουργεί με φορτίο μόνο μέχρι 9 kW. Εάν 10 kW είναι η ισχύς που πρέπει να μπορεί να «σηκώσει» ο κινητήρας σε κατάσταση 3% ασυμμετρίας, τότε ο κινητήρας πρέπει να είναι περίπου 12 kW. Η λειτουργία ενός επαγωγικού κινητήρα με ασυμμετρία πάνω από 5% δεν συνιστάται.

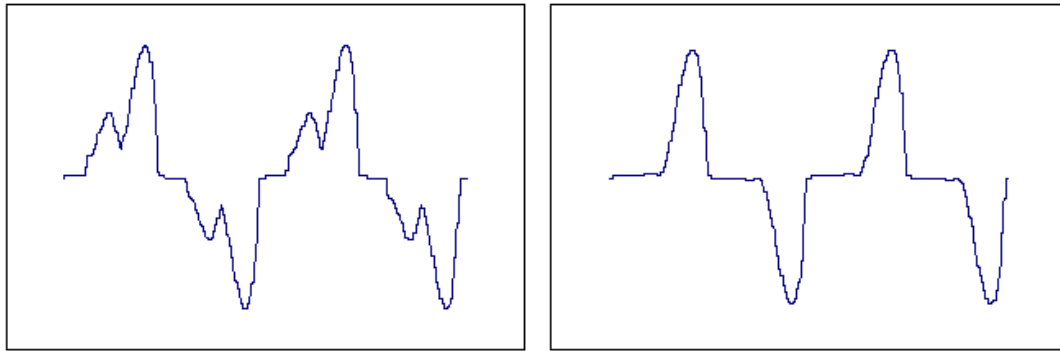
### Επιπτώσεις σε inverter

Τα τριφασικά ανορθωτικά συστήματα με διόδους αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των συστημάτων οδήγησης μεταβαλλόμενης ταχύτητας και των υποστηρικτών αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS). Αυτά τα συστήματα ανορθωτών απορροφούν ρεύματα μη-ημιτονοειδούς κυματομορφής. Αν το σύστημα παροχής ηλεκτρισμού είναι συμμετρικό, το ρεύμα που μπορούν να απορροφήσουν έχει την μορφή του «διπλού παλμού ανά μισό κύκλο», όπως φαίνεται στο **Σχήμα** , το οποίο αποτελείται από αρμονικές, η τάξη των οποίων δίδεται από την χαρακτηριστική:  $h = 6k \pm 1$ , όπου  $h$  = τάξη της αρμονικής και  $k = 1, 2, \dots$  δίνοντας μόνο  $5^{\text{η}}$ ,  $7^{\text{η}}$ ,  $11^{\text{η}}$ ,  $13^{\text{η}}$  ... ακολουθία αρμονικών.



**Σχήμα 14.** : Κυματομορφή γραμμικού ρεύματος ενός τριφασικού ανορθωτή διόδων, όταν το σύστημα παροχής είναι συμμετρικό

Όσο το σύστημα τροφοδοσίας γίνεται πιο ασύμμετρο, τόσο η μορφή του ρεύματος παρεκκλίνει από αυτή του **Σχήματος** και αποκτά μορφή απλού παλμού, όπως φαίνεται στα Σχήματα (α) και (β), οδηγώντας σε ασυνήθιστες τριπλές αρμονικές. Η ασυμμετρία των φάσεων μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των συστημάτων οδήγησης λόγω υπερβολικών γραμμικών ρευμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος σε κάποιες απ' τις φάσεις και ελλιπή τάση στη πλευρά συνεχούς ρεύματος (**DC link**). Αυτό με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική υπερθέρμανση των διόδων και του πυκνωτή συνεχούς ρεύματος. Αύξηση των ανεπιθύμητων αρμονικών τρίτης τάξης στο ρεύμα μπορεί επίσης να προκαλέσει ανεπιθύμητα προβλήματα αρμονικών στο σύστημα τροφοδοσίας.



(a) Voltage unbalance – 5%

(b) Voltage unbalance – 15%

**Σχημα 15** Κυματομορφή γραμμικού ρεύματος ενός τριφασικού ανορθωτή διόδων, όταν το σύστημα παροχής είναι ασύμμετρο

Στα συστήματα κίνησης εναλλασσόμενου ρεύματος τελευταίας γενιάς με ανορθωτές PWM με θυρίστορ (αντί για ανορθωτές διόδων), οι επιπτώσεις της ασυμμετρίας στο σύστημα τροφοδοσίας περιλαμβάνουν αυξημένη παραμόρφωση του ρεύματος, πρόκληση κυματισμού 100Hz στη πλευρά συνεχούς ρεύματος και αύξηση της άεργου ισχύος που απορροφά.

### 1.7.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Η επίτευξη μηδενικού βαθμού ασυμμετρίας μεταξύ των φάσεων σε ένα σύστημα διανομής είναι προφανώς αδύνατη, λόγω:

- (α) στοχαστικότητας της σύνδεσης και αποσύνδεσης των μονοφασικών φορτίων,
- (β) άνιση κατανομή των μονοφασικών φορτίων στις τρεις φάσεις και
- (γ) εγγενούς ασυμμετρίας του συστήματος τροφοδοσίας.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν τεχνικές βελτίωσης της συμμετρικότητας τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και σε επίπεδο κατανάλωσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του συντελεστή ασυμμετρίας της φάσεων και των επιπτώσεών της.

#### **Προτεινόμενα μέτρα για μια εταιρία παροχής:**

- Ανακατανομή των μονοφασικών φορτίων ισομερώς σε όλες τις φάσεις.
- Μείωση της ασυμμετρίας του συστήματος, η οποία προέκυψε λόγω των σύνθετων αντιστάσεων του συστήματος, όπως αυτές εξαιτίας των μετασχηματιστών και των γραμμών.
- Μονοφασικοί ρυθμιστές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την διόρθωση της ασυμμετρίας, αλλά πρέπει πάντα να ελέγχονται ώστε να μην προξενήσουν περαιτέρω ασυμμετρία.
- Τα παθητικά συστήματα δικτύων και τα ηλεκτρονικά συστήματα ενεργούς ισχύος, όπως οι πυκνωτές δυναμικής μεταβλητής αντιστάθμισης (Static Var Compensator) και οι ρυθμιστές γραμμής, επίσης θεωρούνται κατάλληλοι για την

διόρθωση της ασυμμετρίας. Σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα, τα ενεργητικά συστήματα μπορούν να διορθώσουν την ασυμμετρία δυναμικά, πράγμα που σημαίνει να εξομαλύνουν τις αλλαγές και από τα συνεχώς κυμαινόμενα φορτία.

#### **Προτεινόμενα μέτρα για βιομηχανικούς καταναλωτές:**

- Εξισορρόπηση φορτίου.
- Χρήση παθητικών κυκλωμάτων και πυκνωτών δυναμικής μεταβλητής αντιστάθμισης (**Static Var Compensator**).
- Μηχανήματα ευαίσθητα σε ασυμμετρία φάσεων δεν πρέπει να συνδέονται σε συστήματα παροχής μονοφασικών φορτίων.
- Οι επιπτώσεις της ασυμμετρίας φάσεων στους μηχανισμούς οδήγησης εναλλασσόμενου ρεύματος μηχανών μεταβλητής ταχύτητας μπορούν να μειωθούν αν ρυθμιστούν κατάλληλα οι αντιδράσεις τόσο στην πλευρά εναλλασσόμενης τάσης όσο και στην πλευρά συνεχούς.

Για την προστασία των επαγωγικών κινητήρων πρέπει να αναπτυχθούν ρελέ να μπλοκάρουν όταν δέχονται ρεύματα και τάσεις αρνητικής ακολουθίας. Θεωρείται ότι τα ρελέ ανίχνευσης ρεύματος αρνητικής ακολουθίας έχουν καλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τα ρελέ ανίχνευσης τάσης αρνητικής ακολουθίας.

### **ΜΕΤΑΓΩΓΙΚΗ ΥΠΕΡΤΑΣΗ**

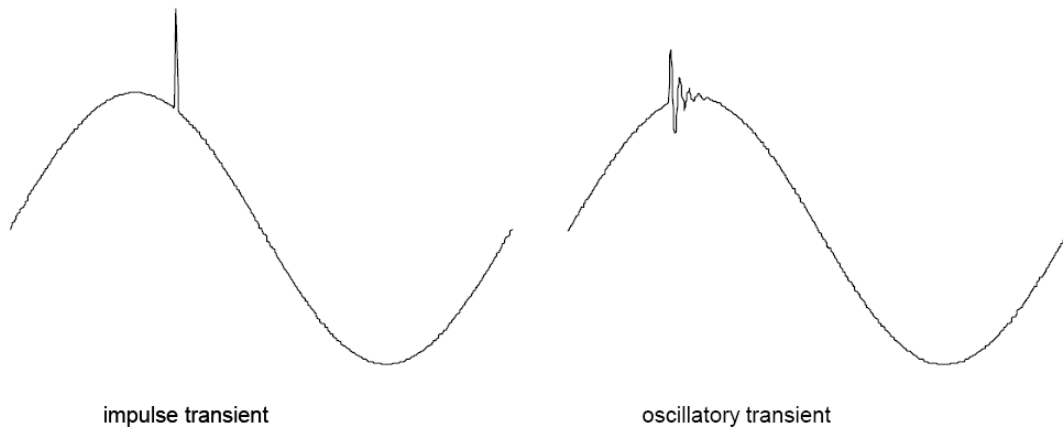
#### **1.8.0 ΓΕΝΙΚΑ ΚΑΙ ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ**

Οι μεταβατικές υπερτάσεις είναι ένας όρος για σύντομες, γρήγορα αποσβενύμενες παροδικές διαταραχές της τάσης ή του ρεύματος. Μπορεί να ορισθούν ως η απόκριση του ηλεκτρικού δικτύου σε μία απότομη αλλαγή στις συνθήκες του δικτύου, είτε σκοπίμως ή από ατύχημα (χειρισμοί ζεύξης και απόζευξης ή κατάσταση σφάλματος) ή κάποιο εξωτερικό ερέθισμα του δικτύου (π.χ. πτώση κεραυνού). Οι μεταγωγές είναι μέρος της φυσικής διαδικασίας, στην οποία το δίκτυο μεταβαίνει από μία κανονική κατάσταση σε μία άλλη. Η διάρκεια του είναι στην κλίμακα από microseconds έως milliseconds.

Οι μεταβατικές υπερτάσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Κρουστικές υπερτάσεις (*impulsive overvoltage*)
- Υπερτάσεις με αποσβενύμενη ταλάντωση (*oscillatory overvoltage*)

Ένα παράδειγμα αυτών των ταλαντώσεων φαίνεται στο Σχήμα

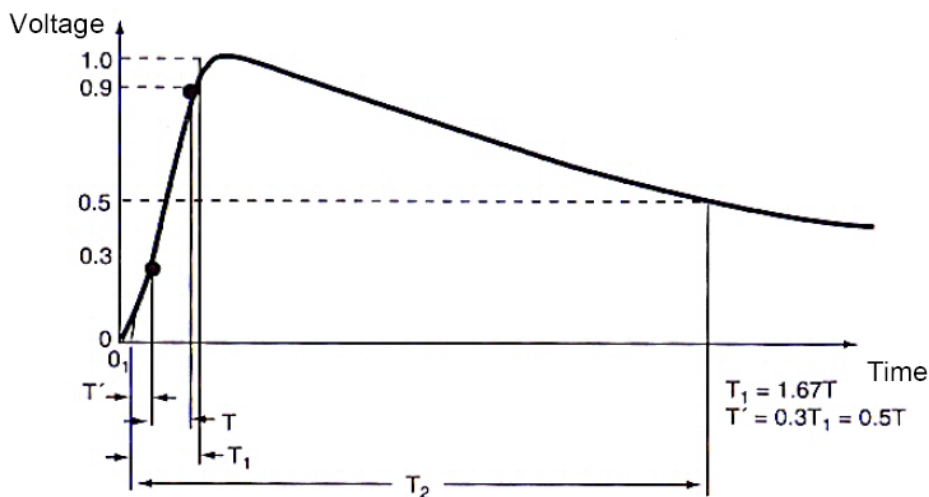


**Σχημα 16** Μεταγωγικές υπερτάσεις παλμικού και κλιμακούμενου τύπου (impulsive and oscillatory transients)

**Παλμικές Υπερτάσεις**

Οι παλμικές διαταραχές είναι απότομες μεταβολές στην τάση ή /και στο ρεύμα που δεν προκαλούν αλλαγή στην συχνότητα του συστήματος, και είναι πρακτικά σε μία κατεύθυνση. Ο πιο συνήθης λόγος πρόκλησης αυτής της διαταραχής είναι οι κεραυνοί. Μία τυπική παλμική υπέρταση φαίνεται στο σχήμα 2.34. Το πλάτος μίας τέτοιας διαταραχής μπορεί να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του ονομαστικού πλάτους.

Οι παλμικές υπερτάσεις συνήθως χαρακτηρίζονται από τον διάρκεια μετώπου και ημίσεως εύρους και από την τιμή κορυφής. Αυτό φαίνεται στο παρακατω Σχήμα .



**Σχημα 17** Χαρακτηριστικά παλμικής διαταραχής

Ο κάθετος άξονας του διαγράμματος είναι κανονικοποιημένος στην τιμή της κορυφής της υπέρτασης (έχει τιμή 1.0 ανά μονάδα για την μέγιστη τιμή της παλμικής υπέρτασης) και το 0 ξεκινάει την στιγμή που στο Σχήμα συμβαίνει η υπέρταση.

Ο χρόνος μετώπου  $T_1$  συνήθως υπολογίζεται σαν 1,67 φορές τον χρόνο  $T$  στον οποίο η τάση αυξάνεται από το 30% στο 90% της κορυφής της παλμικής υπέρτασης. Η διάρκεια ημίσεως εύρους  $T_2$  είναι συνήθως ο χρόνος από την έναρξη της υπέρτασης έως την στιγμή που η τιμή της τάσης πέφτει κάτω από το 50% της τιμής της κορυφής της υπέρτασης.

Η κυμάτωση που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα θα μπορούσε χαρακτηριστικά να καλείται σαν T1/T2 κυμάτωση, όπου T1 T2 δίνονται σε μs. Η κυμάτωση 1.2/50 (1.2μs χρόνος ανόδου, 50 μs χρόνος ημίσειας τιμής) με τιμή κορυφής V<sub>pk</sub> (π.χ. 95kV σε ένα σύστημα 11kV) είναι συχνά η στάνταρτ κυμάτωση για δοκιμή παλμικής υπέρτασης από κεραυνό.

### **Κλιμακούμενες Υπερτάσεις**

Η κλιμακούμενη υπέρταση είναι απότομη μεταβολή της τάσης ή /και του ρεύματος κα δεν επιφέρει κάποια αλλαγή στην συχνότητα του δικτύου. Αυτό που πρέπει να τονίσουμε είναι ότι αποσβένεται και προς τις δύο κατευθύνσεις του συστήματος χωρίς άλλη μεταβολή της κυματομορφής. Η συχνότητα της απόσβεσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.

Οι κλιμακούμενες υπερτάσεις χαρακτηρίζονται από το πλάτος, την συχνότητα και τον χρόνο εξασθένισης. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χαμηλής, μέσης και υψηλής συχνότητας.

Μία κλιμακούμενη υπέρταση με βασική συχνότητα λιγότερο από 5 kHz, και διάρκεια από 0.3 ms έως 50 ms, θεωρείται σαν χαμηλής συχνότητας μεταβατική υπέρταση σύμφωνα πάντα με την κατηγοριοποίηση που δίνεται στο πρότυπο 159-1995 της IEEE. Αυτή η κατηγορία καταγράφεται συχνά σε συστήματα διανομής και συμβαίνει εξαιτίας διαφόρων χειρισμών ζεύξης και απόζευξης στο δίκτυο. Η πιο συχνή αιτία είναι η ενεργοποίηση συστοιχιών πυκνωτών. Η ενεργοποίηση πυκνωτών συχνά έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία κλιμακούμενης υπέρτασης με συχνότητα ταλάντωσης μεταξύ 300 και 900Hz και κορυφή του πλάτους μεταξύ 1.3 και 1.5 φορές the crest voltage της τάσης στην συχνότητα των 50 Hz. Κλιμακούμενες υπερτάσεις που οφείλονται σε σίδηροσυντονισμό και ενεργοποίηση μετασχηματισμών εμπίπτουν επίσης σε αυτήν την κατηγορία.

Μία κλιμακούμενη υπέρταση με συχνότητα μεταξύ των 5 και 500kHz και διάρκεια σε δέκατα των μs καλείται μέσης συχνότητας μεταβατική υπέρταση. Ένα τυπικό παράδειγμα θα ήταν οι μεταβατικές υπερτάσεις που δημιουργούνται από συνεχόμενες ενεργοποιήσεις πυκνωτών και από ζεύξη και συνεχόμενη απόζευξη καλωδίων.

Τέλος κλιμακούμενες υπερτάσεις με συχνότητα ταλάντωσης μεγαλύτερες από 5kHz και μία διάρκεια στην τάξη των μs θεωρούνται σαν υψηλής συχνότητας κλιμακούμενες υπερτάσεις. Αυτές συνήθως συμβαίνουν όταν κάποιες παλμικές υπερτάσεις (*κρουστικές υπερτάσεις*) διεγείρει την τοπική συχνότητα ενός τοπικού δικτύου.

### **1.8.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ**

Οι μεταβατικές υπερτάσεις προκαλούν άμεσο σφάλμα ή δυσλειτουργία Μ/Σ, πυκνωτών ή ημιαγωγών ή στην μόνωσης της καλωδίωσης, και μπορούν να οδηγήσουν σε καταστάσεις σφάλματος. Εξοπλισμοί ρύθμισης ταχύτητας κινητήρων

μπορεί να αστοχήσουν. Επίσης διόγκωση των μεταβατικών τάσεων στην μέση τάση που οφείλονται σε ζεύξη και απόζευξη πυκνωτών, μπορεί να οδηγήσουν κάτω από κάποιες ατυχείς συνθήκες σε παραγωγή υπερτάσεων της τάξης των 2-4α.μ. στην χαμηλή τάση, πράγμα που μπορεί να είναι καταστροφικό για την πλειοψηφία των συσκευών. Έχει παρατηρηθεί ότι προκαλούν σημαντικές οικονομικές απώλειες σε αρκετές εταιρίες εξαιτίας των καταστροφών σε εξοπλισμό και στην απώλεια της παραγωγής.

Στο σημείο αυτό θα μπορούσαμε να αναλύσουμε το αποτέλεσμα των δύο σημαντικότερων αιτιών δημιουργίας μεταβατικών υπερτάσεων. Αυτές είναι όπως είπαμε το κεραυνικό πλήγμα και οι διαδικασίες ζεύξης και απόζευξης σε ένα δίκτυο.

### **Κεραυνοί**

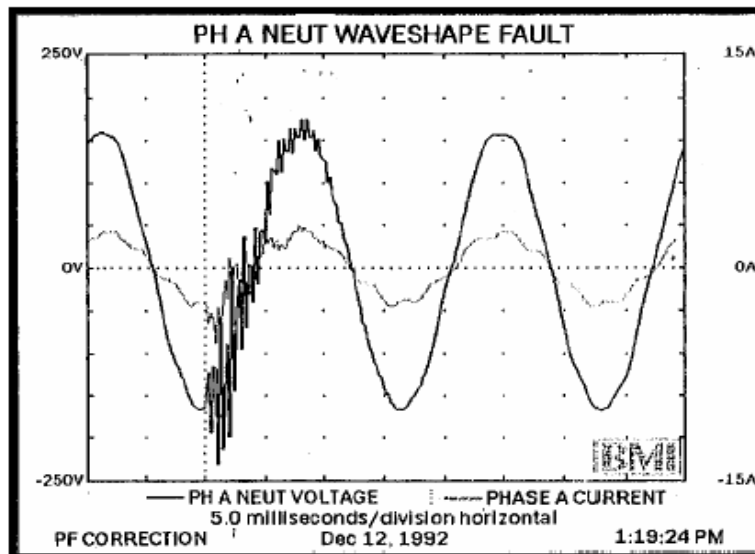
Οι κεραυνοί είναι μία ηλεκτρική εκφόρτιση στην ατμόσφαιρα μεταξύ των νεφών και τις γης η και μεταξύ των ίδιων των νεφών. Παρότι οι περισσότερες εκφορτίσεις πραγματοποιούνται μεταξύ των νεφών, αυτές που πραγματοποιούνται με κατεύθυνση την γη είναι αρκετές ώστε να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στα ηλεκτρικά συστήματα και τον ευαίσθητο ηλεκτρικό εξοπλισμό. Όταν κεραυνοί πλήττουν ηλεκτρικά συστήματα ή κοντά σε αυτά τότε μεγάλα ρεύματα δημιουργούνται και επάγονται μέσω του συστήματος στον συνδεδεμένο εξοπλισμό. Μεγάλες παλμικές υπερτάσεις προκύπτουν σαν αποτέλεσμα αυτών των ρευμάτων. Ο κεραυνός μπορεί να πλήξει απευθείας τους αγωγούς των φάσεων των υπέργειων γραμμών προκαλώντας μεταβατικές υπερτάσεις πάρα πολύ μεγάλου πλάτους. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος μπορεί να είναι έως και 200kA με τάσεις άνω των 1MV. Αυτή η κατάσταση συνήθως προκαλεί σφάλματα διαδίδονται στο δίκτυο σαν διακοπές ή βυθίσεις. Ο κεραυνός μπορεί επίσης να πλήξει τις υπέργειες γειώσεις (καλώδια προστασίας) που είναι μερικές φορές εγκατεστημένες πάνω από τους αγωγούς των φάσεων για να τους προστατεύουν από άμεσο κεραυνικό πλήγμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο αποκαλούμενο back-flashover στους αγωγούς των φάσεων, μιας και η τάση στην γείωση ή τον πύργο γίνεται πολλές φορές μεγαλύτερη αυτών στους αγωγούς των φάσεως.

Επιπρόσθετα στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα ο κεραυνός μπορεί να επηρεάσουν τα ρεύματα και τις τάσεις στις γραμμές χωρίς άμεση επαφή. Τα υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από την εκφόρτιση του κεραυνού μπορεί να συνδεθούν ηλεκτρικά με το δίκτυο και να προκαλέσουν μεταβατικές υπερτάσεις. Ρεύματα που εμφανίζονται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μικρότερα των 2kA με τάσεις χαμηλότερες των 100kV.

### **Χειρισμός ζεύξεων και απόζεύξεων στο δίκτυο**

Οι ζεύξης και απόζευξης στα δίκτυα διανομής αποτελούν τον κυριότερο λόγο εμφάνισης κλιμακούμενων υπερτάσεων. Τέτοιοι χειρισμοί περιλαμβάνουν ζεύξη και απόζευξη συστοιχιών πυκνωτών, ζεύξη και απόζευξη αυτόματων διακοπών για εκκαθάριση σφαλμάτων και ζεύξη η απόζευξη ολόκληρων γραμμών στην διανομή για προκαθορισμένη συντήρηση ή και ανακατασκευή αυτών.

Χωρητικότητες έχουν εγκατασταθεί από τους παροχείς σε πολλά διαφορετικά σημεία τόσο στην διανομή όσο και στην μεταφορά, ώστε να παρέχουν άεργο ισχύ για τις ανάγκες του συστήματος (διαδικασία αντιστάθμισης). Συνδέονται και αποσυνδέονται ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε χρονικής στιγμής σε ενέργεια. Όταν ένας πυκνωτής ενεργοποιείται στιγμιαία η τάση στον ζυγό σύνδεσης θα καταρρεύσει. Αυτό συμβαίνει επειδή η τάση σε ένα πυκνωτή δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία. Το φαινόμενο αυτό ακολουθείται από μία αποσβαινούσα ανάκαμψη της τάσης για μισό κύκλο ή και λίγο παραπάνω. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας τάσης της οποίας η μέγιστη τιμή να είναι μέχρι και δύο φορές την μέγιστη τάση της τάσης στα 50Hz, αλλά τις περισσότερες φορές δεν είναι πάνω από 1.5 φορές αυτήν. Ένα παράδειγμα για δίνεται στο Σήμα . Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να συμβεί και όταν ένας πυκνωτής βγαίνει εκτός δικτύου.



**Σχημα 17** Μεταβατικές υπερτάσεις και υπερεντάσεις από ενεργοποίηση πυκνωτή

Εκτός από τους χειρισμούς πυκνωτών, κλιμακούμενες μεταβατικές υπερτάσεις μπορεί να προκύψουν όταν οι διακόπτες κυκλωμάτων κάνουν εκκαθάριση ενός σφάλματος. Κυματομορφές σχετικές με αυτή τη διαδικασία φαίνονται στο παραπάνω Σχήμα.

## ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

### 1.9.0 ΓΕΝΙΚΑ

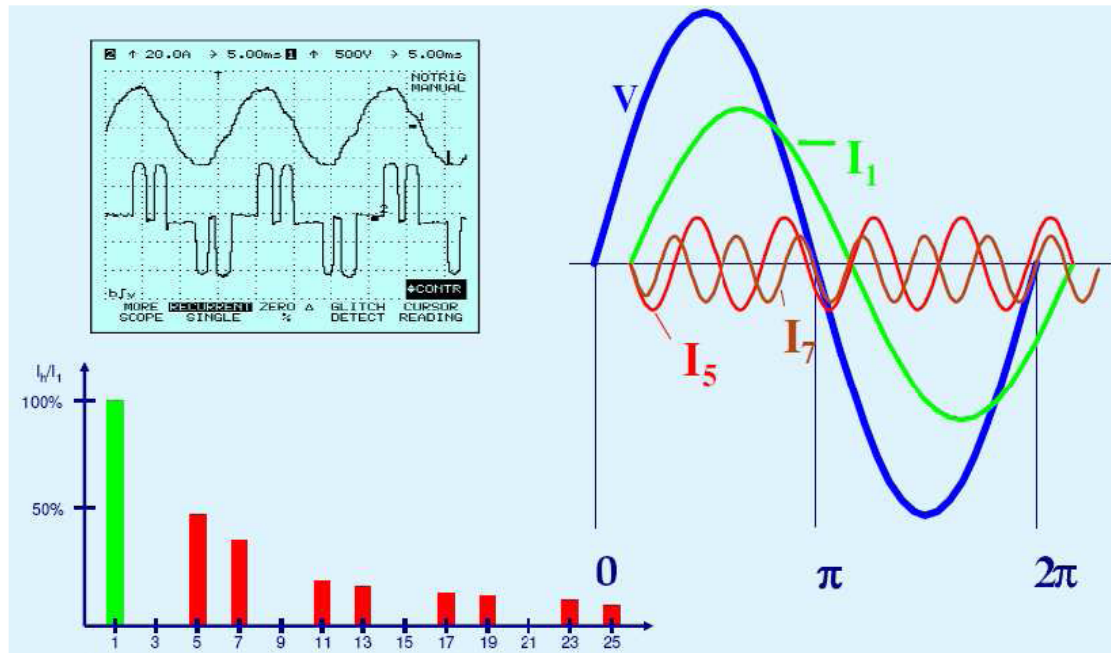
Η ύπαρξη αρμονικών στη τάση και την ένταση (υπέρθυση συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους - 50 Hz) οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων, φορτίων δηλαδή, όπου το ρεύμα έχει διαφορετική κυματομορφή από αυτήν της τάσης. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου,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

Στην παράγραφο 1.2 που ακολουθεί δίνονται αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τις αρμονικές.



## Ορισμός

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



**Σχημα 18** Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος, όπου διακρίνονται οι αρμονικές 1<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 7<sup>ης</sup> τάξης.

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

Ο THD συχνά δίνεται σαν ποσοστό.

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} V_k^2}{V_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} c_{V_k}^2}{c_{V_1}^2}}$$

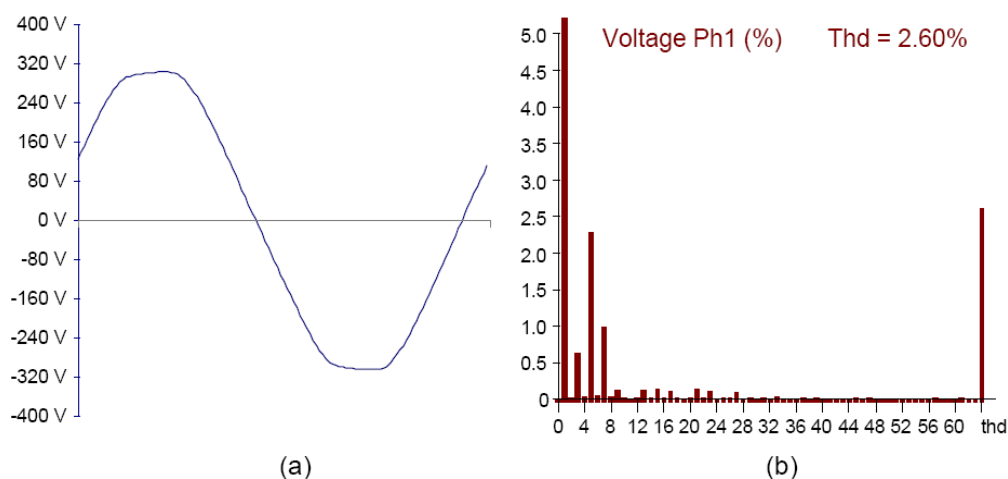
όπου  $V_k = \frac{c_{V_k}}{\sqrt{2}}$  η ενεργός τιμή της τάσης της αρμονικής τάξεως k,  $V_1$  η ενεργός τιμή της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας,  $c_{V_k}$  το πλάτος της τάσης της αρμονικής τάξεως k και  $c_{V_1}$  το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας.

Στο Σχήμα (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.

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

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.



**Σχημα 19** Φασματική απεικόνιση μιας συνήθους κυματομορφής τάσης, καλούμενης κι ως *πριονισμένης κορυφής*.

Ό,τι 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 ολικής αρμονικής παραμόρφωσης THDI, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση.

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

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.

### Ενδιάμεσες αρμονικές

Τάσεις ή ρεύματα που έχουν συχνότητα η οποία δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας με την οποία το σύστημα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί (50 ή 60 Hz) καλούνται ενδιάμεσες αρμονικές.

Οι ενδιάμεσες αρμονικές είτε έχουν διακριτές συχνότητες είτε εμφανίζονται σε ζώνη συχνοτήτων και μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα όλων των τάξεων τάσης. Οι συνήθεις πηγές της διαταραχής των ενδιάμεσων αρμονικών είναι στατικοί μετατροπείς συχνότητας, κυκλομετατροπείς (cycloconverters), επαγωγικοί κινητήρες και συσκευές εκκενώσεως τόξου.

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

### 1.9.1 ΤΙ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ

Στο Σχήμα 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.

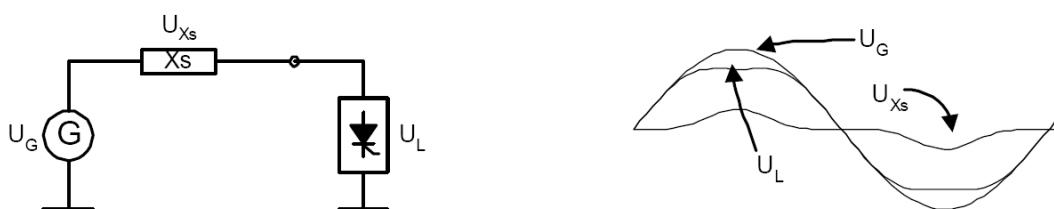
Στην περίπτωση ενός γραμμικού φορτίου το ρεύμα και κατ' επέκταση η πτώση τάσης στην αντίδραση θα είναι επίσης ημιτονοειδής. Η τάση στα άκρα του καταναλωτή θα έχει και αυτή ημιτονοειδή μορφή τάσης με λίγο μειωμένο πλάτος, αλλά την ίδια φάση με αυτή της πηγής.



**Σχημα 20** 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

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.



**Σχημα 21** 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.

### Πηγές αρμονικών διαταραχών

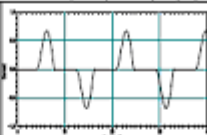
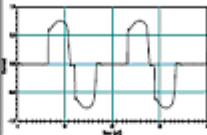
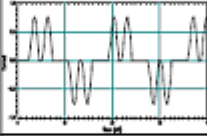
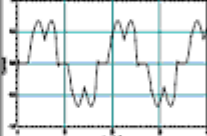
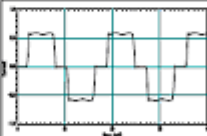
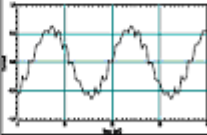
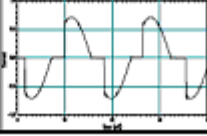
Μερικές από τις πηγές των αρμονικών που εμφανίζονται στα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- 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, κλιβανοί ηλεκτρικού τόξου, μηχανήματα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου, λαμπτήρες αερίου, ελεγκτές τάσης, μετατροπείς συχνότητας κ.ά.
- Τριφασικά φορτία : εισάγουν κυρίως αρμονικές περιττής τάξεως ( $5^{\text{η}}$ ,  $7^{\text{η}}$ ,  $11^{\text{η}}$ ,  $13^{\text{η}}$ ,  $17^{\text{η}}$  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.
- Στοιχεία θέρμανσης PBM (Pulse Burst-Modulated), που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους κλιβάνους.

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

Τύπος φορτίου	Τυπική κυματομορφή	Παραμόρφωση ρεύματος, $THD_i$
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%

**Σχημα 22** Κυματομορφή και ενδεικτική αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.

## 1.9.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΟΙ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ

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. Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να δώσουν αντιστοίχως μεγαλύτερα ρεύματα από αυτά της θεμελιώδους συνιστώσας και για αυτό μπορεί εύκολα να υποτιμηθεί ο βαθμός αύξησης της θερμότητας στον κινητήρα (στην αρχική μελέτη θεωρήθηκε ότι θα φτάσει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο με αποτέλεσμα καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα). Η λειτουργία

κάποιων συσκευών βασίζεται σε μία ακριβή κυματομορφή τάσης με ελάχιστες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα αυτές οι συσκευές να δυσλειτουργούν παρουσία αρμονικών. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν εξοπλισμοί που περιλαμβάνουν θυρίστορ όπως ρυθμιστές μεταβλητής έντασης φωτισμού και μηχανές συγκόλλησης.

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

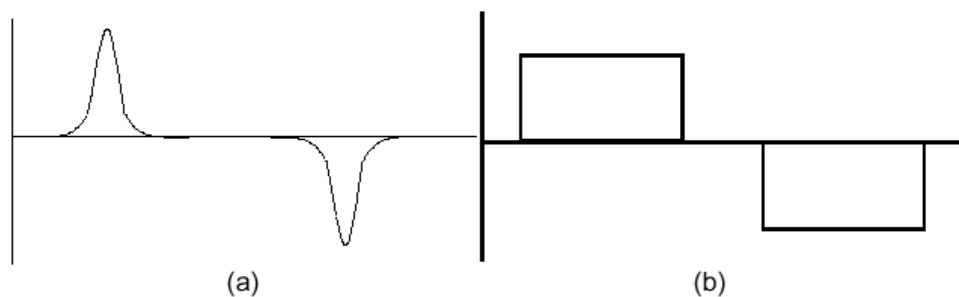
- Υπερθέρμανση του αγωγού στον ουδέτερο με μείωση του χρόνου ζωής και ενδεχόμενο εκδήλωσης πυρκαγιάς.
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι εμφάνιση μεγάλων τάσεων στον ουδέτερο επηρεάζουν τον ψηφιακό εξοπλισμό και τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών αν δεν υφίσταται καλό σύστημα γείωσης.

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 υπαρχόντων αρμονικών στο δίκτυο. Σε αυτό συνεισφέρει το γεγονός ότι για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και για τους μικρούς, υπάρχουν συγκεκριμένα όρια που πρέπει να τηρούνται και έτσι έχουν αναπτύξει μεθόδους εξάλειψης των αρμονικών στην τάση. Το ίδιο συμβαίνει και με μερικούς από τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, αλλά όχι συστηματικά και μετά από παρατήρηση δημιουργίας σημαντικών προβλημάτων στους γειτονικούς καταναλωτές. Έτσι δεν είναι τυχαίο ότι πριν 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 (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.



**Σχημα 23** 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 (β) μπορεί να αναλυθεί σε συνημίτονα συχνότητας 50, 250, 350Hz κ.ο.κ. (άρα αρμονικές τάξης που δεν είναι πολλαπλάσια του 3). Το πλάτος και η συχνότητα των υψίσυχνων συνιστωσών είναι χαρακτηριστική του τύπου του φορτίου που προκαλεί την διαταραχή και επομένως μπορεί να αναγνωριστεί με αυτόν τον τρόπο. Η συνιστώσα της παραμόρφωσης μπορεί και κινείται μέσα στο δίκτυο και προσθέτει υψίσυχνες πτώσεις τάσης που επηρεάζουν και τον γειτονικό εξοπλισμό.

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:



- 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 ουδέτερου – γης είναι μη αποδεκτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδέτερου 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.

### **1.9.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

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.

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.

#### **Φίλτρα απόσβεσης αρμονικών**

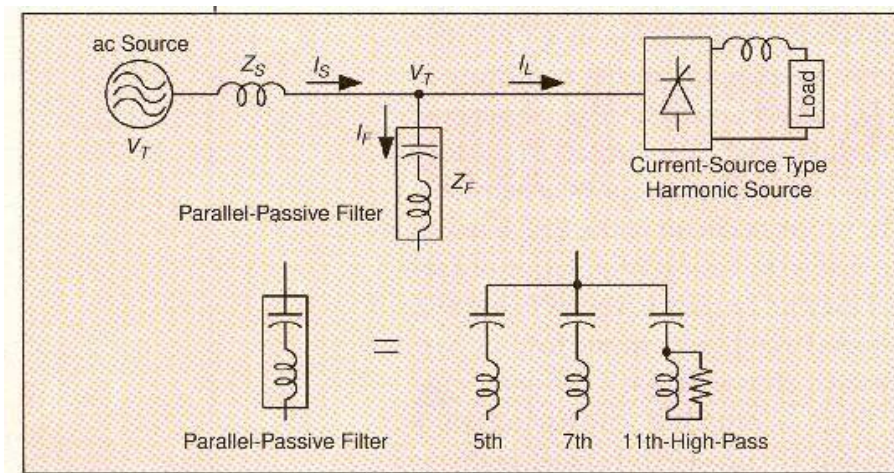
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αντιμετώπιση του προβλήματος των αρμονικών ρεύματος γίνεται με την εγκατάσταση κατάλληλων φίλτρων. Η επιλογή του τύπου του φίλτρου, του μεγέθους του και της συνδεσμολογίας, γίνεται μετά από μετρήσεις αρμονικών ρεύματος και τάσης στα διάφορα φορτία της εγκατάστασης. Επιπλέον απαιτούνται 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.

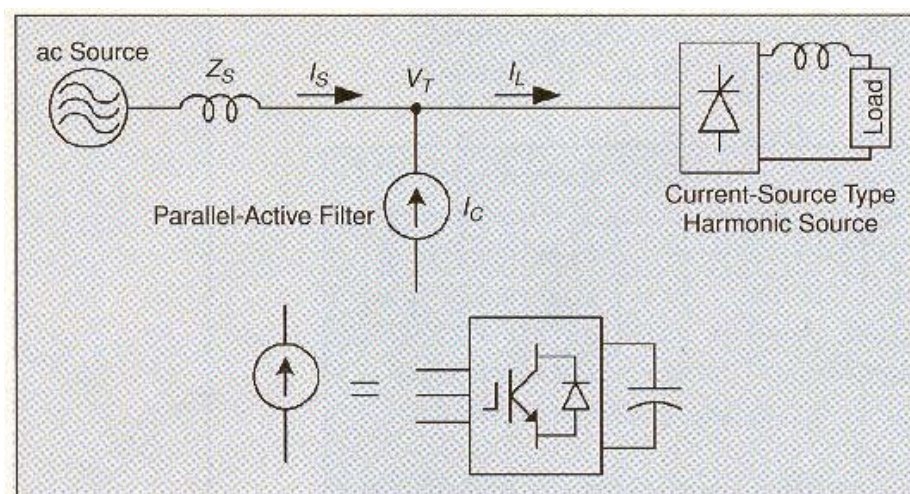
Η επίλυση του προβλήματος των αρμονικών καθορίζεται από το εάν είναι επιθυμητά ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω:

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

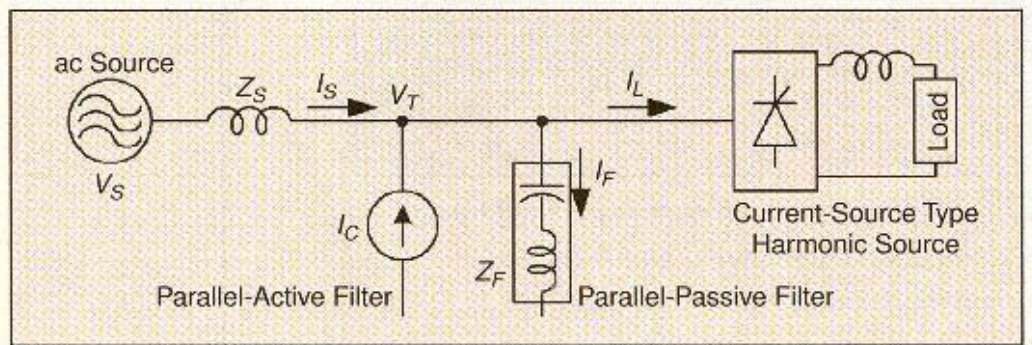
Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν ορισμένες από τις πιθανές λύσεις.



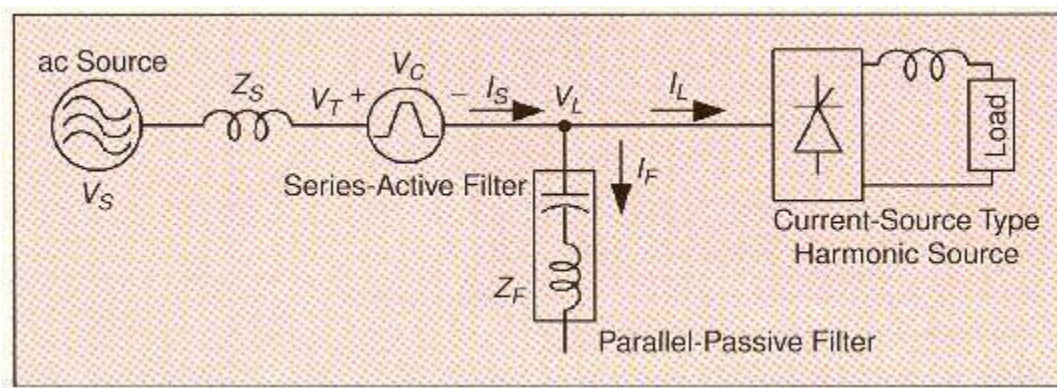
**Σχημα 24** Παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $F$  τα στοιχεία του φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.



**Σχημα 25** 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.



**Σχημα 26** 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.

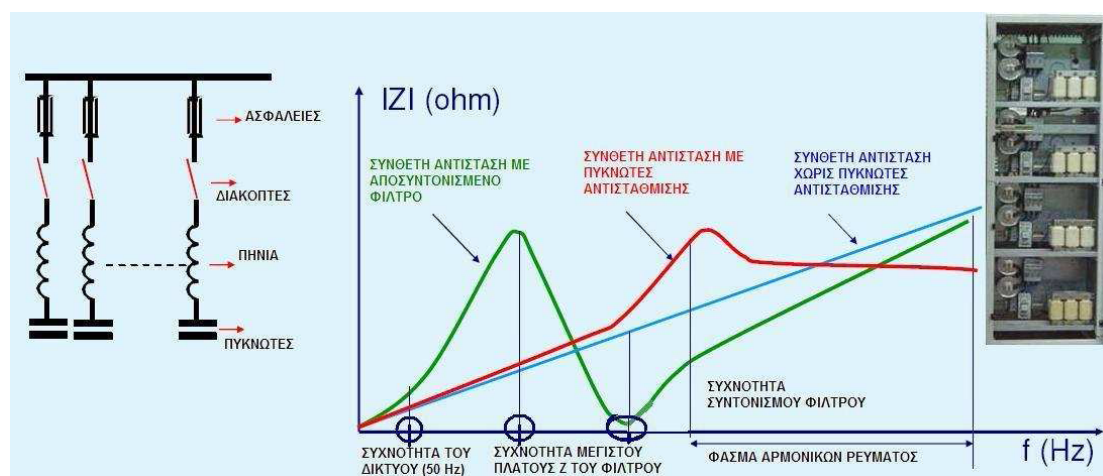


**Σχημα 27** Ενεργό εν σειρά και παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο, όπου με  $s$  τα στοιχεία της γεννήτριας,  $C$  τα στοιχεία του ενεργού,  $F$  του παθητικού φίλτρου και  $L$  τα στοιχεία του καταναλωτή.

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 διαστασιοποιημένων, 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.

Ο τρόπος με τον οποίο τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν τις αρμονικές του δικτύου φαίνεται καλύτερα και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1.2.6.1-5) συσχετισμού της σύνθετης αντίστασης ενός κλάδου και της συχνότητας του ρεύματος το οποίο τον διαρρέει.

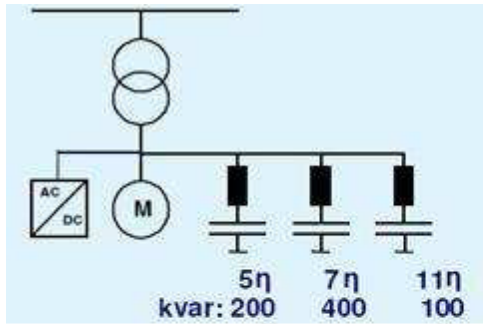


Σχήμα 28 απεικόνιση ενός αποσυντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του.

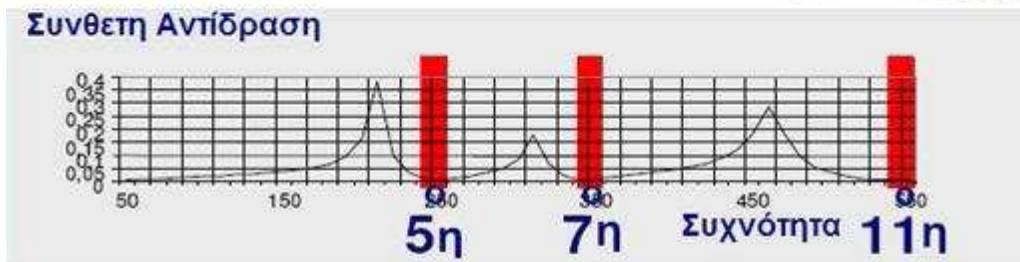
Στο πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης του κλάδου ενός αποσυντονισμένου φίλτρου σε σχέση με αυτήν που θα είχε ο κλάδος αυτός αν δεν υπήρχε το φίλτρο. Στην περίπτωση λοιπόν που τοποθετείται αποσυντονισμένο φίλτρο σε κάποιο σημείο του δικτύου, αυτό εμφανίζει μία 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



Ζυγός του Συστήματος:  
Γράφημα Σύνθετης Αντίδρασης - Συχνότητας

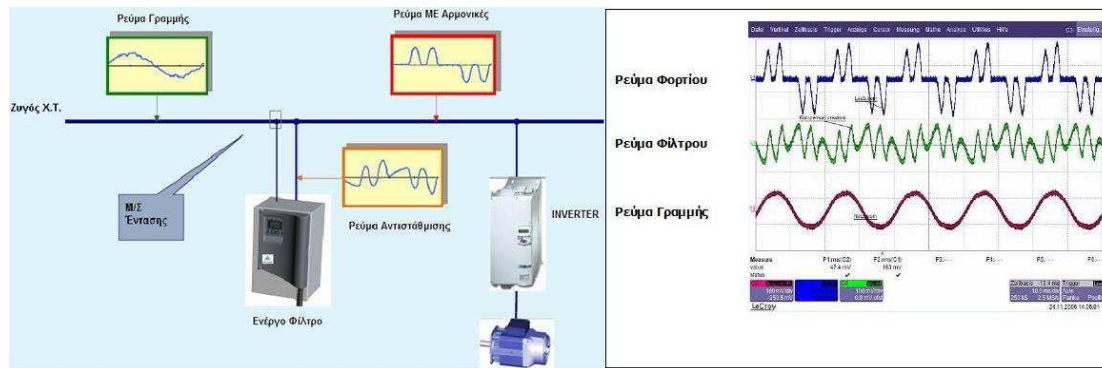


Σχημα 29 απεικόνιση ενός συντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του.

Με τα συντονισμένα φίλτρα αποκοπής αρμονικών επιτυγχάνεται άριστη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο καθώς αποκόπτον 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 αποκόπτον.

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.

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 που ακολουθεί.



**Σχημα 30** 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.

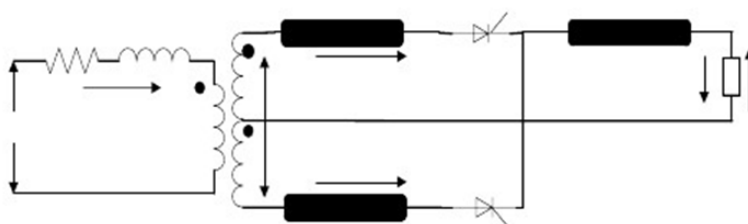
Το μεγαλύτερό τους μειονέκτημα αποτελεί το κόστος τους, το οποίο δεδομένου του γεγονότος ότι δεν αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ, είναι κατά πολύ αυξημένο σε σχέση με τη λύση ενός παθητικού φίλτρου, το οποίο πετυχαίνει και βελτίωση του συντελεστή ισχύος στο δίκτυο που τοποθετείται

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΥΟΥΣ

### 2.1 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΡΘΩΣΕΙΣ ΚΟΙΝΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ

Πρέπει να αναφερθεί ότι πολλοί εμπορικοί και οικιακοί χρήστες απαιτούν dc ρεύμα για την λειτουργία τους. Ένας μονοφασικός ελεγχόμενος μετατροπέας αναπαριστάται όπως στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.** : Μονοφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής κοινού σημείου.

Η παραπάνω διάταξη είναι πολύ δημοφιλής για τις παραπάνω χρήσεις εξαιτίας και του μειωμένου κόστους και της μικρής ευαισθησίας στις μεταβολές της τάσης εισόδου. Αν το φορτίο είναι μια μπαταρία, ο ανορθωτής τότε θα λέγεται φορτιστής μπαταρίας. Αν το φορτίο είναι μια dc μηχανή τότε ο ανορθωτής θα είναι ένα drive για dc μηχανή το οποίο ελέγχει την τάση στα άκρα της μηχανής και έτσι την αντί-Ηλεκτρεγερτική Δύναμη και την ταχύτητα μέσω της γωνίας έναυσης του SCR  $\alpha$ .

$$n = \frac{Ec}{k\phi} = Va - Ia * \frac{Ra}{k\phi}$$

$$Va = 2Vm * \frac{\cos\alpha}{\pi}$$

όπου  $n$  είναι η ταχύτητα της μηχανής σε ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό),

$Ec$  είναι η αντί-Ηλεκτρεγερτική Δύναμη της μηχανής,

$k$  είναι σταθερά  $k = Zp/60a$

$\phi$  είναι η ροή ανά πόλο.

$Va$  είναι η τάση στα άκρα της μηχανής

$Ia$  είναι το ρεύμα γραμμής της μηχανής



$R_a$  είναι η αντίσταση του ρότορα  
 $Z$  είναι ο αριθμός των «ενεργών» αγωγών  
 $p$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων  
 $a$  είναι ο αριθμός των ζευγών των παράλληλων διαδρομών  
 $V_m$  είναι η μέγιστη τάση του ac «κομματιού» της μηχανής.  
 $\alpha$  είναι η γωνία έναυσης του SCR (Thyristor).  
 Αν το  $\alpha$  μειώνεται τότε το  $V_a$ , το  $E_c$  και το  $\eta$  θα αυξηθούν.

### Επίδραση της αυτεπαγωγής $L_c$

Πρώτα θα πρέπει να αναφερθεί ότι με την χρήση αυτής της αυτεπαγωγής μειώνεται η μέση τιμή της τάσης κατά 5%. Η χρήση αυτής της αυτεπαγωγής όμως έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει προστασία στο SCR (Thyristor) από την γρήγορη αύξηση του ρεύματος (προστασία  $di/dt$ ) κατά την διάρκεια της μεταγωγής. Κατά την διάρκεια της μεταγωγής άγουν και τα δύο Thyristor με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια της η τάση κατά μήκος της αυτεπαγωγής  $L_c$  να είναι :

$$v_i(t) = V_m * \sin(\omega t)$$

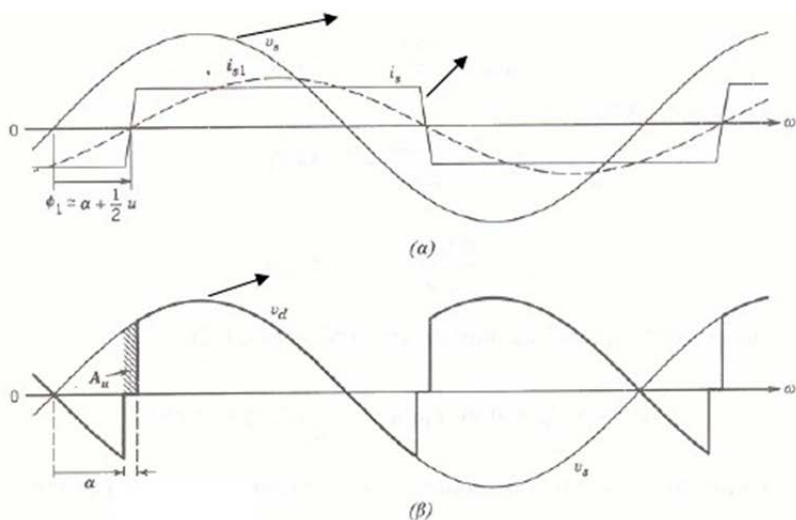
κατά την διάρκεια της μεταγωγής

όπου  $m S V = \sqrt{2} V_s$  είναι η μέγιστη τάση της ac πλευράς  
 Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με  $d(\omega t)$  και ολοκληρώνοντας στο διάστημα μεταγωγής προκύπτει :  $\int \sqrt{2} V_s * \sin(\omega t) d(\omega t) = \omega L_c \int di = 2 \omega L_c * I_d$

όπου  $I_d$  είναι το ρεύμα που θεωρείται σταθερό στην dc πλευρά και

$V_s$  είναι η rms τιμή της τάσης στην ac πλευρά.

Έτσι σε αυτό το διάστημα  $\mu$  που άγουν και τα δύο Thyristor, η τάση στην dc πλευρά είναι 0. Το αριστερό μέρος της παραπάνω εξίσωσης είναι το εμβαδόν  $A$  της γραφικής παράστασης



**Σχήμα 2:** Κυματομορφές του Σχηματος

---


$$2\omega Lc * Id \quad \text{Έτσι το εμβαδόν είναι } A = \sqrt{2}V_s * (\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)) =$$

Οπότε

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos\alpha - 2\omega * Ls * \frac{Id}{\sqrt{2}V_s}$$

όπου  $I_d$  είναι το ρεύμα που θεωρείται σταθερό στην dc πλευρά

$V_s$  είναι η rms τιμή της τάσης στην ac πλευρά

LC είναι η αυτεπαγωγή που μπαίνει σε σειρά με το Thyristor για να το προστατεύσει από γρήγορες μεταβολές στο ρεύμα είναι η γωνία έναυσης των Thyristor και  $\alpha + \mu$  είναι η γωνία στην οποία έχει ολοκληρωθεί η μεταγωγή του ρεύματος από το ένα Thyristor στο άλλο.

Όλη η παραπάνω ανάλυση μπορεί να γίνει και με το ρεύμα, οπότε :

$$i_1(\alpha + \mu) = i_d(\alpha) = I_d =$$

$$i_1(\alpha + \mu) = i_d(\alpha) = I_d =$$

$$= 1/\omega Lc [2V_s * \sin(\omega t) d(\omega t) =$$

$$= V_m (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)) / \omega Lc =$$

$$= \cos(\alpha + \mu) = \cos\alpha - \omega Lc I_d / \sqrt{2}V_s$$

όπου το  $\omega t = \alpha + \mu$  αναπαριστά το τέλος της μεταγωγής και με δεδομένο ότι το ρεύμα στην πλευρά παραμένει σταθερό.

Για έναν μονοφασικό πλήρους κύματος ανορθωτή με διόδους (γωνία έναυσης  $\alpha = 0$ ), το  $\omega t = \mu$  αναπαριστά το τέλος της μεταγωγής και

$$\cos\mu = 1 - \omega Lc I_d / \sqrt{2}V_s$$

όπου  $I_d$  είναι το ρεύμα που θεωρείται σταθερό στην dc πλευρά

$V_s$  είναι η rms τιμή της τάσης στην ac πλευρά

LC είναι η αυτεπαγωγή που μπαίνει σε σειρά με το Thyristor για να το προστατεύσει από γρήγορες μεταβολές στο ρεύμα

$\alpha$  είναι η γωνία έναυσης των Thyristor και

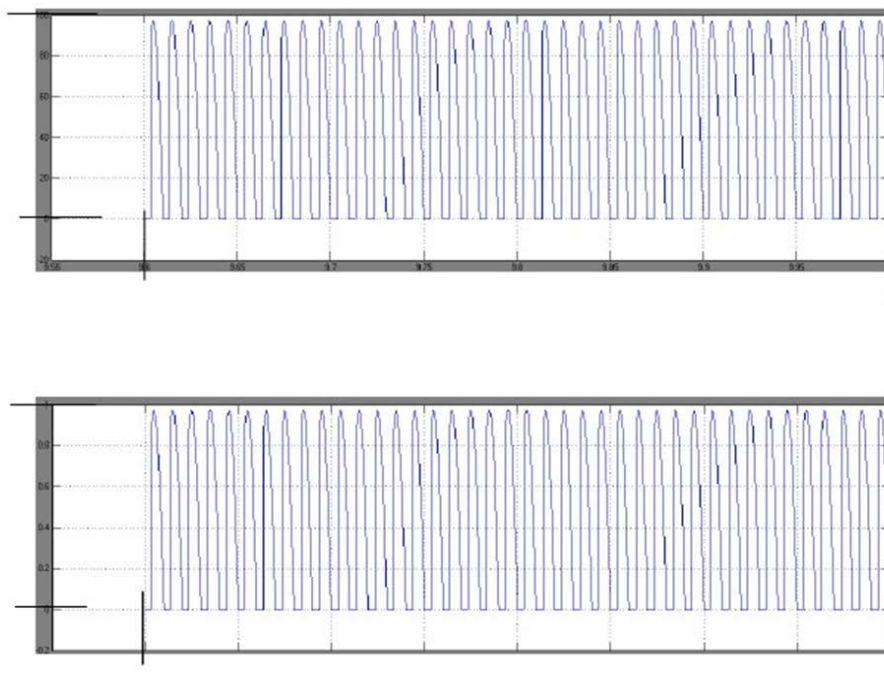
$\alpha + \mu$  είναι η γωνία στην οποία έχει ολοκληρωθεί η μεταγωγή του ρεύματος από το ένα Thyristor στο άλλο.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω γραφήματα το ρεύμα είναι αρκετά μη-γραμμικό με αποτέλεσμα την ύπαρξη αρμονικών.

---

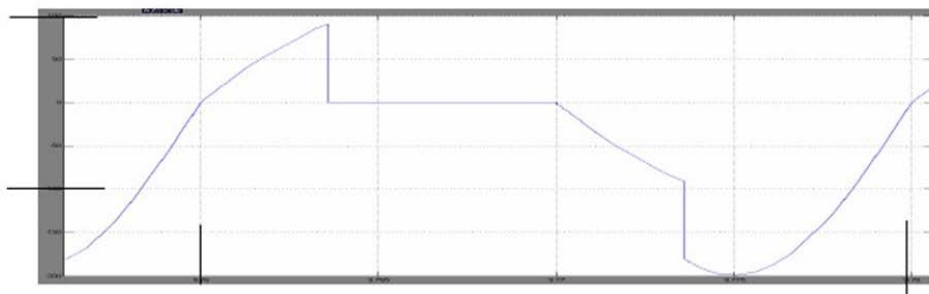
### Επίδραση της μηδενικής αυτεπαγωγής $L_d$ στις αρμονικές συνιστώσες

Για τον μονοφασικό ανορθωτή κοινού σημείου του Σχήματος το SCR1 (Thyristor) άγει κατά την διάρκεια του θετικού μισού κύκλου και το SCR2 άγει κατά την διάρκεια του αρνητικού μισού κύκλου. Για γωνία έναυσης  $\alpha = 60^\circ$ , τάση φορτίου  $v_o$  και η τάση κατά μήκος του φορτίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 3 :** Τάση κατά μήκος του φορτίου  
και Ρεύμα που διαρρέει το φορτίο

Η τάση κατά μήκος του SCR1 είναι :



---

**Σχήμα 4** : Τάση κατά μήκος του SCR

Τα ρεύματα στην ac και dc πλευρά είναι όπως :

$$I_{dc}(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

$$I_{ac}(t) = i_1(t) - i_2(t)$$

όπου τα  $i_1$  και  $i_2$  είναι όπως στο Σχήμα.

Με  $L_d = 0$  η μέση τιμή της τάσης του φορτίου είναι :

$$V_a = \alpha v(v_o(t)) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} (\int \sqrt{2} V_s * \sin(\omega t) d(\omega t) +$$

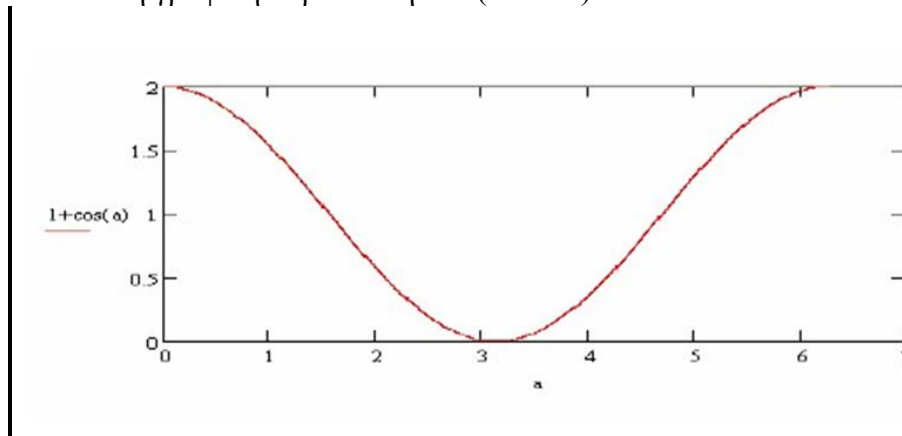
$$\int -\sqrt{2} V_s * \sin(\omega t) d(\omega t)) = \frac{-\sqrt{2} V_s}{2\pi} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi} \cos(\omega t) =$$

$$\frac{\sqrt{2} V_s}{\pi} (1 - \cos(\alpha))$$

όπου  $V_s$  είναι η rms τιμή της τάσης στην ac πλευρά και

$\alpha$  είναι η γωνία έναυσης των thyristor.

και η γραφική παράσταση του  $(1 + \cos \alpha)$  :



**Σχήμα 5** : Σχεδιάγραμμα της τιμής της παράστασης  $1 + \cos \alpha$  σε συνάρτησιν με το  $\alpha$ .

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα σχήματα (Σχήμα 1-Σχήμα 2) η τάση και το ρεύμα του φορτίου είναι εντόνως μη-γραμμικά παρασύροντας έτσι και την τάση και το ρεύμα της ac πλευράς να είναι μη-γραμμικά. Το Παράδειγμα 1 είναι διαφωτιστικό ως προς τις αρμονικές που περιέχει το ρεύμα της ac πλευράς.

### 2.1.1 Παράδειγμα 1

Το ρεύμα της ac πλευράς του μονοφασικού ανορθωτή είναι :

**Σχήμα Π. 1** : Κυματομορφή ρεύματος ac πλευράς του μονοφασικού ελεγχόμενου ανορθωτή κοινού σημείου για  $\alpha = 60^\circ$ .

Να γίνει η εύρεση των συντελεστών Fourier της κυματομορφής του Σχήματος Π 1;

Η ανάπτυξη σε σειρά Fourier της παραπάνω κυματομορφής δείχνει ότι έχει μηδενική dc συνιστώσα όπως εύκολα φαίνεται και από την κυματομορφή. Επίσης δεν έχει

καθόλου ζυγές αρμονικές αφού είναι συμμετρική ημίσεως κύματος ( $f(t \pm T/2) = -f(t)$ ).

Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω :

$$\sin(x)\sin(hx) = \frac{1}{2} [\cos((h-1)x) - \cos((h+1)x)]$$

$$\sin(x)\sin(hx) = \frac{1}{2} [\sin((h+1)x) - \sin((h-1)x)]$$

$$\sin^2(x) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2x))$$

$$\sin(2x) = 2\sin(x)\cos(x)$$

Άρα οι συντελεστές Fourier είναι :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} (\int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) d(\omega t) + \int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) d(\omega t))$$

$$A_h = \frac{1}{\pi} (\int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) \cos(h\omega t) d(\omega t))$$

$$B_h = \frac{1}{\pi} (\int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) \sin(h\omega t) d(\omega t) + \int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) \sin(h\omega t) d(\omega t))$$

όπου  $I_s$  είναι η rms τιμή του ρεύματος της ac πλευράς.

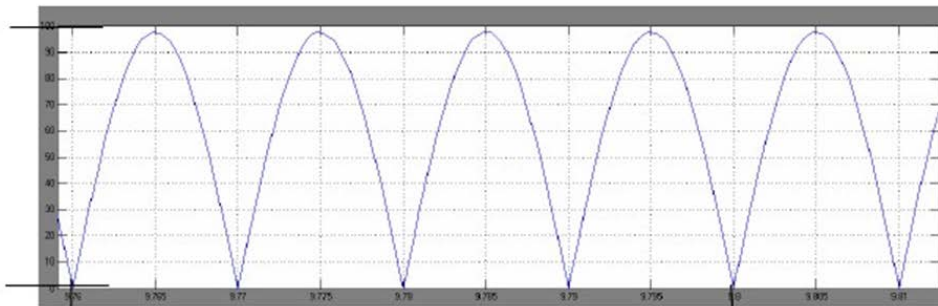
Οπότε οι συντελεστές Fourier είναι όπως :

$$i_{ac}(t) = \sum A_h \cos(h\omega t) + B_h \sin(h\omega t)$$

**Επίδραση της μηδενικής αυτεπαγωγής  $L_d$  στο περιεχόμενο τάσης και ρεύματος σε αρμονικές συνιστώσες - Ειδική Περίπτωση  $\alpha = 0$ . (Περίπτωση Διόδου)**

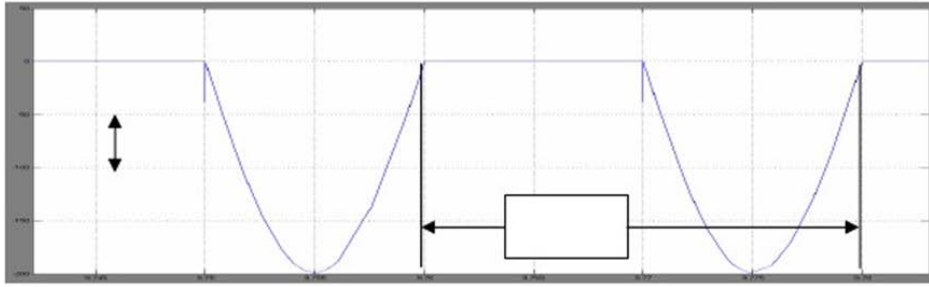
Στην ειδική περίπτωση που η γωνία έναυσης είναι  $\alpha = 0$ .

Η τάση του φορτίου είναι :



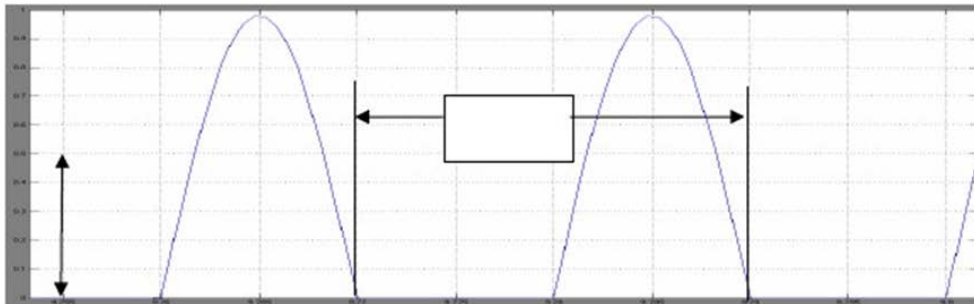
**Σχήμα 6:** Τάση φορτίου στο Σχημα για  $\alpha=0$ . 9,8

Η τάση κατά μήκος του SCR1 είναι :



**Σχήμα 7:** Τάση κατά μήκος του SCR 1 για  $\alpha=00$ .

Το ρεύμα στο πρώτο SCR1 είναι :



**Σχήμα 8 :** Ρεύμα που διαρρέει το SCR 1 για  $\alpha=00$ .

Το ρεύμα στο φορτίο είναι της ίδιας μορφής με την τάση που φαίνεται σε παραπάνω σχήμα (Σχ. 4). Η μέση τιμή της τάσης και το μέσο dc ρεύμα του φορτίου είναι :

$$V_o = \alpha v(v_o(t))$$

$$\frac{1}{2\pi} \left( \int \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) d(\omega t) + \int \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) d(\omega t) \right)$$

$$I_d = \alpha v(i_d(t))$$

$$I_1 = \alpha v(i_1(t)) = \frac{1}{2\pi} \left( \int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) d(\omega t) \right) = \frac{2\sqrt{2}I_s}{\pi}$$

$$I_{1\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left( \int (\sqrt{2}I_s)^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t) \right)} = \frac{2\sqrt{2}I_s}{\pi}$$

$$I_{ac} = \alpha v(i_{ac}(t)) = \frac{1}{2\pi} \left( \int \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) d(\omega t) \right) = 0$$

$$I_{ac\text{ rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left( \int (\sqrt{2}I_s)^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t) \right)} = \frac{\sqrt{2}I_s}{\sqrt{2}} = I_s$$

όπου  $V_S$  και  $I_S$  είναι η rms τιμή της τάσης και του ρεύματος της ac πλευράς του Σχήματος το  $i_1$  είναι όπως στο Σχήμα

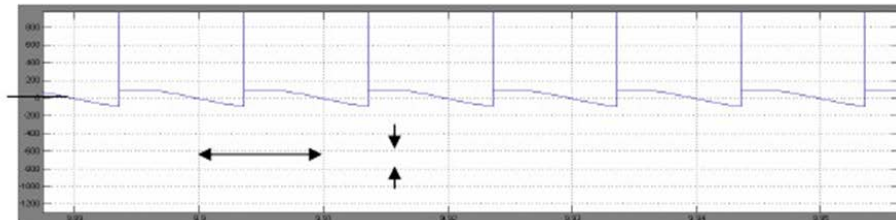
**Μελέτη των αρμονικών στην περίπτωση μεγάλης αυτεπαγωγής  $L_d$  (ρεύμα**

φορτίου συνεχές, χωρίς να μηδενίζεται ούτε και στιγμιαίως (no zero crossing)

με ( $\alpha=600$ ) .

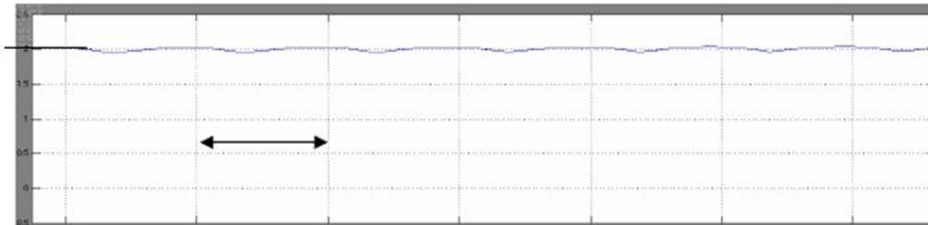
Σε αυτή την περίπτωση με μεγάλη αυτεπαγωγή του φορτίου, το ρεύμα του φορτίου  $i_d$  θα είναι συνεχές και συνεπώς και η τάση του συνεχής.

Η τάση του φορτίου είναι όπως :



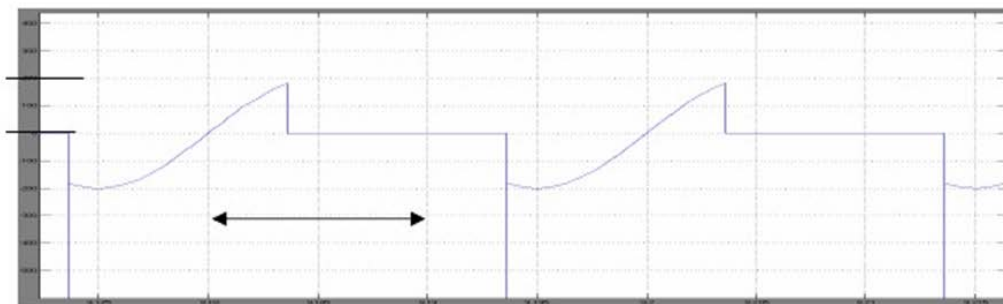
**Σχήμα 9:** Τάση φορτίου του Σχ. για  $\alpha=600$  και μεγάλη  $L_d$ .

Το ρεύμα κατά μήκος του φορτίου είναι :



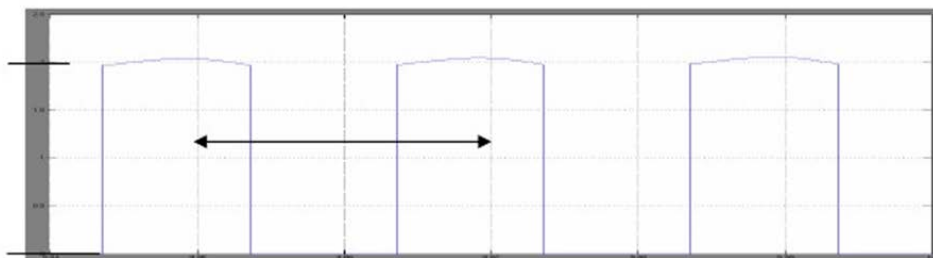
**Σχήμα 10 :** Ρεύμα φορτίου του Σχ. 1 για  $\alpha=600$  και μεγάλη  $L_d$ .

Η τάση κατά μήκος του SCR1 είναι :



**Σχήμα 11:** Τάση κατά μήκος του SCR 1 για  $\alpha=600$  και μεγάλη  $L_d$

Το ρεύμα κατά μήκος του SCR1 είναι :



**Σχήμα 12:** Ρεύμα που διαρρέει το SCR 1 για  $a=600$  και μεγάλη  $L_d$   
 Η μέση τιμή της τάσης του φορτίου είναι :

$$\begin{aligned}
 V_o &= \alpha v(v_o(t)) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left( \int \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) \right) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left( \int -\sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) + \right. \\
 &\quad \left. + \int \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) + \int -\sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) + \right) \\
 &= 2\sqrt{2} V_s * \frac{\cos a}{\pi}
 \end{aligned}$$

Η μέση τιμή της τάσης του SCR1 είναι :

$$v_{scr1}(t) = v_i(t) - v_o(t)$$

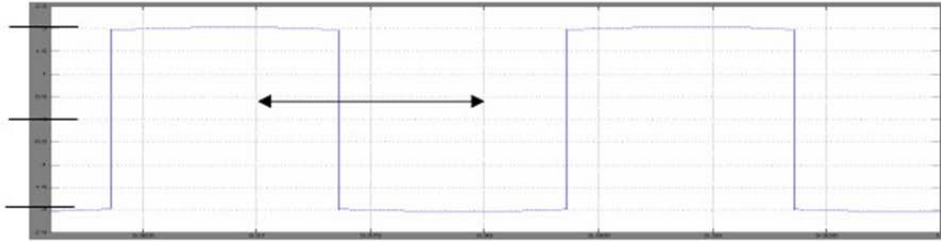
$$\begin{aligned}
 V_{scr1} &= \alpha v\{v_{scr1}(t)\} = 1/2\pi \left( \int 2 * \sqrt{2} V_s * \sin(\omega t) + \int 2 * \sqrt{2} V_s * \right. \\
 &\quad \left. \sin(\omega t) d(\omega t) \right) \\
 &= - \frac{2\sqrt{2} V_s \cos a}{\pi}
 \end{aligned}$$

όπου  $V_S$  είναι η rms τιμή της τάσης της ac πλευράς του Σχήματος και  $a$  είναι η γωνία έναυσης των thyristor.

### **2.1.2 Παράδειγμα 2**



Το ρεύμα στην ac πλευρά στην παραπάνω περίπτωση είναι :



**Σχήμα Π2. 1 :** Ρεύμα ac πλευράς για το Σχήμα με τις συνθήκες της παραπάνω ενότητας .

Όπως φαίνεται μπορεί να το θεωρήθει ως σταθερό  $I$  χωρίς τον ελαφρύ κυματισμό. Η ανάλυση σε σειρά Fourier της παραπάνω κυματομορφής δείχνει ότι η παραπάνω κυματομορφή

δεν έχει dc συνιστώσα και δεν έχει ζυγές αρμονικές αφού είναι συμμετρική ημίσεως κύματος

$$f(t \pm T/2) = -f(t).$$

Οι συντελεστές Fourier είναι :

$$A_0 = \frac{1}{2} (\int -I d(\omega t) + \int I d(\omega t) + \int -I d(\omega t)) = 0$$

$$A_h = \frac{2}{2\pi} \left( \int -I * \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int I * \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int -I * \cos(h\omega t) d(\omega t) \right)$$

$$= \frac{2I}{\pi h} \left( \sin\left(\frac{4\pi h}{3}\right) - \sin\left(\frac{\pi h}{3}\right) \right)$$

$$= \frac{2I}{\pi h} \{-\sqrt{3} \text{ h} = 1,7,13,19 \dots \sqrt{3} \text{ h} = 5,11,17..\}$$

$$B_h = \frac{2}{2\pi} \left( \int -I * \sin(h\omega t) d(\omega t) + \int I * \sin(h\omega t) d(\omega t) + \int -I * \sin(h\omega t) d(\omega t) \right)$$

$$= \frac{2I}{\pi h} \left( \cos\left(\frac{4\pi h}{3}\right) - \cos\left(\frac{\pi h}{3}\right) \right)$$

$$= \frac{2I}{\pi h} \{1 \quad h = 1,5,7,13,19 \dots - 2 \quad h\}$$

όπου I είναι το συνεχές σταθερό ρεύμα της dc πλευράς.

Επιπλέον

$$Ch = \sqrt{Ah^2} + Bh^2 = \frac{2I}{\pi h} \{0 \quad h=2n=2,4,6,8,10,12,14 \quad 2 \quad \text{αλλιώς}\}$$

$$\psi_h = \tan^{-1} \left( \frac{Ah}{Bh} \right) = \left\{ -\frac{\pi}{3} \quad h = 1,7,13,19 \dots \quad \frac{\pi}{3} \quad h = 5,11,17, \dots \quad 0 \quad h = 3,9,15 \dots \right.$$

Οπότε είναι :

$$i_{ac}(t) = \sum Ah * \cos(h\omega t) + Bh * \sin(h\omega t)$$

Η

$$i_{ac}(t) = \sum Ch * \sin(h\omega t + \psi_h) + \sum \frac{4I}{\pi h} * \sin(h\omega t)$$

Η RMS τιμή του ρεύματος είναι :

$$I_{rms} = \sqrt{\sum \frac{Ch^2}{2}} = I$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα είναι :

$$i_{ac}(t) = \frac{2I}{\pi} [\sin(\omega t) - \sqrt{3} \cos(\omega t)] = \frac{4I}{\pi} \sin(\omega t - 60^\circ)$$

$$\sin(\omega t - 150^\circ) = -\frac{4I}{\pi} \sin(\omega t + 30^\circ)$$

κι έχει RMS τιμή:

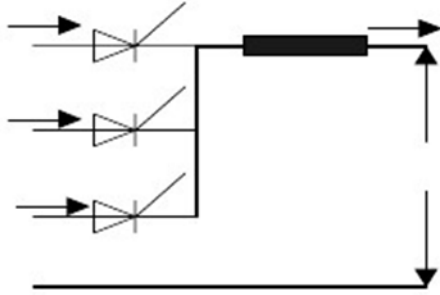
$$I_1 \text{ RMS} = \frac{4I}{\pi\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi}$$

Το THD του ρεύματος είναι :

$$THD_I = \frac{1}{I^1} \sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I^1_{rms}}\right)^2} - 1 = \sqrt{(\pi^2/8)} - 1 = 0,4834 \text{ η } 48,34\%$$

## 2.2 ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΚΟΙΝΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τριφασική ελεγχόμενη ανόρθωση κοινού σημείου. Η τάση εξόδου  $V_d$  έχει τρεις παλμούς σε κάθε κύκλο λειτουργίας



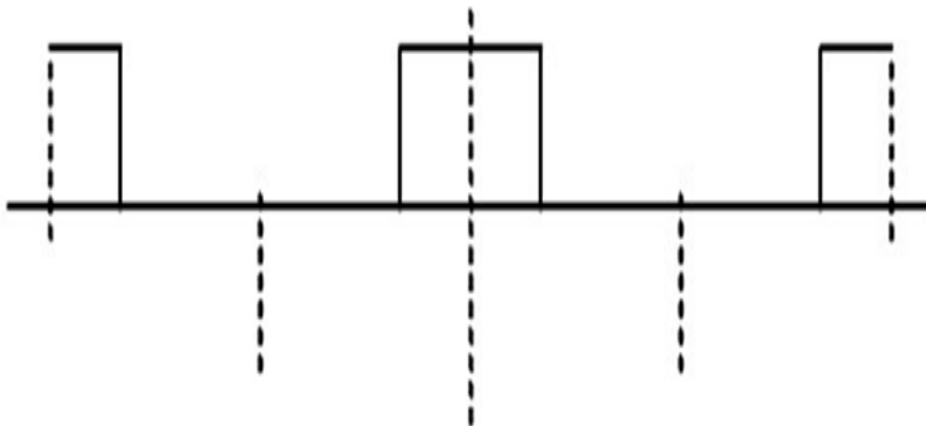
**Σχήμα 1 :** Τριφασική ελεγχόμενη ανόρθωση κοινού σημείου

Είναι γνωστό ότι η μέση τιμή της τάσης εξόδου του Σχήματος 3. 21 είναι

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int \sqrt{2}V_m * \cos(\omega t) d(\omega t)$$

όπου  $V_m$  είναι η rms τιμή της φασικής τάσης εισόδου

Το ρεύμα  $I_o$  που διαρρέει το φορτίο στο Σχήμα 3.22 αποτελείται από θετικούς παλμούς:



**Σχήμα 2 :** Θετικοί παλμοί. Ρεύμα  $I_o$ . [

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 2) το μηδέν θεωρείται ότι βρίσκεται

στο μέσον ενός παλμού. Επειδή η συνάρτηση του  $I_o$  είναι άρτια συνάρτηση άρα οι συντελεστές Fourier θα έχουν μόνο συνημιτονικούς όρους. Οι σχετιζόμενοι συντελεστές Fourier του ρεύματος είναι .

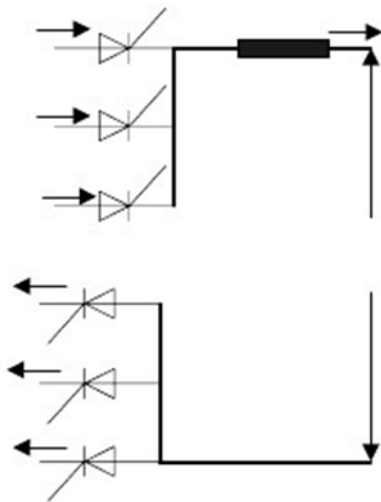
$$A_o = \frac{1}{2\pi} \int d(\omega t) = \frac{1}{3}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)$$

Άρα η ανάλυση Fourier της συνάρτησης του Σχήματος 2 είναι :

$$i(t) = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cos(2\omega t) + \right) + \frac{1}{3} \sin(\pi) \cos(3\omega t) + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \cos(4\omega t) + \dots$$

Στο παρακάτω Σχήμα 3 παρουσιάζεται μια τριφασική ελεγχόμενη γέφυρα. Η τάση εξόδου  $V_d$  έχει έξι παλμούς σε κάθε κύκλο λειτουργίας αφού τα πάνω ημιαγωγικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την ανόρθωση του θετικού μέρους της τάσης ενώ τα κάτω για την ανόρθωση του αρνητικού μέρους.



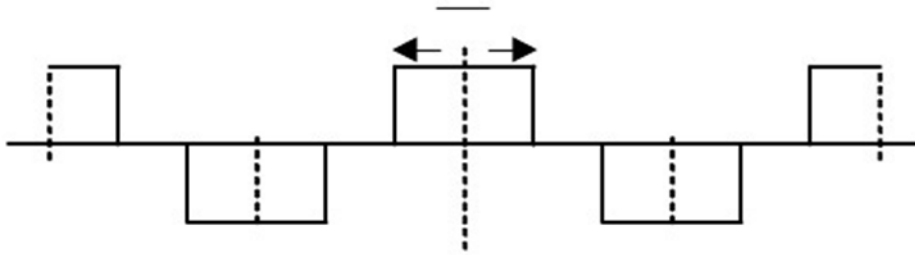
**Σχήμα 3:** Τριφασική ελεγχόμενη γέφυρα

Είναι γνωστό ότι η μέση τιμή της τάσης εξόδου του Σχήματος 3 είναι :

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int \sqrt{2}\sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_m}{\pi}$$

όπου  $V_m$  είναι η τιμή της rms τιμής της φασικής τάσης εισόδου.

Το ρεύμα  $I_0$  που διαρρέει το φορτίο στο Σχήμα 3 αποτελείται από θετικούς και αρνητικούς παλμούς:



**Σχήμα 4** : Θετικοί παλμοί. Ρεύμα  $I_0$ .

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3) το μηδέν θεωρείται ότι βρίσκεται στο μέσον ενός παλμού. Επειδή η συνάρτηση του  $I_0$  είναι άρτια συνάρτηση άρα οι συντελεστές Fourier θα έχουν μόνο συνημιτονικούς όρους. Άρα η ανάλυση Fourier της συνάρτησης του Σχήματος 3 είναι:

$$i(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(\pi) \cos(3\omega t) \right)$$

$$+ \frac{1}{5} \sin\left(\frac{5\pi}{3}\right) \cos(5\omega t) + \dots$$

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΕΡΓΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ**

### **3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ**

Η χρησιμοποίηση παθητικών φίλτρων είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος αντιμετώπισης των αρμονικών διαταραχών. Τα παθητικά φίλτρα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι RLC κυκλώματα και χωρίζονται σε κατωπερατά, υπερπερατά, ζωνοπερατά και ζωνοφρακτικά. Έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος και βάρος και μπορούν να λειτουργήσουν μόνο σε συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων δηλαδή μπορούν να «κόψουν» μόνο συγκεκριμένες αρμονικές. Παράλληλα προκαλούν συντονισμό (resonance) στο σύστημα. Ένα παθητικό φίλτρο δεν είναι ελεγχόμενο και το φιλτράρισμα είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών της σύνθετης αντίστασης.

Αντίθετα τα ενεργά φίλτρα αποτελούνται από διακοπτικές διατάξεις, χωρίς την παρουσία παθητικών στοιχείων. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο για την αντιστάθμιση των αρμονικών, όσο και για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος. Η λογική στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των ενεργών φίλτρων, σε αντίθεση με τα παθητικά φίλτρα, είναι να παράγουν ρεύμα αντιστάθμισης ίσο και αντίθετο με το αρμονικό ρεύμα του φορτίου. Με αυτό τον τρόπο το εναλλασσόμενο ρεύμα της πηγής είναι απαλλαγμένο από αρμονικές.

### **3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ**

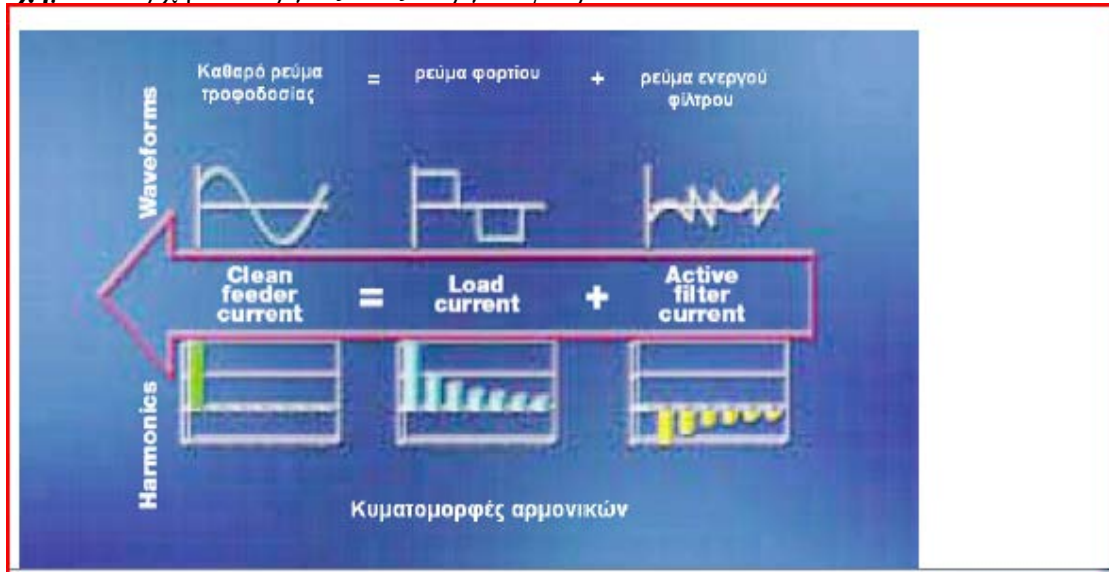
Η βασική αρχή λειτουργίας των ενεργών φίλτρων είναι εντελώς διαφορετική από την αντίστοιχη των παθητικών φίλτρων. Συγκεκριμένα το ενεργό φίλτρο υπολογίζει τα αρμονικά ρεύματα παραμόρφωσης και παράγει ένα φάσμα αρμονικού ρεύματος αντίθετης φάσης από το ρεύμα της αρμονικής διαταραχής που υπολογίστηκε αρχικά.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

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος γραμμής του φορτίου αποτελείται από όλες τις αρμονικές εκτός της πρώτης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η βασική (1η) αρμονική απομονώνεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.

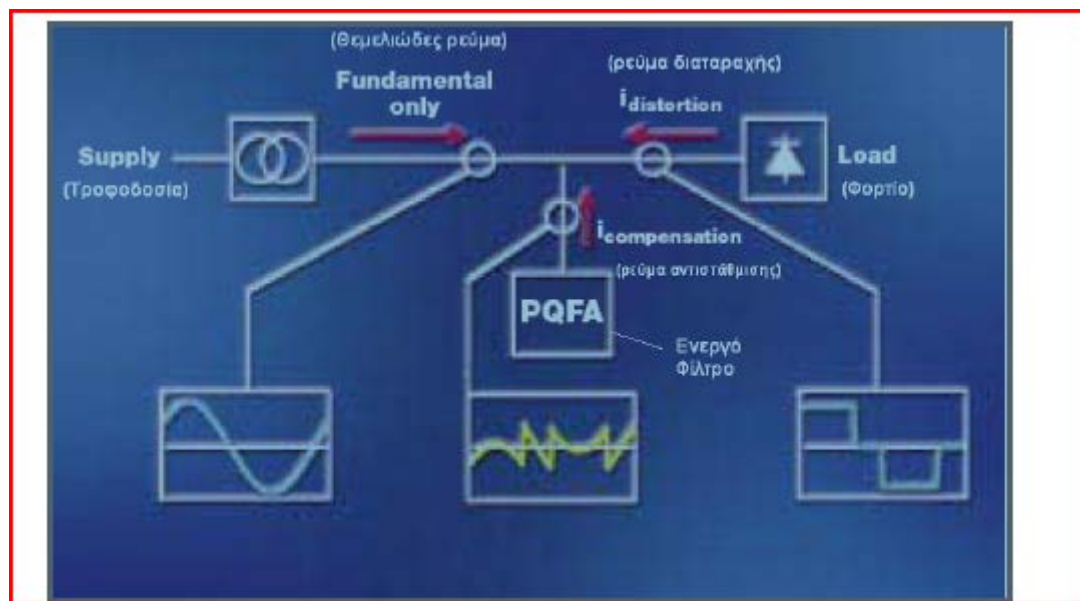
Στο σχήμα 1 απεικονίζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου όπου:

- idistortion είναι το ρεύμα παραμόρφωσης και
- icompensation είναι το ρεύμα αντιστάθμισης

Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου.

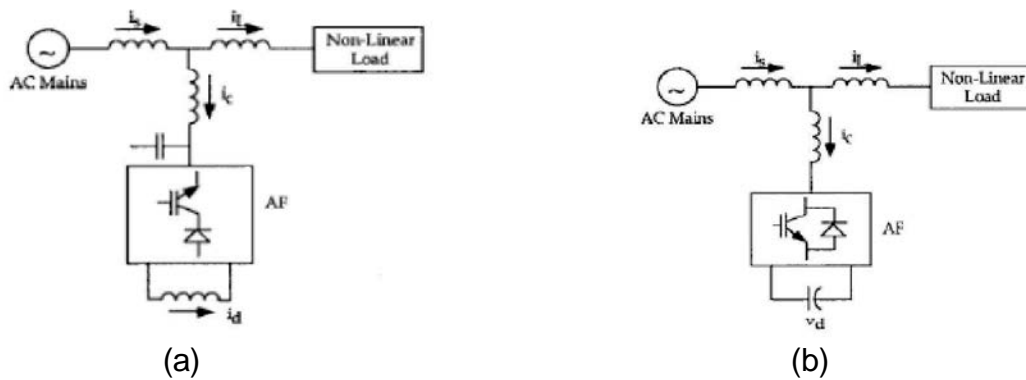


Σχήμα 2: Η ίδια αρχή λειτουργίας στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας



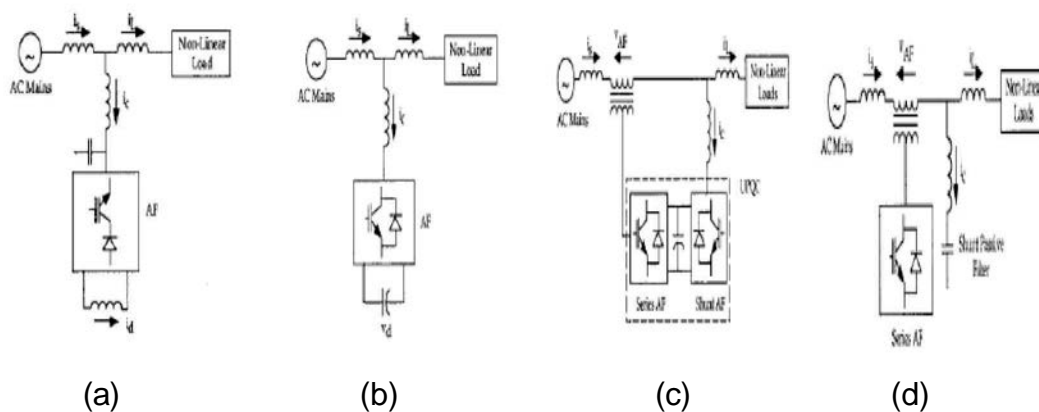
### 3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Ένας πρώτος διαχωρισμός των ενεργών φίλτρων μπορεί να γίνει με βάση το μέσο αποθήκευσης DC ενέργειας. Έτσι υπάρχουν τα φίλτρα πηγής ρεύματος (current source active filters) και τα φίλτρα πηγής τάσης (voltage source active filters).



Σχήμα 3: (α) φίλτρο πηγής ρεύματος, (β) φίλτρο πηγής τάσης.

Με βάση την τοπολογία τους τα ενεργά φίλτρα χωρίζονται σε παράλληλα φίλτρα, φίλτρα σε σειρά, σε unified power quality conditioners και τέλος σε υβριδικά φίλτρα.



Σχήμα 4: (α)παράλληλο φίλτρο, (β)σειριακό φίλτρο, (c)unified power quality conditioner, (δ)υβριδικό φίλτρο

### 3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ

Η σχεδίαση της πλειοψηφίας των ενεργών φίλτρων στην p-q theory ή διαφορετικά την instantaneous reactive theory. Η θεωρία αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά ακολούθως.

Όπως είναι γνωστό, σ' ένα τριφασικό σύστημα, οι 3 φάσεις μπορούν να παρασταθούν γραφικά σαν 3 διανύσματα, με διαφορά  $120^\circ$  μεταξύ τους.

Στο p-q σύστημα και στην περίπτωση συμμετρικού τριφασικού συστήματος, χωρίς την παρουσία ουδετέρου, υπάρχουν μόνο 2 συνιστώσες, η α και η β. Η α συνιστώσα είναι συμφασική με την α συνιστώσα του τριφασικού συστήματος, ενώ η συνιστώσα β είναι κάθετη στην α.

Ο μετασχηματισμός του ρεύματος και της τάσης περιγράφονται από τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις.



$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Η p-q θεωρία εισάγει ένα νέο μέγεθος, τη στιγμιαία φανταστική ισχύ, η οποία είναι το αντίστοιχο της στιγμιαίας άεργου ισχύος. Η μαθηματική έκφραση της φανταστικής ισχύος είναι:

$$q = e_\alpha \times i_\beta + e_\beta \times i_\alpha$$

Το διάνυσμα αυτό είναι κάθετο στο επίπεδο των  $\alpha$  και  $\beta$  συνιστωσών, άρα

$$q = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta$$

Συνολικά η στιγμιαία ισχύς  $p$  και η φανταστική στιγμιαία ισχύς  $q$  εκφράζονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Η μονάδα μέτρησης της στιγμιαίας ισχύος είναι το W, ενώ της φανταστικής ισχύος είναι το IVA (Imaginary Volt Ampere) που είναι μια υποθετική μονάδα μέτρησης έτσι ώστε να ξεχωρίζει η στιγμιαία φανταστική ισχύς από την άεργο ισχύ.

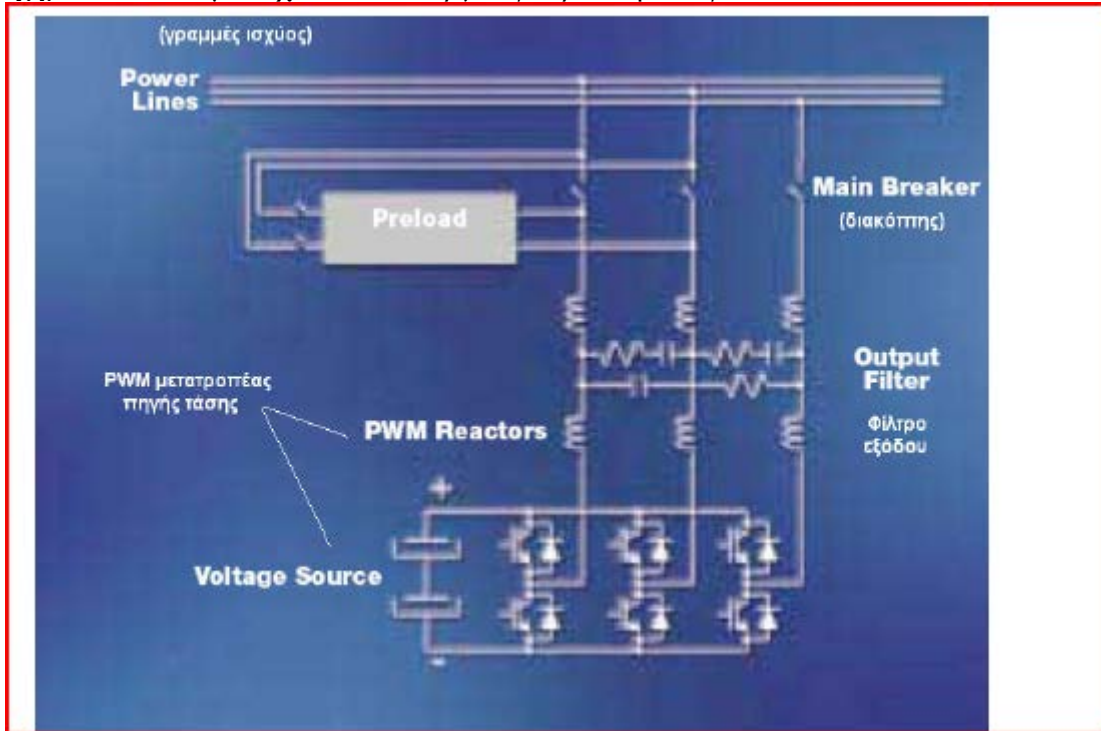
Ο μετασχηματισμός αυτός βασίζεται σε στιγμιαίες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων, γεγονός που προσφέρει πολύ καλή δυναμική απόκριση. Επιπλέον με τη μέθοδο αυτή δε χρειάζεται να είναι γνωστό το όρισμα των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος.

### **3.5 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ**

Σύμφωνα με ότι έχει ειπωθεί ως εδώ, ένα ενεργό φίλτρο είναι βασικά διάταξη παραγωγής (γεννήτρια) ρεύματος αντιστάθμισης. Τα πιο σημαντικά τμήματα του φίλτρου είναι αυτή η γεννήτρια ρεύματος καθώς και το σύστημα ελέγχου, τα οποία αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω, μέσω ενός παραδείγματος

### 3.5.1 Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

Σχήμα 5: Κύκλωμα ισχύος ενός ενεργού φίλτρου της εταιρείας ABB



Το ρεύμα αντιστάθμισης δημιουργείται σε πρώτη φάση από μια τριφασική γέφυρα με τρανζίστορ IGBT (μετατροπέας) που έχει την ικανότητα να παράγει οποιαδήποτε κυματομορφή τάσης με την PWM (Pulse Width Modulation) μεθοδολογία. Η γέφυρα των IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) χρησιμοποιεί μια DC πηγή τάσης που στην πραγματικότητα έχει τη μορφή ενός DC πυκνωτή. Η παραγόμενη τάση συνδέεται με το δίκτυο διαμέσω αντιστατών και ενός μικρού παθητικού 9iAχροο(output filter). Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνεται μια καλή προσέγγιση της επιθυμητής ιδανικής γεννήτριας ρεύματος.

Τα τελευταία χρόνια τα τρανζίστορ IGBT έχουν επικρατήσει έναντι άλλων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος όπως τα MOSFET και τα θυρίστορ GTO. Ο κύριος λόγος για την επιλογή αυτή είναι ότι τα IGBT τώρα προσφέρουν σχετικά υψηλές διακοπτικές συχνότητες (μικρότερες από τα MOSFET αλλά μεγαλύτερες από τα GTO) που επιτρέπουν την παραγωγή αρμονικών ρευμάτων υψηλής συχνότητας και σχετικά χαμηλές απώλειες λειτουργίας (πολύ μικρότερες από τα MOSFET αλλά μεγαλύτερες από τα GTO). Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και φαίνεται καθαρά ότι τα IGBT είναι

τα μο κατάλληλα για εύκολο έλεγχο και μεγάλη ισχύ.

<i>Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος για ενεργά φίλτρα</i>	GTO	MOSFET	IGBT
διακοπτική συχνότητα	μέτρια	υψηλή	υψηλή
σήμα εισόδου	ρεύμα	τάση	τάση
ισχύς	πολύ μεγάλη	μέτρια	μεγάλη
διακοπτικές απώλειες	υψηλές	χαμηλές	μέτριες
απώλειες αγωγής	χαμηλές	υψηλές	μέτριες

Οι DC πυκνωτές φορτίζονται μέσω του μετατροπέα και έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερική πηγή ισχύος. Το επίπεδο της DC τάσης πρέπει να είναι πάντα ψηλότερο από τη μέγιστη τιμή της τάσης του δικτύου έτσι ώστε να μπορεί να εισάγει ρεύματα στο δίκτυο.

Στο φίλτρο επίσης προσαρμόζεται ένα κύκλωμα πρώτης φόρτισης που σχετίζεται με τους DC πυκνωτές. Το κύκλωμα αυτό συντελεί στο να αποφεύγονται, στο ξεκίνημα που οι πυκνωτές είναι εκφορτισμένοι, υψηλά ρεύματα εισροής που μπορεί να καταστρέψουν τα ηλεκτρονικά ισχύος ή να δημιουργήσουν μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο.

Μέσω του PWM μετασχηματίζεται ο μετατροπέας πηγής τάσης σε πηγή ρεύματος.

Τέλος το φίλτρο εξόδου (output filter) απορροφά τις συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων που εισάγονται από τη διακοπτική λειτουργία του PWM.

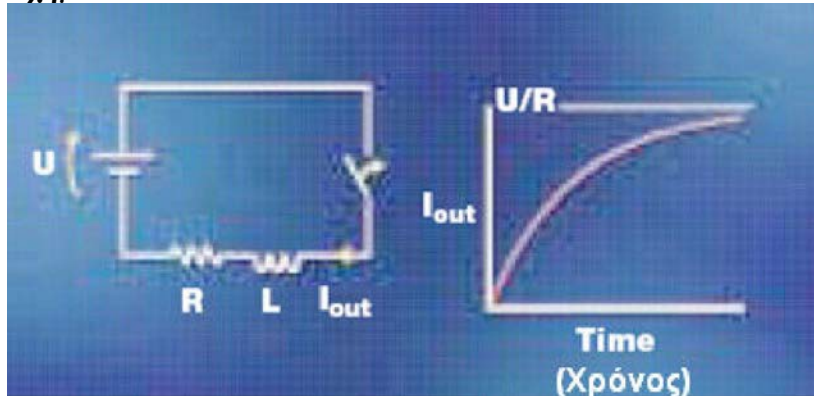
### **3.5.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ PWM**

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα ο έλεγχος του μετατροπέα βασίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης παλμού κατά nAaxos(PWM). Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής εξηγείται βήμα βήμα σ'αυτή την παράγραφο. Γίνεται αντιληπτό πως μια DC πηγή τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράξει ένα AC σήμα με μια ελεγχόμενη συχνότητα. Το θεωρούμενο φορτίο είναι ένα RL κύκλωμα.

#### **Βήμα 1**

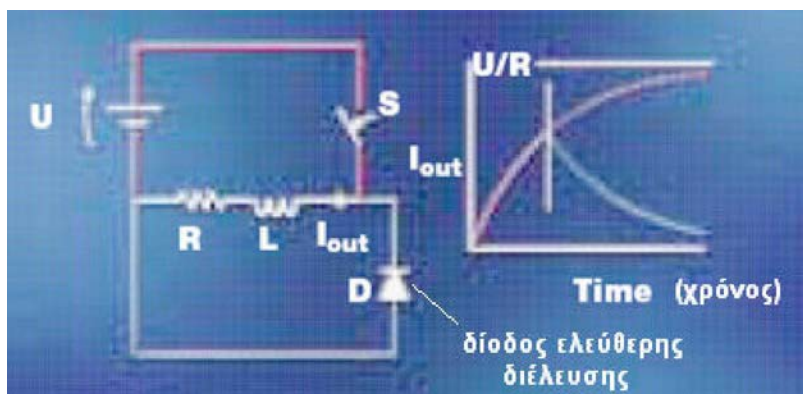
Το RL κύκλωμα είναι αρχικά συνδεδεμένο σε μια DC πηγή τάσης μέσω ενός διακόπτη όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα μεγαλώνει εκθετικά προς την DC τιμή που είναι καθορισμένη από την αντίσταση

**Σχήμα 6:** Pulse Width Modulation



Το κύκλωμα του σχήματος 7 δημιουργείται με τη σύνδεση μιας διόδου ελεύθερης διέλευσης κατά μήκος του φορτίου. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, ο αντιστάτης διασφαλίζει τη συνέχεια του ρεύματος, το οποίο αρχίζει να μειώνεται εκθετικά μέσω της διόδου.

**Σχήμα 7:** PWM και η διόδος ελεύθερης διέλευσης  $D$

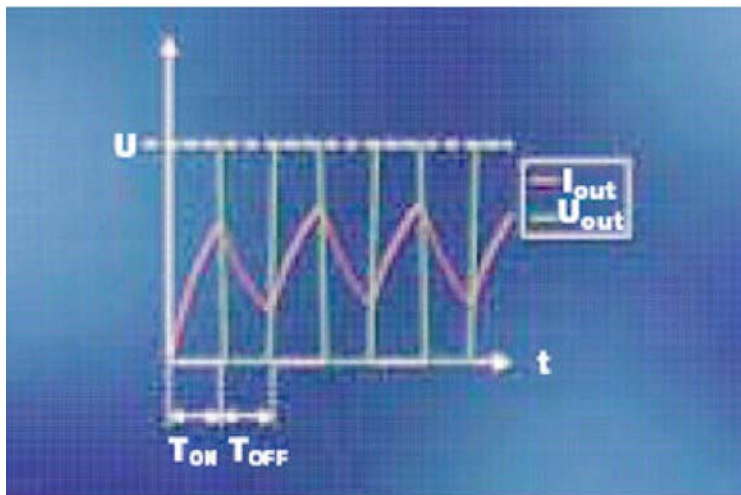


Εάν ο διακόπτης ανοίγει και κλείνει με ελεγχόμενο τρόπο, είναι δυνατόν να ελέγχεται το μέσο επίπεδο του συνεχούς ρεύματος που ρέει στο φορτίο. Σε περίπτωση που η περίοδος κατά την οποία ο διακόπτης ανοίγει και κλείνει, είναι συνεχής και αδιάκοπη, ο λόγος κατάτμησης (duty cycle ή αλλιώς  $\delta$ ), ορίζεται σαν : το χρόνο που ο διακόπτης είναι κλειστός προς την ολική περίοδο. Η μέση τάση που φαίνεται από το φορτίο υπολογίζεται έτσι εύκολα πολλαπλασιάζοντας το λόγο κατάτμησης με το επίπεδο της συνεχούς τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 8 για  $\delta=0,5$ .

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad 0 \leq \delta \leq 1$$

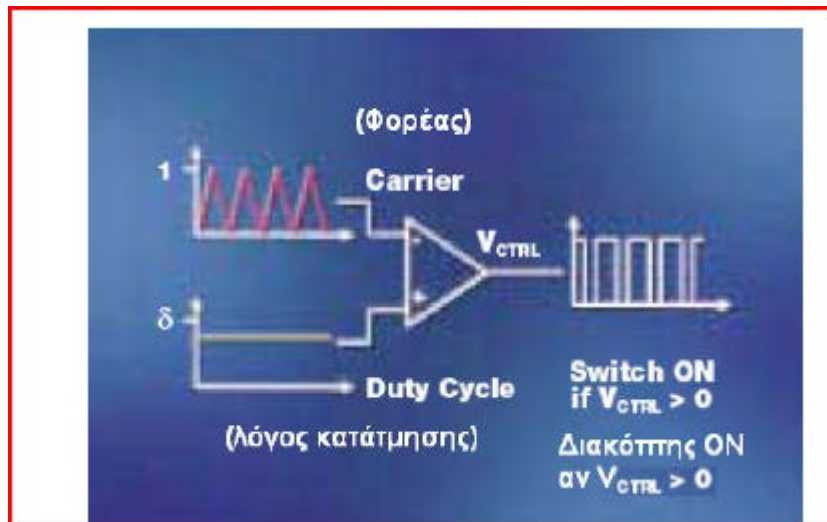
$$V_{OUTDC} = \delta V$$

*Σχήμα 8: ο λόγος κατάτμησης(duty cycle)*



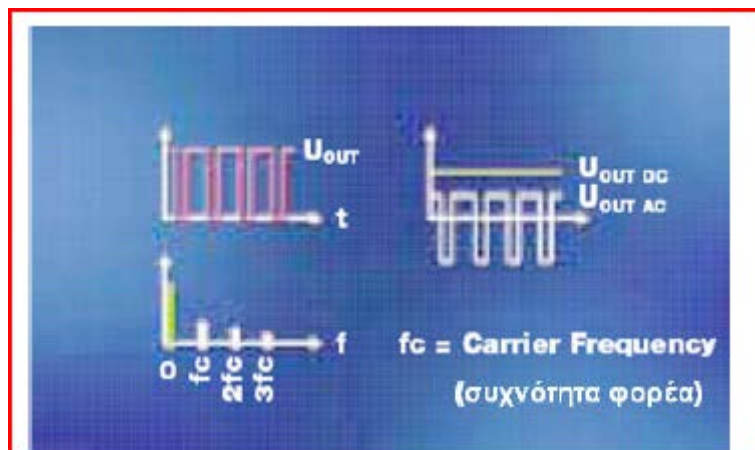
Για τον έλεγχο του διακόπτη παράγεται ένα σήμα ελέγχου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9, το σήμα ελέγχου(στη συγκεκριμένη περίπτωση μια τάση, αφού τα IGBT είναι ελεγχόμενης τάσης) πετυχαίνεται συγκρίνοντας μια τριγωνική κυματομορφή με συχνότητα  $f_c$  (το σήμα αυτό ονομάζεται φορέας ή αλλιώς carrier) με λόγο κατάτμησης  $\delta$ . Κάθε φορά που το  $\delta$  έχει μια τιμή μεγαλύτερη από το φορέα, η τάση ελέγχου είναι θετική και ο διακόπτης είναι στη θέση ON (δηλαδή ο διακόπτης είναι κλειστός). Όταν το  $\delta$  έχει τιμή μικρότερη το φορέα, η τάση ελέγχου είναι 0 και ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση OFF (διακόπτης ανοιχτός). Αν το  $\delta$  είναι 0, ο διακόπτης είναι πάντα ανοιχτός και η τάση εξόδου(τάση στο φορτίο) είναι 0. Αν το  $\delta$  έχει την τιμή 1, ο διακόπτης είναι πάντα κλειστός και η τάση εξόδου είναι V. Για τιμές του  $\delta$  μεταξύ 0 και 1, η μέση DC τάση στο φορτίο είναι  $\delta \cdot V$ .

Σχήμα 9: σήμα ελέγχου



Η ανάλυση συχνότητας της τάσης εξόδου (σχήμα 10) δείχνει ότι οι αρμονικές της συχνότητας του μετατροπέα (ή αλλιώς διακοπτική συχνότητα) προστίθενται στην DC συνιστώσα (στη μέση τιμή).

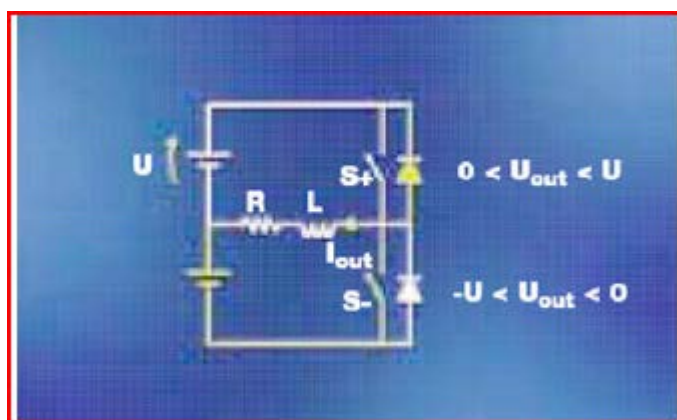
Σχήμα 10: τάση εξόδου



## Βήμα 2

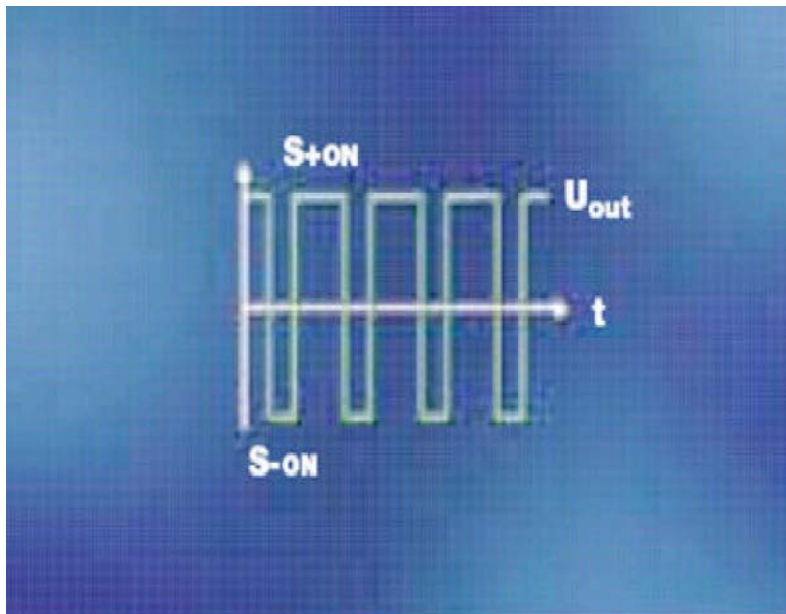
Όπως ειπώθηκε στο βήμα 1 η τάση εξόδου ελέγχεται μεταξύ 0 και  $V$ . Προσθέτοντας το τμήμα με την πράσινη γραμμή (σχήμα 11) είναι δυνατόν να ελεγχθεί η τάση μεταξύ  $-V$  και  $V$ .

*Σχήμα 11: Η βελτιωμένη διάταξη*



Η μέση τιμή της συνεχούς (DC) τάσης εξαρτάται τώρα από τις επαναλήψεις των 2 διακοπών **και** ένας νέος ορισμός του λόγου κατάτμησης ( $\delta$ ) πρέπει να δοθεί. Τώρα  $T_{s+on}$  είναι ο χρόνος που ο διακόπτης θετικής πόλωσης είναι ON **και**  $T_{s-on}$  ο χρόνος που ο διακόπτης αρνητικής πόλωσης είναι ON. Οι 2 διακόπτες δεν είναι ποτέ ανοιχτοί ή κλειστοί ταυτόχρονα. Αν ο θετικός διακόπτης είναι πάντα ON, το  $\delta$  είναι 1 **και** η μέση τάση εξόδου είναι  $V$ . Αν ο αρνητικός διακόπτης είναι πάντα ON, το  $\delta$  είναι  $-1$  **και** η μέση τάση εξόδου είναι  $-V$ . Αν οι περιοδικές επαναλήψεις των 2 διακοπών είναι πανομοιότυπες, το  $\delta$  είναι ίσο με 0 όπως **και** η μέση τιμή της τάσης εξόδου. Για οποιαδήποτε τιμή του  $\delta$  μεταξύ  $-1$  **και** 1, η μέση τάση της εξόδου είναι  $\delta \cdot V$ .

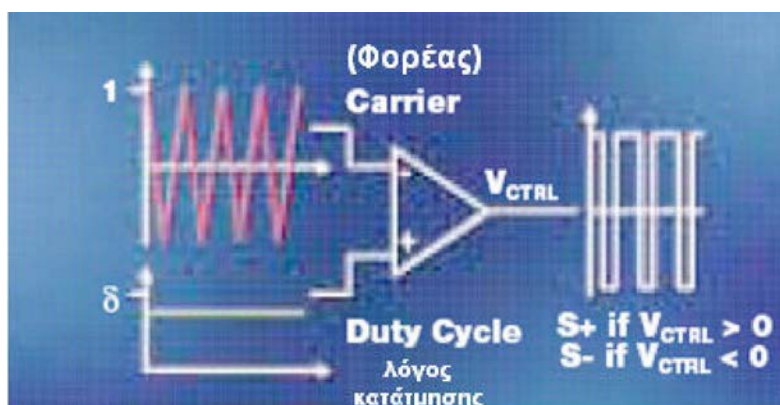
Σχήμα 12: Ο νέος λόγος κατάτμησης



Όπως φαίνεται στο σχήμα 13 το σήμα ελέγχου των διακοπών τώρα παράγεται συγκρίνοντας το λόγο κατάτμησης όπως ορίστηκε παραπάνω μ' ένα φορέα που έχει τριγωνικό σχήμα αλλά πλέον παίρνει τιμές από -1 ως 1.

Για τις τιμές του  $\delta$  που είναι μεγαλύτερες από το φορέα, το σήμα τάσης είναι θετικό και ο διακόπτης θετικής πόλωσης είναι ON. Για τιμές του  $\delta$  μικρότερες από το φορέα, το σήμα τάσης είναι αρνητικό και ο διακόπτης αρνητικής πόλωσης είναι

Σχημα 13: Το νέο σήμα ελέγχου





### Βήμα3

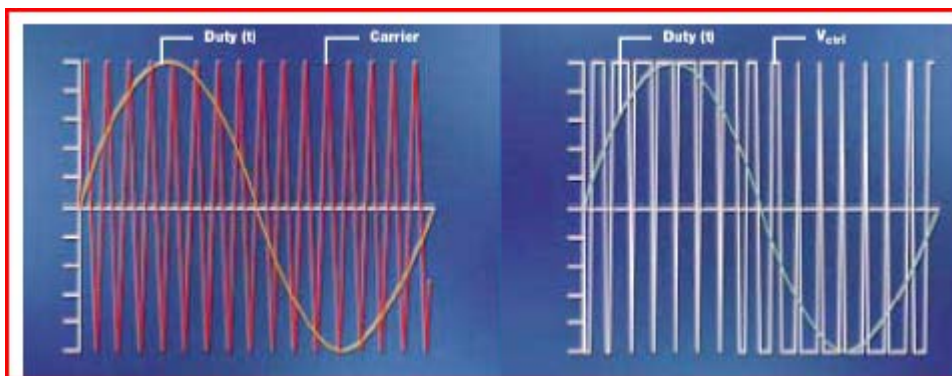
Τα βήματα 1 και 2 δείχνουν πώς είναι δυνατόν να ελεγχθεί η συνεχής τάση. Ωστόσο στην περίπτωση του ενεργού φίλτρου, μια εναλλασσόμενη τάση πρέπει να δημιουργηθεί και να ελεγχθεί από μια DC πηγή τάσης.

Αυτό κατορθώνεται με ένα μεταβλητό λόγο κατάτμησης. Κάθε λόγος κατάτμησης είναι αποδεκτός με την προϋπόθεση ότι η συχνότητα του είναι απαραίτητως κατώτερη από το μισό της συχνότητας του φορέα.

Αν  $\delta(t) = \sin(2\pi f t)$ , η τάση εξόδου είναι  $V_{out}(t) = V \sin(2\pi f t)$  και ισχύει μόνο αν  $f < f_{carrier}/2$  (η οποία ονομάζεται συχνότητα Nyquist) και για κάθε μεταβλητό λόγο κατάτμησης  $\delta(t)$  με μέγιστη συχνότητα  $< f_c/2$ .

Το σχήμα 14 δείχνει έναν ημιτονικής μορφής λόγο κατάτμησης, τον τριγωνικό μεταφορέα και την προκύπτουσα τάση ελέγχου. Το σύστημα καλείται διαμόρφωση παλμού κατά πλάτος αφού η εναλλασσόμενη τάση εξόδου, που έχει το ίδιο σχήμα με το λόγο κατάτμησης, παράγεται από τον έλεγχο του πλάτους των παλμών τάσης

*Σχήμα 14: Ημιτονικής μορφής λόγος κατάτμησης*



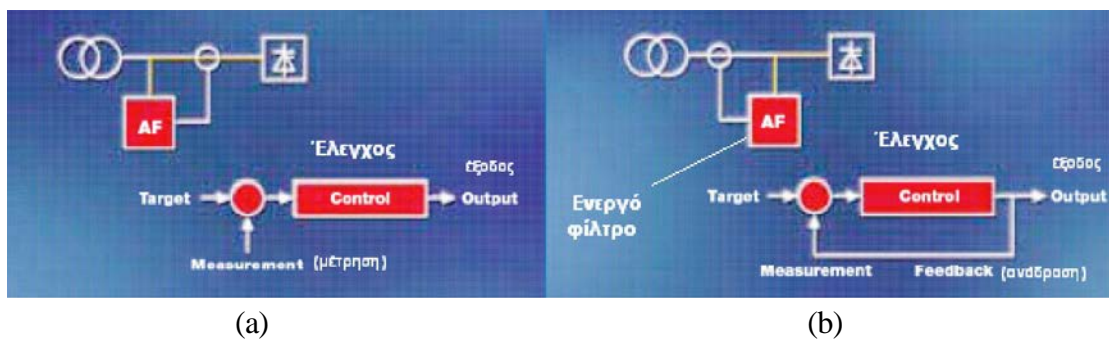
### 3.5.3 ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για τον έλεγχο του ενεργού φίλτρου υπάρχουν 2 επιλογές. Η πρώτη είναι έλεγχος ρεύματος μέσω συστήματος ανοιχτού βρόχου και η δεύτερη μέσω κλειστού βρόχου.

Το σχήμα 15(a) δείχνει το σύστημα ανοιχτού βρόχου. Τα αρμονικά ρεύματα υπολογίζονται στο κομμάτι που βρίσκεται μεταξύ φορτίου και ενεργού φίλτρου. Το ενεργό φίλτρο υπολογίζει κατά προσέγγιση το απαιτούμενο ρεύμα αντιστάθμισης και το εισάγει στο δίκτυο.

Το σύστημα κλειστού βρόχου φαίνεται στο σχήμα 15(b). Στην τοπολογία αυτή υπολογίζεται συνεχώς το ρεύμα που προκύπτει στο δίκτυο και το ενεργό φίλτρο λειτουργεί εισάγοντας ρεύμα αντιστάθμισης για να ελαχιστοποιήσει το τελικό ρεύμα. Μ' αυτή τη διάταξη το φίλτρο ελέγχει άμεσα την επίδραση του στο φιλτράρισμα.

**Σχήμα 15:** (α)έλεγχος ανοιχτού βρόχου, (β)έλεγχος κλειστού βρόχου



Ο έλεγχος μέσω συστήματος ανοιχτού βρόχου απαιτεί πολύ υψηλής ποιότητας αισθητήρες ρεύματος ενώ ο κίνδυνος αναποτελεσματικότητας και ανακρίβειας είναι αυξημένος. Αντίθετα ο έλεγχος μέσω συστήματος κλειστού βρόχου, πέρα από το γεγονός ότι είναι πιο ακριβής, επιτρέπει απ' ευθείας και άμεσο έλεγχο του βαθμού του φιλτράρισματος. Επιπλέον διασφαλίζει ότι τα υπολογιστικά λάθη δεν θα έχουν σαν αποτέλεσμα σοβαρότερες διαταραχές.

### Έλεγχος βασισμένος σε **Digital Signal Processors (DSP)**

Για πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ενός ενεργού φίλτρου χρειάζονται ένα ψηφιακό σύστημα μέτρησης και ένα σύστημα ελέγχου που να είναι αρκετά γρήγορο για να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο. Πρέπει να υπάρχει ικανότητα ανίχνευσης των ξεχωριστών αρμονικών και ελέγχου του ρεύματος αντιστάθμισης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης και μάλιστα με πλήρη έλεγχο σε κάθε χρονική στιγμή. Για να είναι εφικτό αυτό, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση προχωρημένων ψηφιακών επεξεργαστών σήματος DSP.

Ανάμεσα στα φυσικά σι\|ιατα που χρειάζονται από το φίλτρο, τα ρεύματα των 3 γραμμών πρέπει να υπολογιστούν. Αυτά τα αναλογικά σήματα πρέπει πρώτα να αποκτηθούν, να εξισωθούν και να ελαχιστοποιηθούν οι διαταραχές τους πριν από την ψηφιακοποίηση. Γρήγοροι και μεγάλης ακρίβειας A/D μετατροπείς (από αναλογικό σε ψηφιακό) χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια ψηφιακή αναπαράσταση των αναλογικών σημάτων. Τα ψηφιακά πλέον ο\|ματα στέλνονται στους DSP που ελέγχουν όλες τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο και κατασκευάζουν τις αναφορές του PWM για τον μετατροπέα. Ένας άλλος επεξεργαστής, ένας μικροελεγκτής, χειρίζεται όλες τις ψηφιακές εισόδους/εξόδους. Ο μικροελεγκτής, που είναι πιο εξειδικευμένος στον έλεγχο παρά στους υπολογισμούς, διασφαλίζει το κλείσιμο των ρελαί και των αυτομάτων. Σε κάθε σύστημα στο οποίο υπάρχει ενεργό φίλτρο απαιτείται ένας έλεγχος ενώ ο μικροελεγκτής μπορεί να χειριστεί παραπάνω από ένα πλαίσιο ισχύος ταυτόχρονα.

### Σήμα ελέγχου με μορφή αιχμών

Ο παροχέας ηλεκτρικής ενέργειας ορισμένες φορές υπερθέτει μια τάση στην τάση τροφοδοσίας. Η τάση αυτή μπορεί να υπερτεθεί ουσιαστικά σε οποιαδήποτε συχνότητα και το πλάτος της μπορεί να είναι έως και 10% πάνω από την ενεργό τομή της τάσης τροφοδοσίας. Το ενεργό φίλτρο σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αφήνει τις τάσεις αυτές ανεπηρέ

## 3.5.4 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ

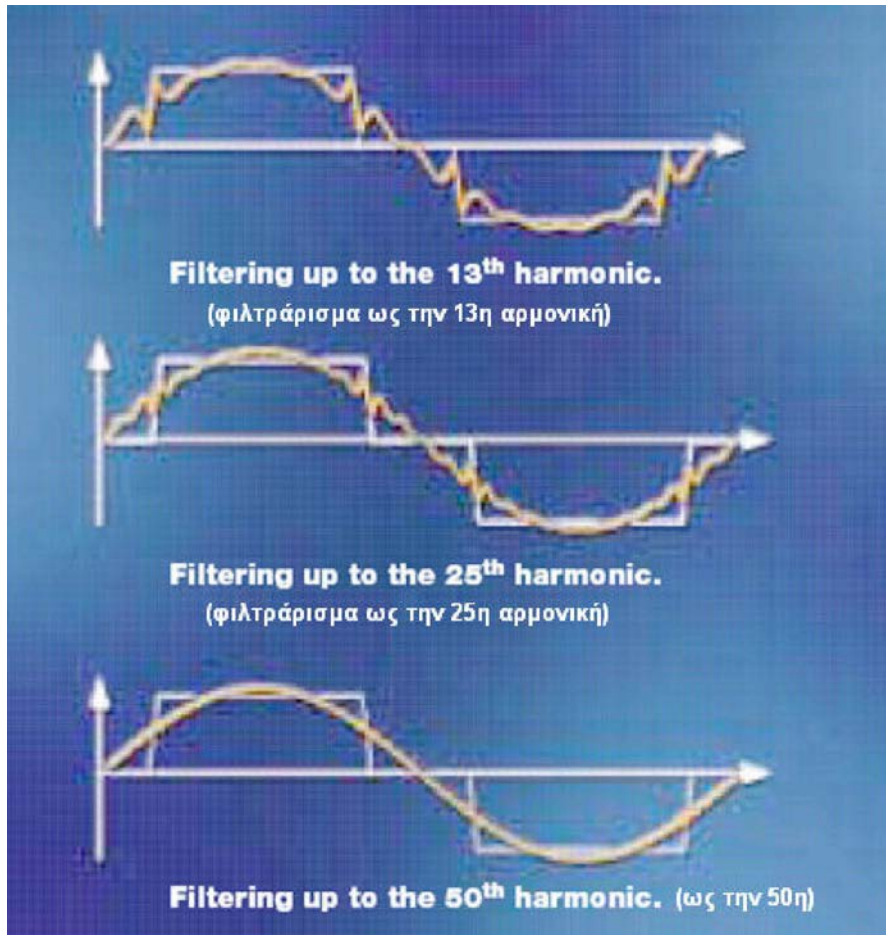
### α) *Φιλτράρισμα*

Η κύρια απαίτηση από ένα ενεργό φίλτρο που τοποθετείται σε μια βιομηχανική εγκατάσταση είναι να μετριάξει τις αρμονικές που παράγονται από μη γραμμικά φορτία της εγκατάστασης.

Το ιδανικό ενεργό φίλτρο θα έπρεπε να επιτρέπει στο χρήστη να διαλέγει ελεύθερα ποιές αρμονικές συνιστώσες να φιλτράρει **και** θα έπρεπε να προσφέρει μεγάλο βαθμό προσαρμοστικότητας στο φιλτράρισμα.

Είναι επίσης άξιο αναφοράς ότι αν **και** τα περισσότερα πρότυπα επιβάλουν περιορισμούς για τις αρμονικές μόνο μέχρι την 25η αρμονική, ο δείκτης ολικής παραμόρφωσης στο σημείο κοινής ζεύξης (PCC) υπολογίζεται συχνά μέχρι την 40η ή **και** την 50η αρμονική. Ο συνολικός αριθμός των αρμονικών που φιλτράρονται καθορίζει άμεσα την ποιότητα του ρεύματος που προκύπτει τελικά. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 16 που δείχνει τις κυματομορφές που πάρθηκαν μετά από φιλτράρισμα μέχρι την 13η, την 25η **και** την 50η αρμονική αντίστοιχα.

**Σχήμα 16:** Κυματομορφές που προέκυψαν μετά την εξάλειψη αρμονικών (διαφορετικής τάξης)



Επιπλέον το σχήμα 16 επισημαίνει την ανάγκη για ενεργά φίλτρα που μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές αρμονικές συχνότητες, αφού είναι φανερό ότι φιλτράρισμα μέχρι την 50η αρμονική έχει σαν αποτέλεσμα πού πιο ομαλή κυματομορφή.

Το φίλτρο μπορεί να φιλτράρει ταυτόχρονα 20 ανεξάρτητες αρμονικές έως την 50η για δίκτυα που η θεμελιώδης συχνότητα είναι 50Hz. Ο αριθμός των αρμονικών που θα φιλτραριστούν καθώς και οι συχνότητες τους είναι απόλυτα προγραμματιζόμενα από το χρήστη.

Το σχήμα 17 δείχνει τυπικές αρμονικές που παράγονται από συνήθη εξαπαλμικά (ημιαγωγικά) φορτία. Είναι 16 αρμονικές έως και 50<sup>η</sup> τάξης. Το φίλτρο είναι ικανό να φιλτράρει όλες αυτές τις αρμονικές ταυτόχρονα. Το τελικό επίπεδο της ποιότητας της ισχύος είναι πολύ υψηλό.

Σχήμα 17: Τυπικές αρμονικές που παράγονται από εξαπολμικά φορτία



Εκτός από την επιλογή των αρμονικών, ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα να καθορίζει επίπεδο φιλτραρίσματος για κάθε μια από τις επιλεγμένες αρμονικές. Το φίλτρο θα φιλτράρει τις επιλεγμένες αρμονικές μέχρι το ρεύμα να μειωθεί σε επίπεδα επιτρεπόμενα. Αυτά τα επίπεδα καθορίζονται από το χρήστη και μπορεί να είναι διαφορετικά για κάθε μια από τις αρμονικές. Αυτή η λειτουργία, που φαίνεται στο σχήμα 18, είναι ιδιαίτερος χρήσιμη όταν ο στόχος είναι να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ενός προτύπου και έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη χρήση της διαθέσιμης ισχύος αντιστάθμισης. Όπως έχει ειπωθεί προηγουμένως, αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα απέναντι στα παθητικά φίλτρα, στα οποία το επίπεδο φιλτραρίσματος δεν μπορεί ούτε να προκαθοριστεί, ούτε να ελεγχθεί. Επίσης επιτρέπεται η εγκατάσταση ενεργών φίλτρων στα δίκτυα, που συνδυάζονται με ήδη υπάρχοντα παθητικά φίλτρα.

Όλες αυτές οι ιδιότητες οδηγούν πολύ κοντά στο ιδανικό φίλτρο. Η επιλογή των προς φιλτράρισμα αρμονικών είναι ελεύθερη, ο βαθμός του φιλτραρίσματος προσαρμόζεται ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη και τέλος όλες οι τυπικές αρμονικές που παράγονται από τριφασικά, μη γραμμικά φορτία μπορούν να φιλτραριστούν ταυτόχρονα.

## Ενεργό ρεύμα

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ενεργού φίλτρου εκφράζονται από την μέγιστη τιμή του ενεργού ρεύματος (RMS).

Η ενεργός τιμή του ρεύματος ενός συγκεκριμένου φάσματος αρμονικών λαμβάνεται από τον γεωμετρικό συνδυασμό των πλατών, όλων των ξεχωριστών συνιστωσών.

Για παράδειγμα, το ακόλουθο φάσμα:

H5 : 150A

H7 : 66A

H11 : 47A

H13 : 31A

δίνει ένα συνολικό ενεργό ρεύμα ίσο με :

$$V(150)^2 + (66)^2 + (47)^2 + (31)^2 = 173Arms$$

## Μέγιστη τιμή του ρεύματος και υψηλότερες συχνότητες

Για ένα δοσμένο ενεργό ρεύμα, η μέγιστη τιμή του, μειώνεται με την εισαγόμενη συχνότητα. Πράγματι, όταν η συχνότητα αυξάνεται, σύμφωνα με το νόμο του Ohm, το εισαγόμενο ρεύμα μειώνεται.

Ωστόσο, αυτό το φυσικό φαινόμενο δεν αποτελεί αυστηρό περιορισμό αφού τα τυπικά *φάσματα* αρμονικών μη γραμμικών φορτίων έχουν το ίδιο σχήμα με το πρότυπο εισαγωγής ρεύματος του ενεργού φίλτρου.

## Η 3<sup>η</sup> αρμονική

Το ενεργό φίλτρο μπορεί να φιλτράρει αρμονικές έως και 50<sup>η</sup> τάξης, στις οποίες φυσικά περιλαμβάνεται και η 3η αρμονική. Όμως το ενεργό φίλτρο δεν έχει σύνδεση ουδέτερου και δεν φιλτράρει μηδενικής ακολουθίας αρμονικές. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι πρόκειται για την περίπτωση φορτίων με σύνδεση φάση-ουδέτερος: πολλαπλάσιες του 3 αρμονικές που παράγονται μεταξύ των φάσεων αφαιρούνται από το ενεργό φίλτρο

## β) Άεργος ισχύς

Πέρα από το φιλτράρισμα, τα ενεργά φίλτρα καθιστούν δυνατή την αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Συγκρινόμενη με την κλασική αντιστάθμιση(με τη χρήση πυκνωτών) , η άεργος αντιστάθμιση του φίλτρου είναι συνεχής, γρήγορη και

ομαλή(χωρίς μεταβατικά φαινόμενα). Η αντιστάθμιση μπορεί να είναι είτε χωρητική είτε επαγωγική, ανάλογα με τον τύπο του φορτίου.

Δύο τύποι αντιστάθμισης είναι διαθέσιμοι η αυτόματη, όπου πρέπει να οριστεί ο επιθυμητός συντελεστής ισχύος και αυτή που είναι βασισμένη σε μια προκαθορισμένη ποσότητα kVar.

Ο χρήστης είναι ελεύθερος να επιλέξει και να προγραμματίσει την αντιστάθμιση άεργου ισχύος ανεξάρτητα από το αρμονικό φιλτράρισμα. Ο μόνος περιορισμός έγκειται στα χαρακτηριστικά μεγέθη του φίλτρου.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η άεργος ισχύς καταναλώνει την ικανότητα του ρεύματος του φίλτρου και δεν είναι η κύρια προτεραιότητα του.

### γ) Προτεραιότητες/ρυθμίσεις φίλτρου

Το φίλτρο βασικά εκτελεί 3 διαφορετικές εργασίες.

- 1) φιλτράρει τις επιλεγμένες, από το χρήστη, αρμονικές μέχρι τα πλάτη τους να φτάσουν κοντά στο 0 (μέγιστο φιλτράρισμα).
- 2) φιλτράρει τις αρμονικές μέχρι τα πλάτη τους να φτάσουν ένα προκαθορισμένο από το χρήστη επίπεδο.
- 3) κάνει αντιστάθμιση της άεργου ισχύς

Σχήμα 18: φιλτράρισμα έως ένα συγκεκριμένο επίπεδο



Στον πίνακα 2 βρίσκονται οι 3 τρόποι λειτουργίας του ενεργού φίλτρου, που έχουν καθοριστεί έτσι ώστε να προσφέρεται στο χρήστη όσο το δυνατόν

μεγαλύτερη ευελιξία. Κάθε τρόπος αναθέτει σε διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας τις ενέργειες που αναφέρθηκαν παραπάνω

ΠΙΝΑΚΑΣ 2			
Τρόποι λειτουργίας του ενεργού φίλτρου	Υψηλότερη ----- > Χαμηλότερη		
	1 <sup>η</sup> προτεραιότητα	2 <sup>η</sup> προτεραιότητα	3 <sup>η</sup> προτεραιότητα
Μέθοδος 1	Φιλτράρισμα ως ένα σημείο	Μέγιστο δυνατό φιλτράρισμα	Αντιστάθμιση άεργου ισχύος
Μέθοδος 2	Φιλτράρισμα ως ένα σημείο	Αντιστάθμιση άεργου ισχύος	Μέγιστο δυνατό φιλτράρισμα
Μέθοδος 3	Φιλτράρισμα ως ένα σημείο	Αντιστάθμιση άεργου ισχύος	

Είναι εμφανές ότι το φιλτράρισμα ως ένα προκαθορισμένο σημείο έχει πάντα την πρώτη προτεραιότητα, οποιοσδήποτε και αν είναι ο τρόπος λειτουργίας. Για να διευκρινιστεί η έννοια της προτεραιότητας και της στρατηγικής φιλτραρίσματος, θεωρείται αρχικά η ιδανική κατάσταση: το φίλτρο αποδίδει ιδανικό φιλτράρισμα και αντιστάθμιση άεργου ισχύος.

Αν το φίλτρο φτάσει ένα από τα όρια του θα απελευθερώσει αυτόματα την ενέργεια που έχει το μικρότερο επίπεδο προτεραιότητας: άεργος ισχύς για τον 1ο τρόπο και μέγιστο φιλτράρισμα για τον 2ο τρόπο.

Ο στόχος του φίλτρου για τον 1ο τρόπο είναι πλέον να αποδώσει όσο το δυνατόν μέγιστο φιλτράρισμα. Αν το φίλτρο πιάσει εκ νέου ένα από τα όρια του, θα επικεντρώσει τις πηγές του στην πρώτη προτεραιότητα μόνο, δηλαδή στο φιλτράρισμα ως ένα μόνο σημείο.

Τέλος, αν και πάλι το επίπεδο των αρμονικών είναι τόσο ψηλό για το φίλτρο σε σημείο που να μην μπορεί να πετύχει το απαιτούμενο φιλτράρισμα, θα φιλτράρει μόνο μέχρι εκεί που είναι το όριο του (για να αποτραπεί έτσι μια πιθανή υπερφόρτωση). Όταν το ρεύμα φορτίου περιέχει λιγότερες αρμονικές, το φίλτρο αυτόματα υιοθετεί τα πρότυπα εργασίας του, σύμφωνα με τον προγραμματισμένο τρόπο λειτουργίας.





*Σχήμα 19: ενεργό φίλτρο που κυκλοφορεί στο εμπόριο.*

### **3.5.5 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**

Υπάρχουν 2 είδη προστασίας: η αργή και η γρήγορη. Ο ρόλος της αργής προστασίας είναι να αλλάζει τον τρόπο που το φίλτρο λειτουργεί σύμφωνα με τις παραμέτρους, όπως αναφέρθηκαν νωρίτερα. Αυτό διασφαλίζει ότι το φίλτρο δεν υπερφορτίζεται ποτέ και ότι πάντα θα έχει θετική επίδραση.

Η γρήγορη ενεργοποιείται μόνο σε περίπτωση αφύσικων συνθηκών και διασφαλίζει την ακεραιότητα του φίλτρου. Προστατεύει από υπερθέρμανση και υπέρρευμα των τρανζίστορ IGBT, υπερρεύματα του φίλτρου καθώς και από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα.

## **ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ**

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ , ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΜΑΝΙΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ, Θ. ΚΑΡΑΚΑΤΣΑΝΗ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Π.Θ ΚΑΙ Ν. ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ .

RICHARD C. DORF, ROBERT H. BISHOP, MODERN CONTROL SYSTEMS, PRENTICE- HALL, 2001

N. MOHAN, T. UNDELEND, W. ROBBINS, POWER ELECTRONICS CONVERTERS, APPLICATIONS AND DESIGN, WILEY, 2003

COMPENSATION CHARACTERISTICS OF THE COMBINED SYSTEM OF SHUNT PASSIVE AND SERIES ACTIVE FILTERS” IEEE TRANS. IND. APP. VOL.29, NO1, PP 144-152, JAN/FEB 1993

ΑΘ. ΣΑΦΑΚΑ , ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, ΘΥΡΙΣΤΟΣΡ , ΜΤΑΤΡΟΠΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 2005

H. AKAGI “LARGE STATIC CONVERTERS FOR INDUSTRY AND UTILITY APPLICATIONS” PROC IEEE, VOL 89, NO 6, PP 976-983, JUN 2001

ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ, Α. ΚΑΛΕΤΣΑΝΟΣ “ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ 2001

ΠΕΡΑΤΖΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, “ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΠΟΛ-ΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΑΣΗΣ”, ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ, “ΑΝΩΤΕΡΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ 1997.

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<http://www.dei.gr>

<http://portal.tee.gr>

<http://www.technicalreview.gr>

<http://www.protasis.net.gr>

<http://www.alterco.gr>

<http://www.seman.gr>

<http://powersupplies.frost.com>

<http://www.pqeltd.com>

<http://www.pqmanagement.co.uk>

<http://www.activeharmonicfilters.com>

<http://www.electrotekltd.com>

<http://www.reinhausen.com>

<http://www.mesta.com>

<http://www.boddingtonpowercontrols.com>

<http://www.mestek.com.au>

<http://www.abb.com>

<http://www.schneider.com>