

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## 1. Αρμονικές (Harmonics)

Τα συστήματα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικά συστήματα. Η παραγόμενη AC τάση στους εναλλακτήρες είναι τριφασική ημιτονοειδής εναλλασσόμενη τάση. Με την ίδια μορφή, αλλά με διαφορετικά επίπεδα τάσεων, μεταφέρεται μέχρι τα σημεία των καταναλωτών της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ηλεκτρικά φορτία κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

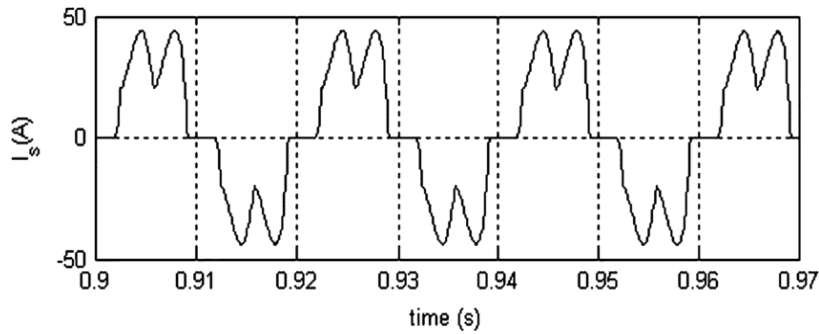
- Γραμμικά ηλεκτρικά φορτία
- Μη γραμμικά ηλεκτρικά φορτία

Τα γραμμικά ηλεκτρικά φορτία, όπως είναι οι ωμικές αντιστάσεις, τα πηνία, οι πυκνωτές, οι ηλεκτροκινητήρες AC κτλ, απορροφούν ρεύματα ημιτονοειδώς εναλλασσόμενα, όπως η μορφή της ηλεκτρικής τάσης.

Η πλειοψηφία όμως των ηλεκτρικών φορτίων, στις μέρες μας, λειτουργούν απορροφώντας από το δίκτυο ρεύματα τα οποία δεν είναι ημιτονοειδή, αλλά αποκλίνουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό από αυτή την κυματομορφή. Τέτοια φορτία είναι οι ρυθμιστές στροφών AC κινητήρων ή VFDs (Variable Frequency Drives) (σχ. 1), τα παλμοτροφοδοτικά ή SMPS (Switched Mode Power Supplies), οι ανορθωτές (Rectifiers), οι ηλεκτροσυγκολλήσεις inverter, τα τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ή UPS (Uninterruptible Power Supplies), οι λαμπτήρες φθορισμού, οι ρυθμιστές φωτεινότητας λαμπτήρων (Dimmers), τα κλιματιστικά inverter, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι εκτυπωτές και πλήθος ακόμα ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών συσκευών. Γενικά όλοι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC είναι μη γραμμικά ηλεκτρικά φορτία και τα ρεύματα λειτουργίας τους περιέχουν αρμονικές συνιστώσες.

Η εμφάνιση αρμονικών συνιστωσών ρεύματος κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών φορτίων μπορεί να προκαλέσει σοβαρές δυσλειτουργίες, τόσο στα ηλεκτρικά φορτία, όσο και στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Καλούμαστε συνεπώς να προσδιορίσουμε την ποσότητα των αρμονικών συνιστωσών, με κατάλληλες μετρήσεις, και στη συνέχεια να τις περιορίσουμε με κατάλληλες διατάξεις.

Σε πλήθος εφαρμογών είναι επιθυμητό να μετριάσουμε την ποσότητα των αρμονικών των κυματομορφών και αυτό γίνεται συχνά με χρήση φίλτρων ή με την αύξηση της πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.



**Σχήμα 1** Μη ημιτονοειδές AC ρεύμα 50 Hz (φορτίο VFD).

Οι αρμονικές συνιστώσες προσδιορίζονται μετά από ανάλυση κατά Fourier της κυματομορφής, και είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας, που καλείται θεμελιώδης συχνότητα της κυματομορφής. Αν οι κυματομορφές είναι περιοδικές συναρτήσεις DC, τότε η ανάλυση θα μας δώσει και συνιστώσα σταθερή. Η γενική μορφή της ανάλυσης μιας κυματομορφής σε άθροισμα συνιστωσών κατά Fourier είναι:

$$x = A_0 + A_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \text{ όπου:}$$

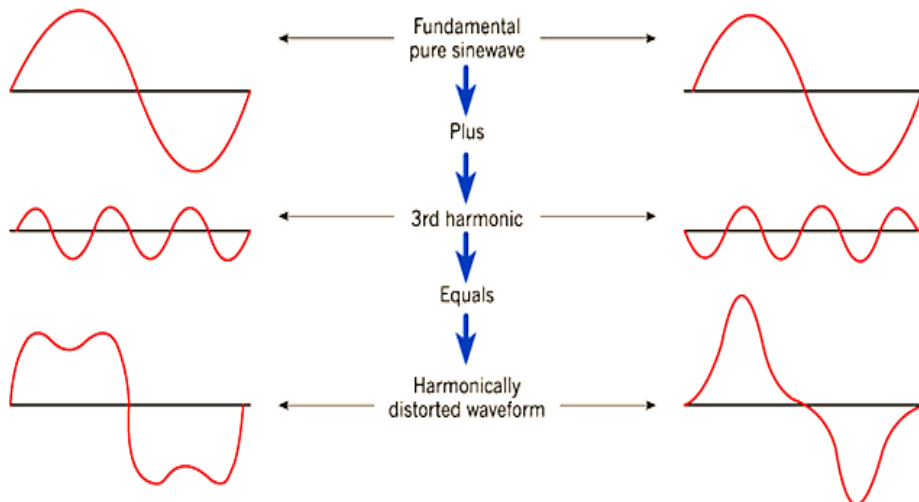
$A_0$  : DC συνιστώσα

$n$  : ακέραιος  $>0$ , τάξη αρμονικής

$n=1$  : θεμελιώδης συνιστώσα

$A_n$ : πλάτος αρμονικής

$\varphi_n$ : διαφορά φάσης μεταξύ θεμελιώδους και αρμονικής συνιστώσας

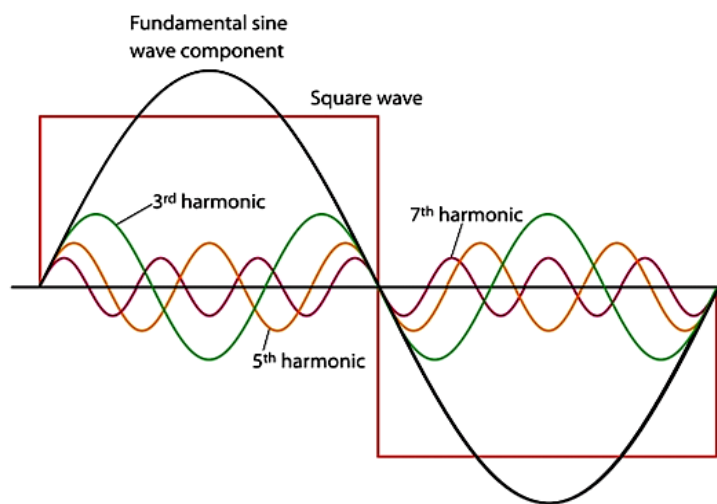


**Σχήμα 2** Ανάλυση Fourier εναλλασσόμενων μη ημιτονοειδών συναρτήσεων.

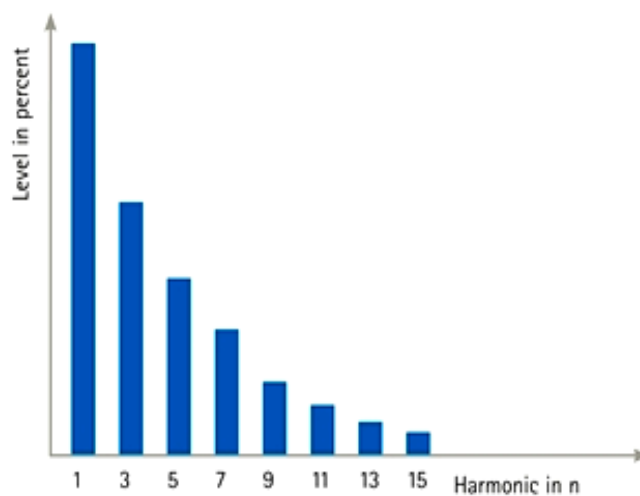
Για τα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας η θεμελιώδης συχνότητα είναι 50 Hz (60 Hz). Οι αρμονικές συνιστώσες της ανάλυσης Fourier διακρίνονται σε:

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

## 2. Αναπαράσταση αρμονικών



Σχήμα 3 Πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 4 Πεδίο της συχνότητας.

### 3. Μαθηματικοί προσδιορισμοί

#### THD τάσης (Total Harmonic Distortion)

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \times 100\%$$

#### THD ρεύματος

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \times 100\%$$

#### TDD ρεύματος (Total Demand Distortion)

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_L} \times 100\%$$

Όπου  $I_L$  το ονομαστικό ρεύμα φορτίου (θεμελιώδης συνιστώσα)

Ο συντελεστής παραμόρφωσης του ρεύματος THD είναι ένας στιγμιαίος δείκτης που είναι δυνατόν να μεταβληθεί από στιγμή σε στιγμή αν αλλάξει το φορτίο, αφού αναφέρεται στη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος. Ο  $THD_I$  προκύπτει μόνο μετά από μετρήσεις. Ο TDD προκύπτει μετά από υπολογισμό, αφού χρειάζονται μετρήσεις μόνο των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος, με το ονομαστικό ρεύμα φορτίου να είναι σταθερή ποσότητα. Ο TDD και ο  $THD_I$  επηρεάζονται από το ποσοστό φόρτισης του κινητήριου συστήματος (βλέπε παρακάτω πίνακα), αλλά και από το ποσοστό συμμετοχής των γραμμικών φορτίων στο συνολικό φορτίο. Όσο το ποσοστό επί τοις % των γραμμικών φορτίων, σε σχέση με το σύνολο των φορτίων μεγαλώνει, τόσο πέφτει ο TDD. Επίσης, για να προσδιοριστούν οι επί πλέον θερμικές αρμονικές απώλειες στα δίκτυα, λόγω αρμονικών, τότε χρησιμοποιείται ο δείκτης ρεύματος TDD και μάλιστα οι μετρήσεις του έχουν μία μεγάλη μέση διάρκεια της τάξης των 15 έως 30 λεπτών. Ο  $THD_I$  και ο TDD ταυτίζονται μόνο σε συνθήκες πλήρους φορτίου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις του ρεύματος εισόδου σε ρυθμιστή στροφών μιας αντλίας 150 HP. Όσο το φορτίο ελαττώνεται, ο δείκτης  $THD_I$  μεγαλώνει, ενώ το ενεργό ρεύμα κάθε αρμονικής μικραίνει. Επίσης, ο δείκτης TDD μικραίνει, όσο το φορτίο ελαττώνεται. Για ονομαστικό φορτίο οι τιμές

του THD<sub>i</sub> και του TDD ταυτίζονται. Εφ' όσον, τόσο η παραμόρφωση της τάσης των δικτύων, όσο και η αρμονική υπερθέρμανση των δικτύων (όπως θα εξηγηθεί σε επόμενες παραγράφους) είναι αποτελέσματα των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος, τότε η δυσμενέστερη περίπτωση είναι το πλήρες φορτίο. Επίσης, καθώς το φορτίο πέφτει ο TDD σε σχέση με τον THD<sub>i</sub> πέφτει ευθέως ανάλογα. Π.χ., όταν ο THD<sub>i</sub> είναι 96% για 50% φόρτιση, τότε ο TDD είναι το 1/2 του THD<sub>i</sub> δηλαδή 48%.

ΦΟΡΤΙΟ	ΡΕΥΜΑ (A)		ΡΕΥΜΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ (A)				THD <sub>i</sub>	TDD
	RMS	50 Hz	5 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>	11 <sup>η</sup>	13 <sup>η</sup>		
100%	233	182	118	80	12	12	79%	79%
75%	187	142	96	70	15	7	86%	65%
50%	134	96	69	54	17	5	96%	48%
25%	67	43	33	29	14	9	120%	30%

### PF (Power Factor) (Συντελεστής Ισχύος)

$S=kVA$  (φαινόμενη ισχύς)

$S_1=kVA$  (φαινόμενη ισχύς θεμελιώδους)

$Q=kVAr$  (άεργη ισχύς θεμελιώδους)

$D=kVAr_H$  (άεργη ισχύς αρμονικών)

$P=kW$  (πραγματική ισχύς)

$\theta_{TPF}$  = (True PF) (Συνολικός ΣΙ)

$$S(kVA) = V_{RMS} I_{RMS} = (P^2 + Q^2 + D^2)^{1/2}$$

**True PF:**

$$\cos\theta_{TPF} = \cos\theta_{dispPF} \cdot \cos\theta_{distPF}$$

**Displacement PF:**

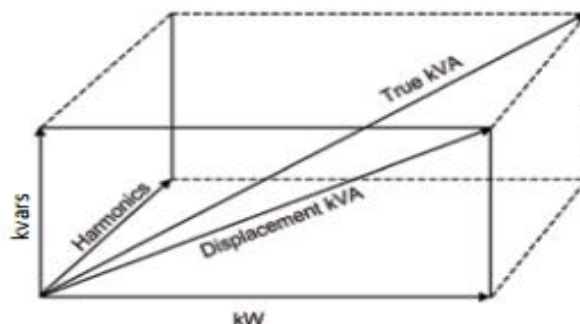
$$\cos\theta_{dispPF} = \frac{P}{S_1}$$

(θεμελιώδης)

**Distortion PF :**

$$\cos\theta_{distPF} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_V^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} \quad (\text{αρμονικές})$$

(THD<sub>V</sub> είναι συνήθως < 10% με όριο κανονισμών το 5%)



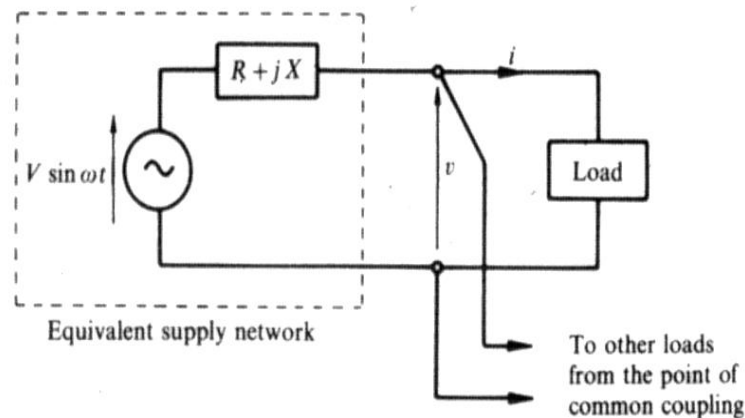
**Σχήμα 5** Τα διάφορα είδη της ηλεκτρικής ισχύος.

## 4. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η διακοπτική λειτουργία των ποικίλων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος (μη γραμμικά φορτία) έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση από τα AC συστήματα παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας (AC δίκτυα) μη ημιτονοειδών ρευμάτων. Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στα φορτία μόνο με τη θεμελιώδη συχνότητα λειτουργίας των δικτύων 50 ή 60 Hz. Τα μη γραμμικά φορτία μετατρέπουν ένα μέρος της απορροφούμενης ισχύος σε ισχύ μεγαλύτερων συχνοτήτων, την οποία επιστρέφουν πίσω στο δίκτυο, λειτουργώντας σαν γεννήτριες αρμονικών. Η αρμονική ισχύς είναι άεργη ισχύς και ονομάζεται ισχύς παραμόρφωσης (Distortion Power).

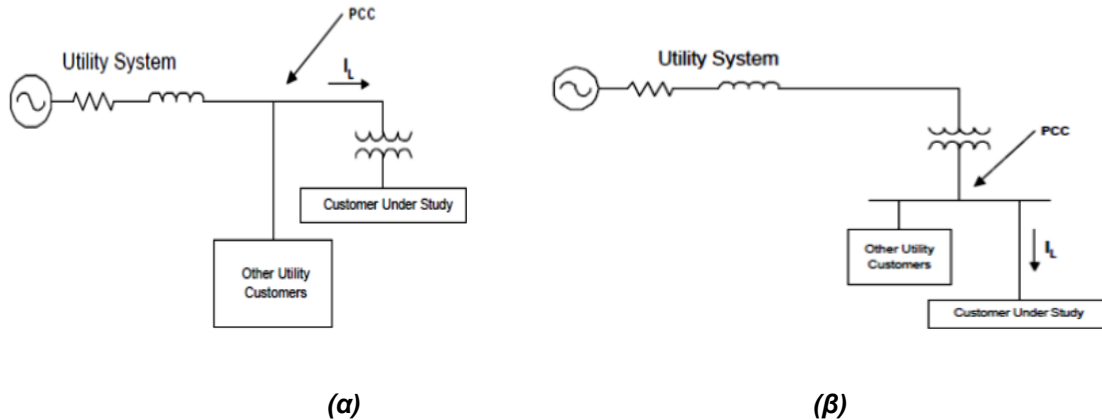
Τα μη γραμμικά φορτία απορροφώντας μη ημιτονοειδή ρεύματα προκαλούν πολλά και σημαντικά προβλήματα στις εταιρείες που διαχειρίζονται την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

- Παραμόρφωση της εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης, την οποία παράγουν οι εναλλακτήρες. Αναφορικά με το σχήμα 6, το δίκτυο τροφοδοσίας της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξομοιωθεί με το ισοδύναμο κατά Thevenin. Ένα φορτίο τραβώντας ένα ρεύμα  $i$  θα προκαλέσει μία πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση της πηγής  $R+jX$ , με αποτέλεσμα η τάση  $v$  να διαφέρει από την τάση τροφοδοσίας  $V\sin(\omega t)$ .



**Σχήμα 6** Τροφοδοσία δικτύου ηλεκτρικών φορτίων.

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης δικτύου θα διαφέρει για κάθε αρμονική συχνότητα, συνεπώς η τάση  $v$  θα περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης (Voltage Distortion). Αν άλλα ηλεκτρικά φορτία μέσα στην ίδια ηλεκτρική εγκατάσταση ή άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις τροφοδοτηθούν από αυτό το σημείο κοινής σύνδεσης PCC (Point Common Coupling) θα δεχθούν μία μη ημιτονοειδή τάση.



**Σχήμα 7** Σημεία PCC. (α) Πλευρά υψηλής τάσης Μ/Σ (βιομηχανίες). (β) Πλευρά χαμηλής τάσης Μ/Σ (εμπορικά κτήρια).

- Σημαντικά αυξημένες απώλειες θερμότητας στους μετασχηματιστές. Για παράδειγμα, μετασχηματιστές που τροφοδοτούν εγκαταστάσεις με συσκευές γραφείου (υπολογιστές, εκτυπωτές κτλ) με 80% THD<sub>i</sub> εμφανίζουν περίπου 250% αυξημένες απώλειες από να τροφοδοτούσαν γραμμικά φορτία με το ίδιο ενεργό ρεύμα. Οι απώλειες θερμότητας ενισχύονται από την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου (skin effect), ιδιαίτερα αν η συχνότητα των αρμονικών ξεπερνά τα 300 Hz.
- Η υπερθέρμανση των μετασχηματιστών μειώνει το χρόνο ζωής τους λόγω γρηγορότερης γήρανσης των μονώσεων.
- Αυξημένες απώλειες θερμότητας στις γραμμές μεταφοράς, λόγω του φαινομένου Joule, αλλά και του επιδερμικού φαινομένου.
- Αυξημένες απώλειες θερμότητας στους εναλλακτήρες των σταθμών παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σημαντική υπερφόρτιση του ουδέτερου σε τριφασικό σύστημα 4 αγωγών. Δεδομένου ότι ασφαίζονται μόνο οι 3 γραμμές των φάσεων, αυτό μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ανάφλεξη του ουδέτερου αγωγού. Αναφορικά με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων μπορεί να γίνουν μερικές γενικές παρατηρήσεις. Οι άρτιες αρμονικές είναι απύσες στο τριφασικό δίκτυο. Συνεπώς τη ρύπανση (pollution) των δικτύων προξενούν οι περιττές αρμονικές, οπότε ασχολούμαστε με τον περιορισμό αυτών των αρμονικών. Οι τριπλές αρμονικές τάξης 3m, όπου m=1,3,5..., δηλαδή οι περιττές και πολλαπλάσια του 3, είναι όλες σε φάση μεταξύ τους, όπως προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 i_{a(3m)} &= I \sin 3m\omega t \\
 i_{b(3m)} &= I \sin [3m(\omega t - 2\pi/3)] = I \sin 3m\omega t \\
 i_{c(3m)} &= I \sin [3m(\omega t + 2\pi/3)] = I \sin 3m\omega t
 \end{aligned}$$

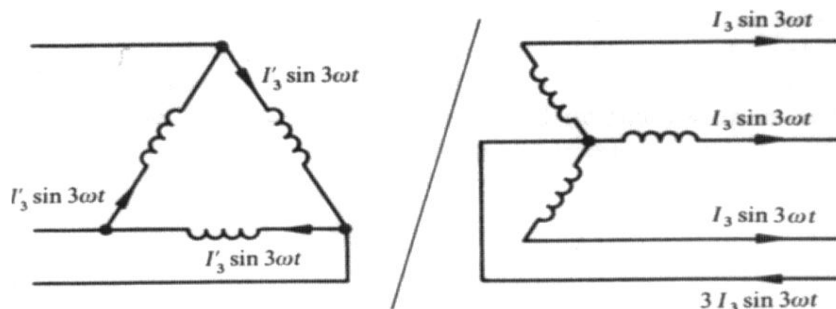
συνεπώς:  $i_{a(3m)} = i_{b(3m)} = i_{c(3m)}$

Όπως είναι προφανές από το σχ. 8, αν  $i_{a(3m)} = i_{b(3m)} = i_{c(3m)}$  τότε αυτό το ρεύμα τριπλής αρμονικής μπορεί να κυκλοφορήσει μόνο σε σύστημα 4 αγωγών,

δηλαδή αστέρας με ουδέτερο. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του ουδέτερου αγωγού είναι τριπλάσιο από τα ρεύματα σε κάθε γραμμή. Οι μετασχηματιστές διανομής είναι συνήθως Δ/Υ τεσσάρων αγωγών για να τροφοδοτούν εκτός των τριφασικών και μονοφασικά φορτία. Τα ρεύματα της τρίτης αρμονικής, που φαίνονται στα τυλίγματα τριγώνου μέσης τάσης του μετασχηματιστή του σχ. 8 κυκλοφορούν κυκλικά μόνο στα τυλίγματα χωρίς να εμφανίζονται στις γραμμές. Αν ο ουδέτερος δεν συνδεθεί στο φορτίο, αυτό σημαίνει ότι στη τριφασική γραμμή δεν εμφανίζονται συνιστώσες των τριπλών αρμονικών.

Τα δίκτυα χαμηλής τάσης τεσσάρων αγωγών (3Φ+N), εν τούτοις, φορτίζονται ασύμμετρα λόγω των μονοφασικών φορτίων, συνεπώς τα μη γραμμικά φορτία, που γεννούν τριπλές αρμονικές πρέπει να τύχουν ιδιαίτερης προσοχής.

Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του ουδέτερου αγωγού είναι πολύ συχνό σε μεγάλα κτίρια γραφείων, νοσοκομείων, κτλ, που λειτουργούν 1Φ μη γραμμικά φορτία.



**Σχήμα 8** Ροή του ρεύματος τρίτης αρμονικής σε ένα τριφασικό σύστημα.

- Η διείδυση αρμονικών στην τροφοδοσία από το φορτίο θα εξαρτάται από το βαθμό αντίδρασης των διαφόρων εξαρτημάτων του συστήματος σε κάθε αρμονική συχνότητα. Για παράδειγμα οι πυκνωτές, που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, θα απορροφήσουν αρμονικά ρεύματα, λόγω της χωρητικής τους αντίδρασης, η οποία ελαττώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Σε αρκετές περιπτώσεις, αν δεν προστατευτούν οι πυκνωτές μπορεί να καταστραφούν από υπερφόρτιση.
- Συνθήκες δημιουργίας χαμηλού συντελεστή ισχύος, λόγω της άεργης ισχύος των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος.
- Άλλα προβλήματα που εμφανίζονται από τη ύπαρξη των αρμονικών είναι η δημιουργία φαινομένων συντονισμού σε συγκεκριμένες συχνότητες αρμονικών. Τέτοια προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν στο συγχρονισμό των παλμών για την έναυση των θυρίστορ στους ελεγχόμενους ανορθωτές (φαινόμενο Zitter), καθώς και στο φωτισμό με την αυξομείωση της φωτεινής έντασης (φαινόμενο Flicker).
- Σφάλματα στα όργανα μετρήσεων.
- Στιγμιαίες υπερτάσεις.



## 5. Επιπτώσεις στα φορτία

Κάθε DC φορτίο που τροφοδοτείται με τάση από μία ανορθωτική διάταξη παρουσιάζει αρμονικό περιεχόμενο στην τάση λειτουργίας. Αν η ανορθωτική διάταξη είναι ελεγχόμενη, τότε το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου είναι ακόμα μεγαλύτερο.

Η παρουσία αρμονικών συνιστωσών στην κυματομορφή της τάσης θα δημιουργήσει αναπόφευκτα αύξηση των αρμονικών ρευμάτων της ίδιας συχνότητας στο ρεύμα φορτίου. Επί πλέον, το ρεύμα φορτίου από τη φύση του περιέχει αρμονικές συνιστώσες, επειδή στην πράξη δεν υπάρχει άπειρη αυτεπαγωγή στα πηνία εξομάλυνσης του ρεύματος. Τα ηλεκτρικά φορτία που απαιτούν AC τάση τροφοδοτούμενα από ένα αντιστροφέα τάσης DC/AC δημιουργούν από τη φύση τους αρμονικές συνιστώσες, λόγω της διακοπτικής λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.

- Οι επιπτώσεις στα φορτία είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες. Οι θερμικές απώλειες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα των πηνίων και τις απώλειες σιδήρου στους πυρήνες των πηνίων. Επί πλέον, οι απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες είναι ανάλογες με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων τάσεων. Συνεπώς, οι αρμονικές συνιστώσες στα ρεύματα των φορτίων προξενούν αύξηση στις θερμικές απώλειες των τυλιγμάτων, αλλά και ακόμα μεγαλύτερη αύξηση των θερμικών απωλειών στους πυρήνες, αφού αυτές συνδέονται και με τη συχνότητα των ρευμάτων. Στην πραγματικότητα και οι απώλειες χαλκού, για συχνότητες μεγαλύτερες των 300 Hz, εξαρτώνται από τη συχνότητα. Είναι το επιδερμικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα, όπως ακριβώς και στους μετασχηματιστές. Οι αυξημένες θερμικές απώλειες οδηγούν σε μείωση της απόδοσης και της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.
- Η υποβάθμιση της ονομαστικής ισχύος κατά τη λειτουργία των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων οφείλεται, πέραν των αυξημένων αρμονικών θερμικών απωλειών, και στη μείωση της ονομαστικής ροπής, εξ αιτίας των αρμονικών συνιστωσών. Η επίδραση των αρμονικών καθορίζεται από τη διαδοχή που παρουσιάζουν σε σχέση με τη διαδοχή της θεμελιώδους συνιστώσας. Μία περιττή αρμονική τάξης  $(3n-1)$ , όπου  $n=2,4,6\dots$  ( $5^n, 11^n, 17^n\dots$ ) παρουσιάζει αντίστροφη (αρνητική) διαδοχή από αυτή της θεμελιώδους συνιστώσας (negative sequence), με αποτέλεσμα τα ρεύματα αυτής της αρμονικής συνιστώσας να προκαλούν στον άξονα του κινητήρα αντίθετη ροπή από τη φορά περιστροφής. Η διαδοχή προκύπτει από την αλλαγή στο πρόσημο της διαφοράς φάσης μιας αρμονικής από αυτό της θεμελιώδους. Για παράδειγμα, αν  $n=2$  προκύπτει η  $5^{\text{η}}$  αρμονική που μπορεί να εκφραστεί όπως παρακάτω:

$$i_{a5} = I \sin 5\omega t$$

$$i_{b5} = I \sin[5(\omega t - 2\pi/3)] = I \sin(5\omega t + 2\pi/3)$$

$$i_{c5} = I \sin[5(\omega t + 2\pi/3)] = I \sin(5\omega t - 2\pi/3)$$

Σε αντίθεση, οι αρμονικές τάξης  $(3n+1)$ , όπου  $n=2,4,6\dots$  ( $7^{\text{η}}$ ,  $13^{\text{η}}$ ,  $19^{\text{η}}$  ...) παρουσιάζουν την ίδια διαδοχή με τη θεμελιώδη συνιστώσα (positive sequence), συνεπώς δεν δημιουργούν προβλήματα αρμονικών ροπών στην κίνηση του άξονα του κινητήρα.

Τέλος, οι τριπλές αρμονικές ( $3^{\text{η}}$ ,  $9^{\text{η}}$ ,  $15^{\text{η}}$  ...), επειδή βρίσκονται όλες σε φάση μεταξύ τους (zero sequence), δεν παράγουν ροπή, αλλά μόνο θερμότητα, λόγω των απωλειών χαλκού και των μαγνητικών απωλειών.

Γνωρίζοντας ότι τα πλάτη των αρμονικών μειώνονται όσο αυξάνει η τάξη τους, η συνολική ροπή λόγω αρμονικών συνιστωσών ρεύματος είναι αντίθετη από τη ροπή που δημιουργεί η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της ονομαστικής ροπής του κινητήρα και την εμφάνιση δονήσεων κατά την λειτουργία της μηχανής.

- Ο ακουστικός θόρυβος λειτουργίας των μηχανών. Ο θόρυβος αυτός οφείλεται σε μικροδονήσεις των υλικών των πυρήνων των πηνίων. Στα κινητήρια συστήματα AC ο ακουστικός θόρυβος των μηχανών είναι πολύ πιο έντονος από εκείνο στις DC μηχανές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της υψίσυχνης διακοπτικής λειτουργίας (switching frequency) των IGBTs του PWM αντιστροφέα. Δεδομένου ότι το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων στον άνθρωπο κυμαίνεται γενικά από 20Hz μέχρι 20kHz, ο βασικός τρόπος για τον περιορισμό του ακουστικού θορύβου είναι η αύξηση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας του αντιστροφέα. Για παράδειγμα η αύξηση της διακοπτικής συχνότητας από 3 kHz σε 12 kHz, έχει σαν αποτέλεσμα το σύνολο σχεδόν των υψίσυχνων αρμονικών ακουστικού θορύβου να εμφανίζεται πάνω από το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων, συμβάλλοντας έτσι στο δραστικό περιορισμό του ακουστικού θορύβου των επαγωγικών μηχανών.

- Η μείωση του χρόνου ζωής των ρουλεμάν λόγω υπερθέρμανσης των λιπαντικών τους. Οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος που επάγεται στο δρομέα των επαγωγικών μηχανών διέρχονται από τα ρουλεμάν στη διαδρομή για τη γείωση του στάτη και τα υπερθερμαίνουν. Είναι κοινή πρακτική η χρήση μονωμένων ρουλεμάν στη κατασκευή των επαγωγικών μηχανών, που προορίζονται να λειτουργήσουν με ρυθμιστές στροφών.

## 6. Μέθοδοι περιορισμού των αρμονικών

Οι μέθοδοι για τον περιορισμό των αρμονικών είναι πάρα πολλές και κάθε μία κατέχει τη δική της θέση στη λύση του προβλήματος. Πάντως κάθε λύση πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό του αποτελέσματος με το κόστος επίλυσης του προβλήματος. Επί πλέον, όλες οι λύσεις αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνοντας τα ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος, με αποτέλεσμα την επιπρόσθετη αύξηση των θερμικών απωλειών, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε περισσότερα συστήματα ψύξης. Τέλος, μια ακόμα παράμετρος της λύσης, που πολλές φορές καθίσταται κρίσιμη, είναι ο αναγκαίος χώρος για την εγκατάσταση της διάταξης για τον περιορισμό των αρμονικών.

Ο όρος περιορισμός αρμονικών (Harmonic Mitigation) αναφέρεται στο περιορισμό των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος των μη γραμμικών φορτίων. Αν οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος κινούνται σε αποδεκτά όρια, τότε και οι αρμονικές συνιστώσες της τάσης στο σημείο PCC (σχ. 7 & 8) είναι γενικά αποδεκτές.

Το ποσοστό παραμόρφωσης της ημιτονοειδούς τάσης, δηλαδή το ποσοστό THD<sub>V</sub>, εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των μετασχηματιστών. Η εγκατεστημένη ισχύς των μετασχηματιστών παίζει πολύ καθοριστικό ρόλο στα όρια των αρμονικών. Πιο συγκεκριμένα, η ισχύς ενός μετασχηματιστή εξετάζεται σε σχέση με την ισχύ του φορτίου που τροφοδοτεί. Η σχέση αυτή εκφράζεται από τον λόγο  $I_{sc}/I_L$  ( $I_{Short\ Circuit}/I_{Load}$ ). Όσο ο λόγος μεγαλώνει, για συγκεκριμένο ρεύμα φορτίου, αυτό σημαίνει μεγαλύτερος μετασχηματιστής. Δηλαδή, όσο μεγαλώνει ο μετασχηματιστής, τόσο μειώνονται οι αρμονικές συνιστώσες τάσης, που εξαρτώνται από την πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζουν ο Μ/Σ και οι γραμμές. Μεγάλος μετασχηματιστής σημαίνει μικρή πτώση τάσης λόγω αρμονικών ρευμάτων, άρα μικρή παραμόρφωση τάσης, δηλαδή καλός (μικρός) συντελεστής THD<sub>V</sub>. Ένας μεγάλος μετασχηματιστής έχει μικρότερη ωμική αντίσταση τυλιγμάτων γεγονός που οδηγεί και σε περιορισμό των επιπρόσθετων θερμικών αρμονικών απωλειών, οπότε στην περίπτωση αυτή αυξάνονται και τα όρια αποδοχής των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος, που εκφράζονται από το συντελεστή παραμόρφωσης των φορτίων TDD (βλέπε σχετικά στο τελευταίο κεφάλαιο << Κανονισμοί>>).

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ένα παράδειγμα που δείχνει τη σχέση της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης συγκεκριμένου ηλεκτρικού φορτίου (VFD 11kVA) σε συνάρτηση με την ενίσχυση της τροφοδοσίας. Το μέγιστο αποδεκτό όριο αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης THD<sub>V</sub> είναι 5 %.

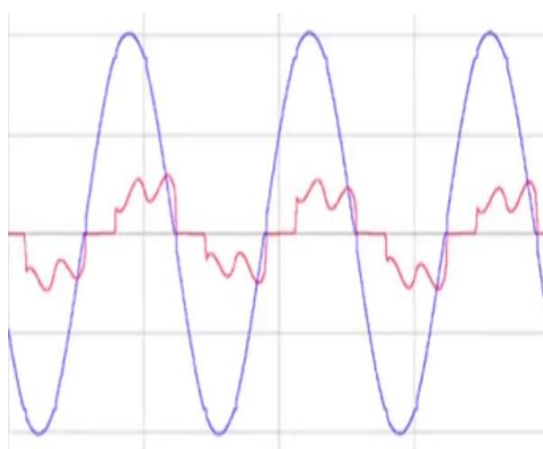
#### Φορτίο VFD 11kVA

THD <sub>V</sub> ΦΟΡΤΙΟΥ	kVA ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ
28%	16
16%	30
8,3%	50
4,2%	100

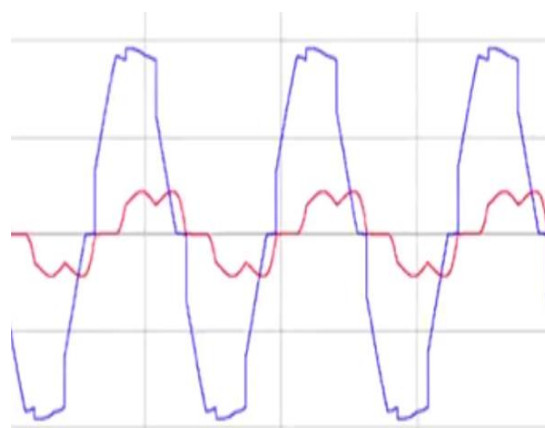
Στα σχήματα 9 και 10 φαίνεται καθαρά η επίδραση του μεγέθους του μετασχηματιστή στην αλλοίωση του ημιτόνου της τάσης, όταν τα φορτία απορροφούν μη ημιτονοειδή ρεύματα. Το φορτίο στα παρακάτω σχήματα είναι το ίδιο, ένα κινητήριο σύστημα VFD 75 HP. Ο Μ/Σ των 1500 kVA τροφοδοτεί το

φορτίο με τάση που παρουσιάζει ελάχιστη παραμόρφωση ( $THD_V = 0,9\%$ ), ενώ η τάση του Μ/Σ 75 kVA παρουσιάζει σημαντική παραμόρφωση ( $THD_V = 9,3\%$ ).

Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των μετασχηματιστών μπορεί να αντιμετωπίζει τα προβλήματα των αρμονικών για τα δίκτυα (μικρότερη παραμόρφωση τάσης, μικρότερη αρμονική υπερθέρμανση), το κόστος της όμως είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος περιορισμού των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος στην πηγή τους, δηλαδή στα μη γραμμικά φορτία. Επί πλέον δεν λύνει τα προβλήματα που παρουσιάζονται στη λειτουργία των γραμμικών φορτίων, που συνυπάρχουν με μη γραμμικά φορτία μέσα στην ίδια ηλεκτρική εγκατάσταση.



**Σχήμα 9** Τάση & ρεύμα με Μ/Σ 1500 kVA.



**Σχήμα 10** Τάση & ρεύμα με Μ/Σ 75 kVA

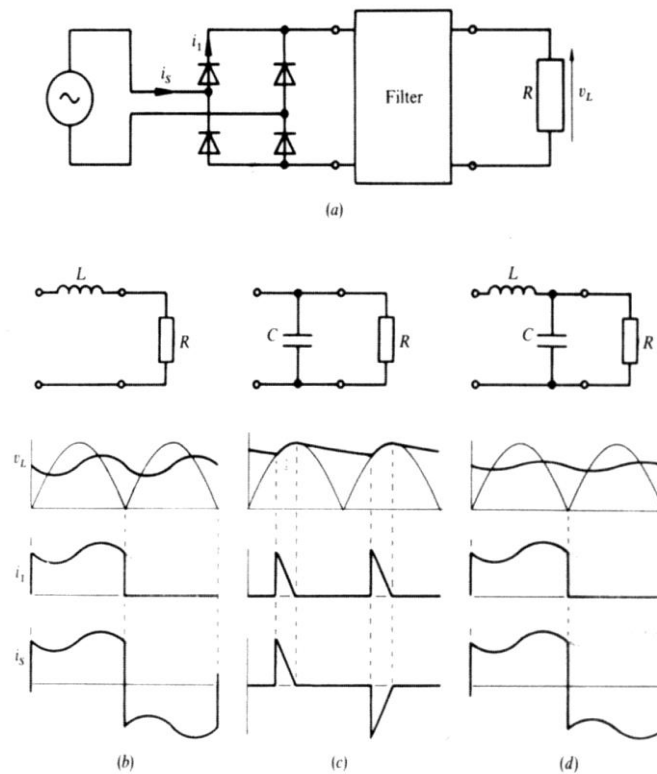
## 6.1 Φίλτρα

Ο σκοπός των φίλτρων είναι ο περιορισμός του αρμονικού περιεχόμενου μιας κυματομορφής καθώς αυτή περνά από την είσοδο στην έξοδο. Με άλλα λόγια τα φίλτρα εξομαλύνουν της κυματομορφές τάσης, ρεύματος με στόχο την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία των ηλεκτρικών φορτίων, την αποτροπή διάχυσης στο δίκτυο ανεπιθύμητων αρμονικών συνιστωσών και τέλος τον περιορισμό των παρεμβολών στις ραδιοσυχνότητες, RFI (Radio-Frequency Interference). Ως απόλυτο φιλτράρισμα για τις κυματομορφές συνεχούς (DC) νοείται η σταθερή συνάρτηση, ενώ για τις εναλλασσόμενες (AC) νοείται η ημιτονοειδής συνάρτηση.

### 6.1.1 Εξομάλυνση εξόδου ανορθωτών (DC Passive Filters)

Τα βασικά φίλτρα για την εξομάλυνση της τάσης φορτίου μιας μονοφασικής ανορθωτικής γέφυρας, δηλαδή μιας κυματομορφής 2-παλμών, φαίνονται στο

σχήμα 11. Το πηνίο σαν φίλτρο εξομαλύνει το ρεύμα, σχήμα 11(b), συνεπώς το φορτίο απορροφά ρεύμα με μικρή κυμάτωση. Θεωρητικά ένα άπειρο πηνίο (άπειρη αυτεπαγωγή) οδηγεί σε απόλυτα σταθερό ρεύμα με μηδενική κυμάτωση. Ο πυκνωτής σαν φίλτρο εξομαλύνει την τάση, σχήμα 11(c), φορτιζόμενος μέχρι την κορυφή της τάσης και στην συνέχεια εκφορτιζόμενος στην αντίσταση με ρυθμό που εξαρτάται από τη σταθερά RC. Το DC ρεύμα είναι ένα παλμικό ρεύμα πολύ μικρής διάρκειας και τόσο αυτό όσο και το AC ρεύμα παρουσιάζουν πολύ μεγάλο βαθμό παραμόρφωσης. Ο συνδυασμός πηνίου και πυκνωτή, σχήμα 11(d), λειτουργεί συνδυαστικά δημιουργώντας την καλύτερη εξομάλυνση, που έχει σαν αποτέλεσμα το σχεδόν τετραγωνικό AC ρεύμα εισόδου.



**Σχήμα 11** Φιλτράρισμα εξόδου ανορθωτή 2-παλμών. (α) Κύκλωμα μονοφασικής γέφυρας. (b) Πηνίο φίλτρο. (c) Πυκνωτής φίλτρο. (d) Πηνίο-πυκνωτής φίλτρο.

Η ελάττωση της κυμάτωσης (ripple) εξόδου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την επιλογή των παραπάνω φίλτρων, είτε με επιλογή διαφορετικής ανορθωτικής διάταξης, όπως είναι η ανόρθωση 3-παλμών ή τριφασική ημιανόρθωση, 6-παλμών ή τριφασική γέφυρα, 12-παλμών ή 6φασική ανόρθωση, 18-παλμών ή 9φασική, 24-παλμών και 36-παλμών. Όσο αυξάνεται το πλήθος των παλμών, που παρουσιάζει η τάση εξόδου του ανορθωτή, τόσο μεγαλύτερη εξομάλυνση (low ripple) έχει η DC τάση και τόσο καλύτερο ημίτονο (low THD) έχει το AC ρεύμα. Η τελική επιλογή βασίζεται πάντα σε κριτήρια συνδυαστικού κόστους φίλτρου-ανορθωτή. Το αυξημένο κόστος μεγάλων φίλτρων συσχετίζεται με το μειωμένο κόστος ανορθωτή λίγων-παλμών ή το αντίστροφο.

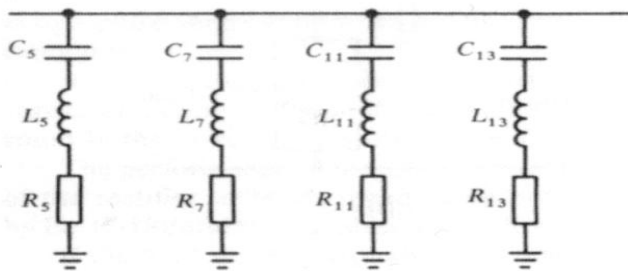
Ο συντελεστής που εκφράζει την κυμάτωση στην συνεχή τάση του φορτίου καλείται:

$$\text{Ripple Factor} = \frac{(V_{RMS}^2 - V_{AV}^2)^{1/2}}{V_{AV}}$$

Όπου  $V_{RMS}$  είναι η συνολική ενεργός τιμή της κυματομορφής, που προκύπτει μετά την ανάλυση σε συνιστώσες τάσης (DC+AC).

### 6.1.2 Παθητικά φίλτρα γραμμής AC (AC Passive Filters)

Για να περιορίσουμε την διείσδυση αρμονικών στο δίκτυο AC από ένα φορτίο ανορθωτή ή από μία συνολική ηλεκτρική εγκατάσταση, φίλτρα αρμονικών μπορεί να συνδεθούν μεταξύ κάθε γραμμής και του ουδετέρου, όπως φαίνονται στο σχήμα 12. Σε μια τριφασική γραμμή τα φίλτρα είναι τριφασικά και συνδέονται κατά αστέρα ή τρίγωνο. Αυτά είναι παθητικά φίλτρα RLC υπολογισμένα κατάλληλα έτσι ώστε να απορροφούν ανά κλάδο το ρεύμα συγκεκριμένης αρμονικής και να το οδηγούν στη γη, αποτρέποντας την κυκλοφορία του σε όλο το δίκτυο.



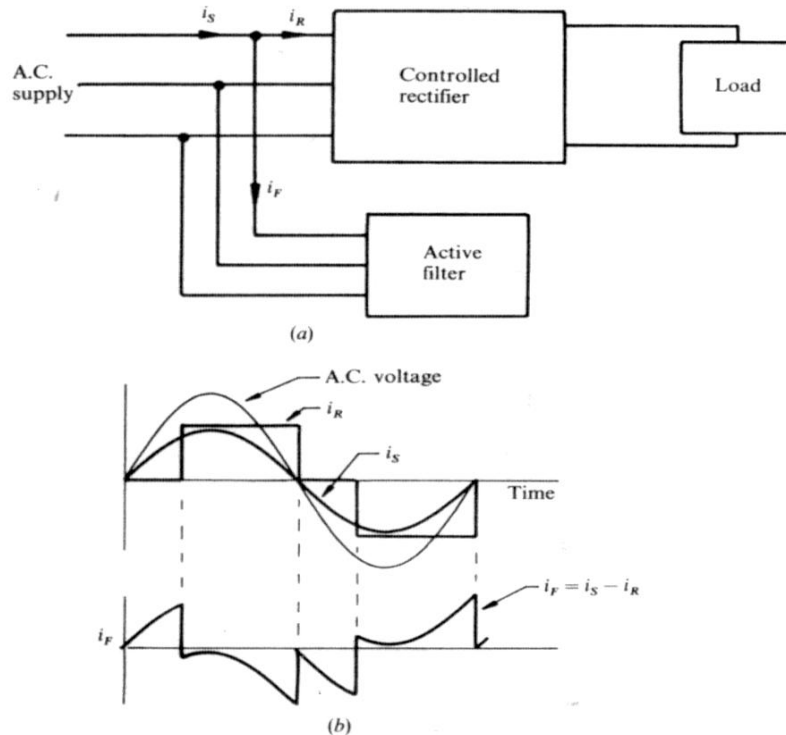
Σχήμα 12 Φιλτράρισμα αρμονικών σε γραμμή AC.

### 6.1.3 Ενεργά φίλτρα (Active Filters)

Ως γνωστό, τα μη γραμμικά φορτία λειτουργούν με μη ημιτονοειδή ρεύματα, τα οποία προκαλούν πληθώρα προβλημάτων. Μια μέθοδος μετατροπής των μη ημιτονοειδών ρευμάτων σε ημιτονοειδή και μάλιστα σε φάση συνεχώς με την τάση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα PWM μετατροπέα παράλληλα με το φορτίο, σχ. 13. Ο μετατροπέας αυτός καλείται ενεργό φίλτρο.

Ο ρόλος του ενεργού φίλτρου φαίνεται στο σχ. 13, όπου ένας ελεγχόμενος ανορθωτής απορροφά από το δίκτυο AC ένα ρεύμα,  $i_R$ , σχεδόν τετραγωνικό. Σ' αυτή την περίπτωση ο ελεγχόμενος ανορθωτής είναι τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, που λειτουργεί με γωνία έναυσης  $30^\circ$  και τροφοδοτεί ένα φορτίο με μεγάλη αυτεπαγωγή. Για να μετατραπεί το σχεδόν τετραγωνικό ρεύμα σε ημιτονοειδές, το φίλτρο πρέπει να απορροφήσει το ρεύμα  $i_F$ , που φαίνεται στο

σχ. 13(b). Το φίλτρο δεν καταναλώνει ισχύ, ενώ η ισχύς φορτίου προσφέρεται από το σε φάση με την τάση ρεύμα τροφοδοσίας, και το φίλτρο εξουδετερώνει όλη την άεργη ισχύ και τις αρμονικές συνιστώσες ρεύματος, που απορροφώνται από τον ανορθωτή.



**Σχήμα 13** Ο ρόλος ενός ενεργού φίλτρου. (α) Σύνδεση στο κύκλωμα. (β) Κυματομορφές ρεύματος.

#### 6.1.4 M/Σ Zig-Zag (HMT Harmonic Mitigating Transformers).

##### Μέθοδοι περιορισμού αρμονικών σε κτηριακές εγκαταστάσεις

Οι τύποι των τριφασικών μετασχηματιστών διανομής κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες:

- **Στάνταρ M/Σ (Δ/Y).**
- **K-Factor M/Σ (Δ/Y).** Οι M/Σ αυτοί σε σύγκριση με τους στάνταρ παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες πυρήνα και χαλκού και συνεπώς αντέχουν περισσότερο σε δυσμενή μη γραμμικά φορτία, που δημιουργούν αρμονικές συνιστώσες ρεύματος. Διαθέτουν μεγαλύτερης ισχύος σιδηροπυρήνες γιατί οι απώλειες δυνορευμάτων πολλαπλασιάζονται μέχρι και 20 φορές με τα αρμονικά ρεύματα. Επιπλέον διαθέτουν χάλκινα τυλίγματα μεγαλύτερης διατομής που παρουσιάζουν μικρότερες αντιστάσεις και με αυτό τον τρόπο περιορίζουν τις θερμικές απώλειες  $I^2R$ . Η τυποποίησή τους συνδέεται με την τυποποίηση των μη γραμμικών φορτίων, αναφορικά με το περιεχόμενο των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος σε πλήρη φόρτιση. Οι τυποποιημένες τιμές του συντελεστή K είναι: 4, 9,

13, 20, 30, 40 και 50. Στο σχήμα 14 φαίνεται η θερμική συμπεριφορά ενός στάνταρ μετασχηματιστή σε φορτίο με THD<sub>i</sub> 100% σε σύγκριση με γραμμικό φορτίο.



**Σχήμα 14** Απώλειες θερμότητας & ποσοστό θερμικής χωρητικότητας στάνταρ Μ/Σ.

- **HMT.** Οι μετασχηματιστές περιορισμού των αρμονικών (HMTs) διαφέρουν λειτουργικά από τους στάνταρ και K-Factor, γιατί περιορίζουν την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων στα τυλίγματα, άρα λιγότερες θερμικές απώλειες και μικρότερη παραμόρφωση τάσης. Τα τυλίγματα zig-zag στο δευτερεύον ακυρώνουν την επαγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα των τριπλών αρμονικών ρευμάτων (3<sup>η</sup>, 9<sup>η</sup>, 15<sup>η</sup>). Επί πλέον με πολλαπλά (2 ή 3) δευτερεύοντα τυλίγματα μετατόπισης φάσης μπορούν να ακυρώσουν στα δευτερεύοντα τυλίγματα τις αρμονικές μαγνητικές ροές των 5<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup>, 11<sup>ης</sup>, 13<sup>ης</sup>, 17<sup>ης</sup>, 19<sup>ης</sup> αρμονικών. Τα μονοφασικά φορτία στους HMT με πολλαπλά δευτερεύοντα τυλίγματα ισοκατανέμονται στα τυλίγματα αυτά. Πιο συγκεκριμένα, HMT με δύο δευτερεύοντα εξαλείφει από το πρωτεύον τύλιγμα την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων 5<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup>, 17<sup>ης</sup>, 19<sup>ης</sup> τάξης, ενώ HMT με τρία δευτερεύοντα εξαλείφει από το πρωτεύον τύλιγμα την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων 5<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup>, 11<sup>ης</sup>, 13<sup>ης</sup> τάξης.

Οι Μ/Σ Δ/Υ και οι Μ/Σ K-Factor παρουσιάζουν υψηλή σύνθετη αντίσταση στη ροή των αρμονικών ρευμάτων των μη γραμμικών φορτίων. Ως γνωστό, κάθε πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών για συχνότητες μεγαλύτερες της θεμελιώδους είναι αιτία δημιουργίας αρμονικών συνιστωσών τάσης. Αυτό έχει σαν συνέπεια να εμφανίζουν σημαντικό ποσοστό παραμόρφωσης τάσης, όταν λειτουργούν με ονομαστικό φορτίο. Γι αυτό πρέπει να λειτουργούν με σημαντικά μειωμένο φορτίο, για να καλύπτουν τους περιορισμούς που βάζουν οι κανονισμοί για την ποιότητα τάσης στα τυλίγματα των μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές HMT, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη σύνθετη αντίσταση, που βλέπουν τα αρμονικά ρεύματα. Έτσι ο συντελεστής THD<sub>v</sub> εμφανίζεται σημαντικά βελτιωμένος σε όλη την κλίμακα των φορτίσεων.



Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται ο συντελεστής  $THD_V$ , διάφορων τύπων Μ/Σ, για διαφορετικές φορτίσεις του ίδιου μη γραμμικού φορτίου Κ-13.

	100% φόρτιση	75% φόρτιση	50% Φόρτιση
<b>Κ-13 Μ/Σ</b>	<b>10,5%</b>	<b>7,8%</b>	<b>5,2%</b>
<b>HMT 1 δευτερεύον</b>	<b>6,9%</b>	<b>5,2%</b>	<b>3,4%</b>
<b>HMT 2 δευτερεύοντα</b>	<b>3,8%</b>	<b>2,8%</b>	<b>1,9%</b>
<b>HMT 3 δευτερεύοντα</b>	<b>3,6%</b>	<b>2,7%</b>	<b>1,8%</b>

Οι μετασχηματιστές HMT εξαλείφουν την επαγωγή, συνεπώς και την κυκλοφορία, στο πρωτεύον τύλιγμα των συμμετρικών συνιστωσών των τριπλών αρμονικών ρευμάτων. Στο πρωτεύον κυκλοφορούν τα ασύμμετρα ρεύματα των τριπλών αρμονικών, που στην πράξη είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό. Επίσης το ίδιο συμβαίνει και για τις περιττές αρμονικές μέχρι την 19<sup>η</sup>.

Οι θερμικές απώλειες των μετασχηματιστών αυξάνονται σημαντικά όταν τροφοδοτούν μη γραμμικά φορτία. Οι απώλειες χαλκού ενισχύονται ακόμα περισσότερο και από την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι απώλειες τριών τύπων μετασχηματιστών 112 kVA ο καθένας για διαφορετικές φορτίσεις με φορτία που παρουσιάζουν  $THD_I$  80%. Τέτοια φορτία είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

Φορτίο	Απώλειες (W)		
	Κ-13	HMT 1 δευτερεύον	HMT 2 δευτερεύοντα
50%	2852	1603	1489
75%	5610	2827	2583
100%	9470	4540	4414

Τα παλμοτροφοδοτικά των ηλεκτρονικών υπολογιστών, εκτυπωτών, κτλ αποτελούν τη βασική πηγή των τριπλών και περιττών αρμονικών, που προκαλούν τα μονοφασικά φορτία. Η δεύτερη πηγή είναι οι λαμπτήρες φθορισμού, με μικρότερο όμως συντελεστή  $THD_I$ . Για αυτό σε μεγάλα κτίρια γραφείων, τηλεφωνικά κέντρα, κτλ, τα κύρια προβλήματα των αρμονικών είναι τα όρια του  $THD_V$  (γενικά 5%, νοσοκομεία, αεροδρόμια 3%) και η υπερφόρτιση του ουδέτερου. Η καλύτερη λύση που καλύπτει τους κανονισμούς είναι η χρήση HMT, ουδέτερου διπλάσιας διατομής και τα ηλεκτρονικά ballast.

### 6.1.5 Φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων (RFI)

Η γρήγορη διακοπτική λειτουργία των τρανζίστορ IGBTs (από 3 έως 18 kHz περίπου) σε ρυθμιστές στροφών (VFDs), παλμοτροφοδοτικά (SMPS), τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής (UPS) προκαλεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EMI Electromagnetic Interference) στο φάσμα συχνοτήτων των ραδιοκυμάτων. Τα

ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα μεταφέρονται μέσα από τα καλώδια και αν φτάσουν στις γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, τότε μπορεί να διαδοθούν ασύρματα. Για να αποφευχθεί η διάχυσή τους στα δίκτυα, κατάλληλα φίλτρα συνδέονται στην είσοδο των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος, τα λεγόμενα φίλτρα RFI.

## **6.2 Ρυθμιστές στροφών AC κινητήρων (VFDs)**

### **Μέθοδοι περιορισμού αρμονικών σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις**

Το κεφάλαιο των ρυθμιστών στροφών παρουσιάζει σήμερα πολύ μεγάλη σημασία, γιατί η χρήση τους στα κινητήρια συστήματα εμφανίζει την τελευταία δεκαπενταετία αλματώδη αύξηση, εκτοπίζοντας συνεχώς τα DC κινητήρια συστήματα. Οι αιτίες για το φαινόμενο αυτό μπορεί να αναζητηθούν και στα δύο μέρη του κινητήριου συστήματος, δηλαδή, τόσο στην ηλεκτρική μηχανή, όσο και στο ρυθμιστή στροφών.

Σχετικά με την ηλεκτρική μηχανή, τρεις είναι οι βασικές αιτίες, που κάνουν την AC επαγωγική μηχανή να υπερέχει σημαντικά έναντι της DC μηχανής. Πρώτο, το κόστος κατασκευής που μπορεί να κατέβει μέχρι το 1/10 του κόστους DC μηχανής αντίστοιχης ισχύος, σε συνδυασμό με συνεχείς κατασκευαστικές βελτιώσεις, από τα ρουλεμάν μέχρι τα σιδηρομαγνητικά υλικά, για αποδοτικότερη λειτουργία σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας, που παρέχουν τα VFDs. Δεύτερο, η μηδενική σχεδόν ανάγκη συντήρησης έναντι στη τακτική συντήρηση, που απαιτεί η DC μηχανή λόγω της φθοράς των ψηκτρών. Τέλος οι AC επαγωγικές μηχανές κατασκευάζονται σε ένα τεράστιο εύρος ισχύος καλύπτοντας ανάγκες που ξεκινούν από μερικά W (πχ 70W) έως αρκετά MW (πχ 5,5MW)

Αναφορικά με τους ρυθμιστές στροφών, κι εδώ αρκετοί είναι οι λόγοι που καθιστούν τους AC ρυθμιστές στροφών όλο και πιο ελκυστικούς. Ο βασικός λόγος είναι οι συνεχείς τεχνολογικές βελτιώσεις σε συνδυασμό με τη συμπίεση του κόστους κατασκευής. Οι τεχνολογικές βελτιώσεις παρουσιάζονται και στα δύο κύρια τμήματα του ρυθμιστή στροφών, δηλαδή το τμήμα των ηλεκτρονικών ισχύος και το τμήμα του ελέγχου.

Ποιο είναι το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος λειτουργίας των ρυθμιστών στροφών των AC μηχανών; Η απάντηση δεν είναι απλή και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι βασικότεροι των οποίων είναι οι παρακάτω:

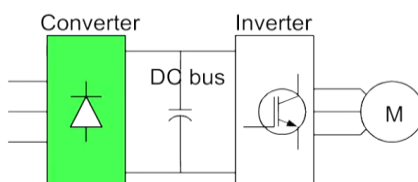
- Η εσωτερική δομή του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Η πρώτη διαδικασία μετατροπής ισχύος είναι η AC/DC ή διαδικασία ανόρθωσης ή διαδικασία Front-End. Για τη μετατροπή AC/DC χρησιμοποιούνται συνήθως διατάξεις διόδων που παράγουν διαφορετικό αρμονικό περιεχόμενο η καθεμία, το οποίο εξαρτάται από το πλήθος παλμών της ανόρθωσης.

- Ο ακολουθούμενη μέθοδος διακοπτικής λειτουργίας των ηλεκτρονικών διακοπών (IGBTs) του αντιστροφέα (π.χ. PWM inverter).
- Η φύση του μηχανικού φορτίου, σταθερής ή μεταβλητής ροπής (π.χ. αντλίες, ανεμιστήρες μεταβλητά φορτία ή γερανοί, μεταφορικοί ιμάντες σταθερά φορτία).
- Η λειτουργία με πλήρες ή μερικό φορτίο.

Οι μέθοδοι περιορισμού των αρμονικών που περιέχει το ρεύμα λειτουργίας των ρυθμιστών στροφών των επαγωγικών μηχανών είναι πάρα πολλές. Συγκρινόμενες μεταξύ τους παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζουν και σημαντικά διαφοροποιημένο κόστος. Γι αυτό και η επιλογή των μεθόδων περιορισμού τους είναι μια πολυπαραγοντική και δύσκολη εργασία, τόσο για τη βελτίωση λειτουργίας υπαρχόντων εγκαταστάσεων, όσο και για τη σχεδίαση νέων. Οι πλέον συνηθισμένες μέθοδοι για τον περιορισμό των αρμονικών παρατίθενται στη συνέχεια.

### 6.2.1 Μικρότερος πυκνωτής (C-less)

Η ενδιάμεση μετατροπή ισχύος σε όλους τους μετατροπείς συχνότητας περιέχει παράλληλα συνδεδεμένη χωρητικότητα για την εξομάλυνση της ανορθωμένης τάσης, βλέπε σχήμα 15. Στην πράξη η χωρητικότητα δημιουργείται από δύο ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές σε σειρά, για να μειωθεί στο μισό η ονομαστική τους τάση.



**Σχήμα 15** Πυκνωτής εξομάλυνσης ανόρθωσης (DC link capacitor).

Όσο μεγαλώνει η χωρητικότητα των πυκνωτών, τόσο μικραίνει η κυμάτωση της τάσης και τόσο αυξάνεται η  $V_{DC}$ . Η μέγιστη χωρητικότητα εξασφαλίζει  $V_{DC} = V_{peak AC}$ . Η μείωση της χωρητικότητας περίπου 10% προκαλεί μια πολύ σημαντική πτώση (50%) της 5<sup>ης</sup> αρμονικής που προξενεί τη μεγαλύτερη ποσοστιαία παραμόρφωση στα ρεύματα των VFDs.

#### Πλεονεκτήματα

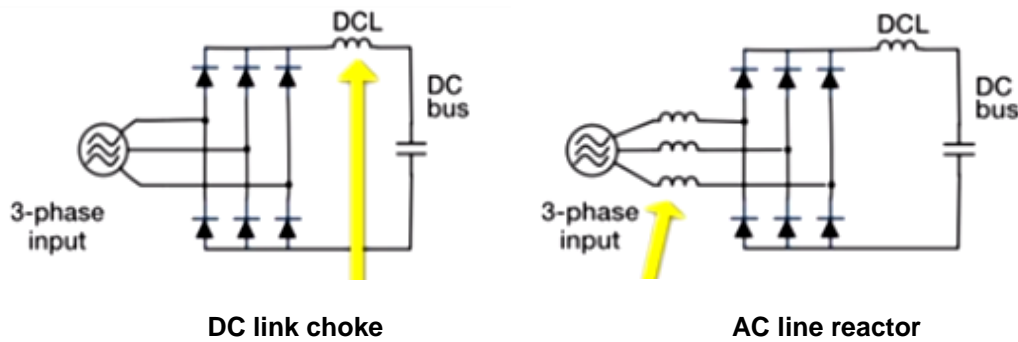
- Χαμηλότερο κόστος μέχρι 10% από ένα στάνταρ VFD
- Μειωμένες θερμικές απώλειες από ένα στάνταρ VFD
- Ίδιος χώρος με ένα στάνταρ VFD

#### Μειονεκτήματα

- Εφαρμογή μόνο σε μηχανικά φορτία φυγοκεντρικών αντλιών και ανεμιστήρων
- Μείωση μόνο της 5ης αρμονικής
- Υψηλό ποσοστό αρμονικών μεγάλης τάξης

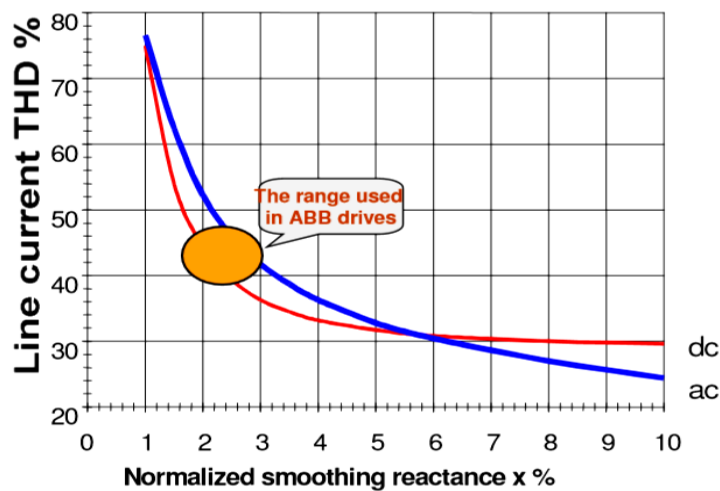
**Μείωση TDD = 35 – 45 %. Μείωση κόστους 10 % προς στάνταρ VFD.**

## 6.2.2 Πηνία



**Σχήμα 16** Πηνία εξομάλυνσης στο σύνδεσμο DC και στη γραμμή AC.

Το μέγεθος των πηνίων καθορίζεται από το ποσοστό πτώσης τάσης που εκφράζεται επί τοις % της ονομαστικής τάσης, π.χ. 3% πηνίο σε γραμμή 400 V θα προκαλέσει 12 V πτώση τάσης. Στο σχήμα 17 φαίνεται ο περιορισμός του THD<sub>i</sub> σε συνάρτηση με το μέγεθος των πηνίων AC, DC. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πτώση τάσης, γι αυτό το συνολικό μέγεθός τους δηλαδή DC ή AC ή AC+DC κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1% και 5%.



**Σχήμα 17** Βελτίωση THD<sub>i</sub> με πηνία εξομάλυνσης.

Τα πηνία DC link, που είναι εσωτερικά, ενσωματώνονται από τους κατασκευαστές στο ρυθμιστή στροφών και είναι στάνταρ στους VFDs με ισχύ μεγαλύτερη των 2 kW. Τα πηνία AC συνδέονται εξωτερικά και δεν είναι προεγκατεστημένα (optional).

Το μέγεθος των πηνίων AC περιορίζεται στην περιοχή 3% μέχρι 5%, γιατί στο διάστημα αυτό παρουσιάζουν την καλύτερη σχέση αποτελεσματικότητας προς πτώση τάσης και κόστος, όπως βλέπουμε στο παρακάτω πίνακα, που φαίνεται η βελτίωση του συντελεστή παραμόρφωσης ρεύματος σε συνάρτηση με το μέγεθος ενός πηνίου AC.

Harmonic Order	Reactor Size				
	0.5%	1.0%	3.0%	5.0%	10.0%
5 <sup>th</sup>	80.0%	60.0%	40.0%	32.0%	23.0%
7 <sup>th</sup>	60.0%	37.0%	16.0%	12.0%	7.5%
11 <sup>th</sup>	18.0%	12.0%	7.3%	5.8%	4.0%
13 <sup>th</sup>	10.0%	7.5%	4.9%	3.9%	2.8%
17 <sup>th</sup>	7.3%	5.2%	3.0%	2.2%	0.4%
19 <sup>th</sup>	6.0%	4.2%	2.2%	0.8%	0.2%
$I_{THD} (%)$	102.5%	72.2%	44.1%	35.0%	24.7%
$I_T / I_1$	143.0%	123.0%	109.0%	106.0%	103.0%

### Πλεονεκτήματα

- Μείωση των αρμονικών από 100% σε κάτω από 40 %
- Η αυξημένη προστασία VFD από υπερτάσεις
- Η αναισθησία στις αλλαγές του συστήματος (πχ μεταβολή φορτίου)
- Εφαρμόσιμη σε κάθε τύπο μηχανικού φορτίου

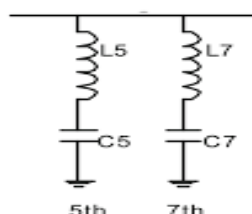
### Μειονεκτήματα

- Ενδέχεται να απαιτούν μεγαλύτερη ή ξεχωριστή καμπίνα εγκατάστασης
- Η πιθανή πτώση τάσης
- Η πιθανή ανεπάρκεια στο επιθυμητό ποσοστό μείωσης αρμονικών
- Απώλειες θερμότητας (λιγότερες από άλλες μεθόδους που ακολουθούν)

Μείωση TDD = 35 – 45 % . Αύξηση κόστους 5 – 15 % προς στάνταρ VF

## 6.2.3 Παθητικά παράλληλα φίλτρα (Tuned Filter)

Η σύνδεση των παράλληλων φίλτρων σε μία από τις 3 φάσεις της γραμμής AC φαίνεται στο σχήμα 18. Αντίστοιχα φίλτρα υπάρχουν και στις υπόλοιπες γραμμές. Στην περίπτωση που τα φορτία είναι ρυθμιστές στροφών, σχεδιάζονται συνήθως δύο κλάδοι για την απορρόφηση δύο μόνο αρμονικών της 5<sup>ης</sup> και της 7<sup>ης</sup>.



Σχήμα 18 Παθητικά παράλληλα φίλτρα.

### Πλεονεκτήματα

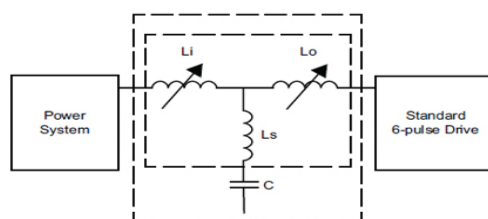
- Κεντρική λύση συστήματος
- Η μέση μείωση των αρμονικών
- Η αυξημένη προστασία VFD από υπερτάσεις
- Η αναισθησία στις αλλαγές του συστήματος (πχ μεταβολή φορτίου)

### Μειονεκτήματα

- Ενδέχεται να απαιτούν μεγαλύτερη ή ξεχωριστή καμπίνα εγκατάστασης
- Η πιθανή ανεπάρκεια στο επιθυμητό ποσοστό μείωσης αρμονικών
- Απώλειες θερμότητας

Μείωση TDD = 18 – 22 % . Αύξηση κόστους 35 – 45 % προς στάνταρ VFD

## 6.2.4 Παθητικά φίλτρα ευρείας ζώνης (Broadband Filters)



Σχήμα 19 Παθητικά φίλτρα ευρείας ζώνης.

### Πλεονεκτήματα

- Καλή μείωση των αρμονικών
- Η αυξημένη προστασία VFD από υπερτάσεις
- Η αναισθησία στις αλλαγές του συστήματος (πχ μεταβολή φορτίου)

### Μειονεκτήματα

- Μεγαλύτερο (διπλάσιο) ή ξεχωριστό κουτί εγκατάστασης
- Η πιθανή πτώση τάσης
- Απώλειες θερμότητας
- Μεμονωμένη λύση. Φίλτρο σε κάθε VFD
- Εφαρμογή μόνο σε μηχανικά φορτία φυγοκεντρικών αντλιών και ανεμιστήρων

**Μείωση TDD = 5 – 8 %. Αύξηση κόστους 35 – 45 % προς στάνταρ VFD.**

## 6.2.5 Πολυφασικές ανορθώσεις

Η δημιουργία της ενδιάμεσης συνεχούς τάσης (DC link) στην εσωτερική δομή ισχύος των ρυθμιστών στροφών των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων μπορεί να προέλθει από διάφορες ανορθωτικές διατάξεις. Οι ανορθωτικές διατάξεις είναι μη ελεγχόμενες γέφυρες. Όταν το δίκτυο είναι 3Φ, οι γέφυρες είναι τριφασικές, ενώ όταν υπάρχει μόνο 1Φ παροχή, τότε είναι μονοφασικές. Η ανορθωμένη τάση διαφέρει στη κυμάτωση. Όσο περισσότερες διόδους περιέχει ο ανορθωτής, τόσο μικρότερη η κυμάτωση στη συνεχή τάση και τόσο καλύτερα ημιτονοειδή ρεύματα απορροφά από το δίκτυο. Η κυμάτωση προκύπτει από το πλήθος των περιόδων (παλμών) που παρουσιάζει η τάση εξόδου του ανορθωτή σε μία περίοδο της τάσης εισόδου. Για παράδειγμα η τάση εξόδου μιας 1Φ γέφυρας με διόδους έχει δύο περιόδους (π ακτίνια η καθεμιά) σε σχέση με τα 2π ακτίνια της τάσης AC, ενώ η 3Φ γέφυρα έχει 6 περιόδους ( $2\pi/6 = \pi/3$  ακτίνια η καθεμιά).

Μετά από ανάλυση Fourier των κυματομορφών του ρεύματος AC των διαφόρων τύπων ανορθωτών προκύπτει μια πολύ χρήσιμη και απλή σχέση

για το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος. Οι τάξεις των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος AC καθορίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$h = kq \pm 1$$

Όπου:  $h$  η τάξη της αρμονικής

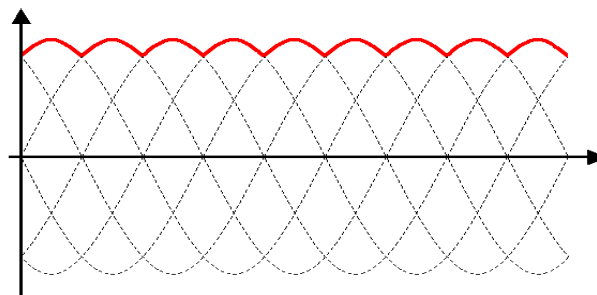
$q$  πλήθος παλμών (κυματώσεων) εξόδου DC ανά κύκλο AC

$k$  οποιοσδήποτε ακέραιος αριθμός

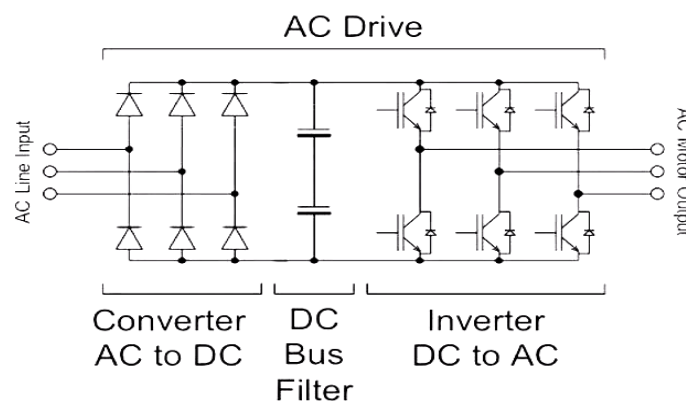
Οι ρυθμιστές στροφών με διάφορους τύπους πολυφασικών ανορθώσεων δεν έχουν περιορισμούς σε σχέση με την φύση των μηχανικών φορτίων. Τροφοδοτούν τις ασύγχρονες μηχανές για κάθε μηχανικό φορτίο, σταθερής ροπής (π.χ. ανυψωτικά μηχανήματα, ταινιόδρομοι) ή μεταβλητής ροπής (π.χ. αντλίες, ανεμιστήρες) ή σταθερής ισχύος (τυλικτικά μηχανήματα).

### 6.2.5.1 Ρυθμιστές στροφών 6 παλμών (6-pulse VFDs)

Στον κόσμο των ρυθμιστών στροφών την συντριπτική πλειοψηφία κατέχουν αυτοί που έχουν μια τριφασική γέφυρα διόδων στην αρχή της διαδικασίας μετατροπής ισχύος από AC σε DC, (οι επωνομαζόμενοι Diode Front-End), όπως φαίνεται στο σχήμα 21. Οι λόγοι της κυριαρχίας τους είναι το φθηνότερο δυνατό κόστος (μόνο μία 3Φ γέφυρα, δηλ. τριφασική ανόρθωση πλήρους κύματος σχ. 20) και το ότι μπορεί να κατασκευαστούν σε όλες τις ισχύεις, από 1kW μέχρι πολλές εκατοντάδες kW.



Σχήμα 20 Τριφασική ανόρθωση πλήρους κύματος.



Σχήμα 21 6-pulse VFD.

Από την εφαρμογή της μαθηματικής σχέσης για το πλήθος της τάξης των αρμονικών, προκύπτει ότι το ρεύμα AC ενός ρυθμιστή στροφών 6 παλμών περιέχει τις αρμονικές με τάξη:  $5^{\eta}$ ,  $7^{\eta}$ ,  $11^{\eta}$ ,  $13^{\eta}$ ,  $17^{\eta}$ ,  $19^{\eta}$  .....

#### Πλεονεκτήματα

- Το χαμηλότερο κόστος απ όλους τους τύπους VFDs
- Το μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής παραμόρφωσης στη 5η & 7η
- Δεν προκαλεί εγχοπές στην AC τάση λόγω μετάβασης (notching voltage)

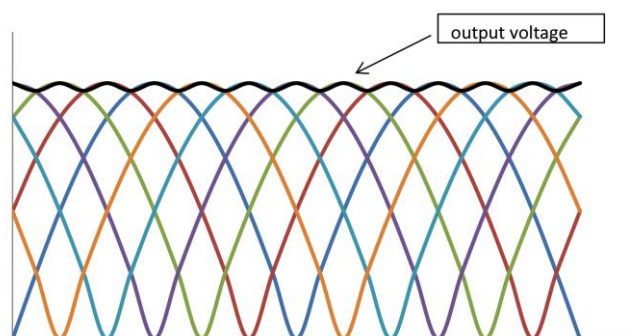
#### Μειονεκτήματα

- Κανένας περιορισμός αρμονικών
- Ασυνεχής αγωγή με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μεγάλο πηνίο εξομάλυνσης

**Μείωση αρμονικών καμία. TDD = 100 - 120 % . Κόστος στάνταρ VFD.**

### 6.2.5.2 Ρυθμιστές στροφών 12 παλμών (12-pulse VFDs)

Η ανόρθωση 12 παλμών ονομάζεται και εξαφασική ανόρθωση. Η εξαφασική ανόρθωση παρουσιάζει καλύτερη εξομάλυνση της συνεχούς τάσης σε σχέση με την τριφασική, έχοντας 12 περιόδους / περίοδο AC. Η περίοδος, συνεπώς της ανόρθωσης 12 παλμών είναι  $2\pi / 12 = \pi/6$ .

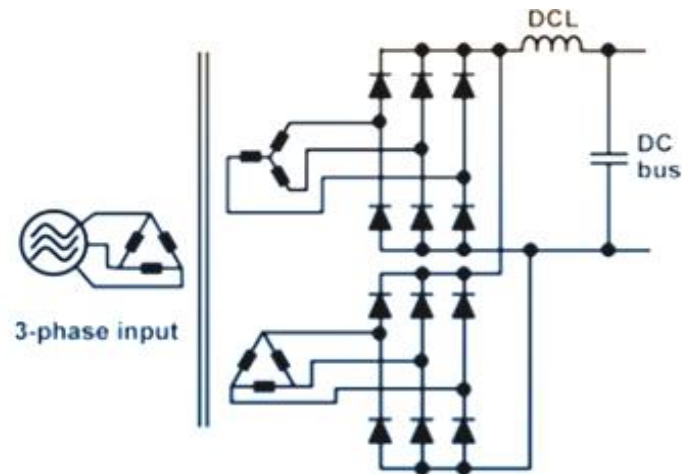


**Σχήμα 22** Εξαφασική ανόρθωση πλήρους κύματος (12-pulse).

Για να προκύψουν 6 φάσεις απαιτείται Μ/Σ με δύο δευτερεύοντα. Επί πλέον απαιτούνται δύο τριφασικές γέφυρες για να προκύψει ανόρθωση 12 παλμών. Ο Μ/Σ είναι τύπου  $[\Delta / \Delta, Y]$ , στον οποίο οι δύο τριφασικές τάσεις στα δευτερεύοντα παρουσιάζουν διαφορά φάσης  $30^{\circ}$  μεταξύ τους. Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργούνται στην έξοδο του Μ/Σ 6 φάσεις. Στη συνέχεια κάθε τριφασική τάση ανορθώνεται με τριφασική γέφυρα. Η έξοδος των γεφυρών μπορεί να συνδεθεί είτε σε σειρά για τη δημιουργία μεγαλύτερης τάσης DC, είτε παράλληλα για την απορρόφηση μεγαλύτερης ισχύος από το τριφασικό δίκτυο. Στο σχήμα 23 βλέπουμε τον τύπο εξαφασικής ανόρθωσης με παράλληλη σύνδεση των γεφυρών.



Στην έξοδο των γεφυρών (DC link ή DC bus) υπάρχει LC φίλτρο για την απόλυτη εξομάλυνση της συνεχούς τάσης.



**Σχήμα 23** Εξαφασική ανόρθωση πλήρους κύματος (12-pulse) με φίλτρο DC.

Από την εφαρμογή της μαθηματικής σχέσης για το πλήθος της τάξης των αρμονικών, προκύπτει ότι το ρεύμα AC ενός ρυθμιστή στροφών 12 παλμών περιέχει τις αρμονικές με τάξη:

$11^{\text{η}}$ ,  $13^{\text{η}}$ ,  $23^{\text{η}}$ ,  $25^{\text{η}}$  .....

Συγκρίνοντας το περιεχόμενο των αρμονικών ρευμάτων που εμφανίζονται στην τριφασική και εξαφασική ανόρθωση, παρατηρούμε ότι από ένα 12-pulse VFD απουσιάζουν οι  $5^{\text{η}}$ ,  $7^{\text{η}}$ ,  $17^{\text{η}}$ ,  $19^{\text{η}}$  αρμονικές με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ένα πολύ χαμηλό επίπεδο παραμόρφωσης.

#### Πλεονεκτήματα

- Σημαντική μείωση των αρμονικών
- Πλήρης εξάλειψη της 5ης & 7ης
- Αναισθησία στις αλλαγές του συστήματος

#### Μειονεκτήματα

- Αυξημένο μέγεθος και βάρος
- Οι τάξεις των αρμονικών ρευμάτων εξαρτώνται από το φορτίο
- Σε ασύμμετρο δίκτυο (>2%) χαλαίει ο TDD

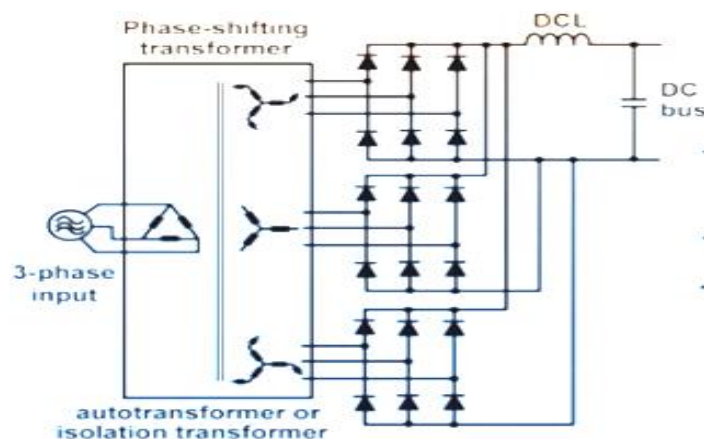
**Μείωση TDD = 10 - 12 % . Αύξηση κόστους 70 – 75 % προς στάνταρ VFD.**

### 6.2.5.3 Ρυθμιστές στροφών 18 παλμών (18-pulse VFDs)

Η ανόρθωση 18 παλμών ονομάζεται και θφασική ανόρθωση. Η θφασική ανόρθωση παρουσιάζει καλύτερη εξομάλυνση της συνεχούς τάσης σε σχέση

με την 6φασική, έχοντας 18 περιόδους / περίοδο AC. Η περίοδος, συνεπώς της ανόρθωσης 18 παλμών είναι  $2\pi / 18 = \pi/9$ .

Για να προκύψουν 9 φάσεις απαιτείται Μ/Σ με τρία δευτερεύοντα. Επί πλέον απαιτούνται τρεις τριφασικές γέφυρες για να προκύψει ανόρθωση 18 παλμών. Ο Μ/Σ είναι τύπου  $[\Delta / Z, Y, Z]$ , στον οποίο οι τρεις τριφασικές τάσεις στα δευτερεύοντα παρουσιάζουν διαφορά φάσης  $20^\circ$  μεταξύ τους. Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργούνται στην έξοδο του Μ/Σ 9 φάσεις. Στη συνέχεια κάθε τριφασική τάση ανορθώνεται με τριφασική γέφυρα. Στο σχήμα 24 βλέπουμε τα τρία δευτερεύοντα του Μ/Σ που τροφοδοτούν τις τρεις παράλληλα συνδεδεμένες 3Φ γέφυρες διόδων.



**Σχήμα 24** Ανορθωτής 18 παλμών με φίλτρο DC.

Από την εφαρμογή της μαθηματικής σχέσης για το πλήθος της τάξης των αρμονικών, προκύπτει ότι το AC ρεύμα ενός ρυθμιστή στροφών 18 παλμών περιέχει τις αρμονικές με τάξη:

$$17^n, 19^n, 35^n, 37^n, \dots$$

Συγκρίνοντας το περιεχόμενο των αρμονικών ρευμάτων που εμφανίζονται στην 3φασική, 6φασική και 9φασική ανόρθωση, παρατηρούμε ότι από ένα 18-pulse VFD απουσιάζουν οι  $5^n, 7^n, 11^n, 13^n, 23^n, 25^n$  αρμονικές με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ένα πάρα πολύ χαμηλό επίπεδο παραμόρφωσης.

#### Πλεονεκτήματα

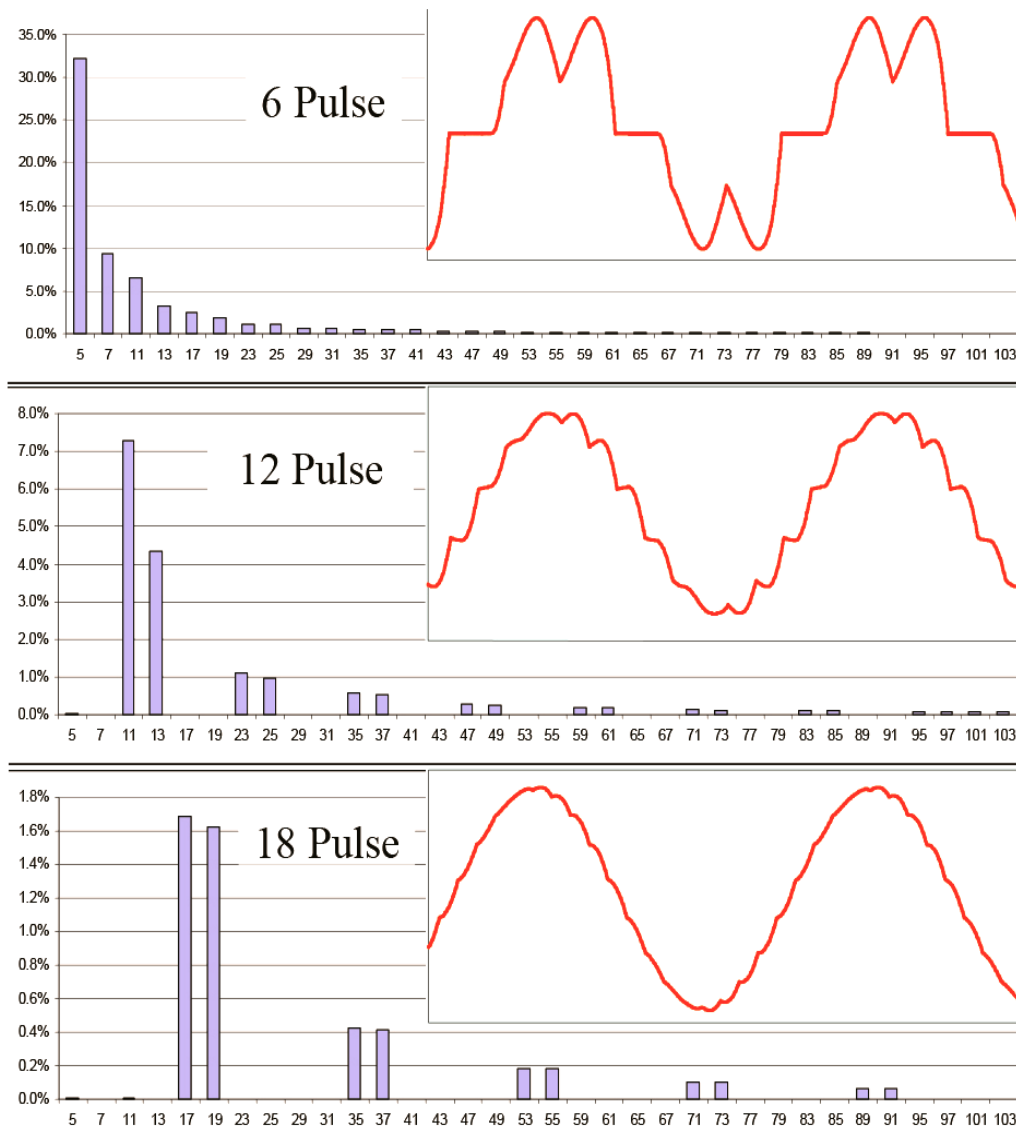
- Καλύπτει όλους τους περιορισμούς των κανονισμών
- Εξαιρετική λύση για πολύ μεγάλα κινητήρια συστήματα
- Αναισθησία στις αλλαγές του συστήματος

#### Μειονεκτήματα

- Πολύ αυξημένο μέγεθος και βάρος
- Οι τάξεις των αρμονικών ρευμάτων εξαρτώνται από το φορτίο
- Σε ασύμμετρο δίκτυο (>2%) χαλαίει ο TDD

**Μείωση TDD = 5 - 7 % . Αύξηση κόστους 80 – 85 % προς στάνταρ VFD.**

Τα κινητήρια συστήματα με μία τριφασική γέφυρα διόδων κατέχουν τη μεγάλη πλειοψηφία στην αγορά των ρυθμιστών στροφών. Τα συστήματα με δύο τριφασικές γέφυρες κατασκευάζονται για ισχύ μεγαλύτερη των 40 kW και απαντώνται συχνά σε κινητήρια συστήματα μεσαίας και μεγάλης ισχύος. Τα συστήματα με τρεις τριφασικές γέφυρες τα συναντάμε σε συστήματα πολύ μεγάλης ισχύος και συνήθως δεν μπαίνουν στη γραμμή παραγωγής, έτσι ώστε να υπάρχει στοκ, αλλά κατασκευάζονται κατόπιν παραγγελίας.

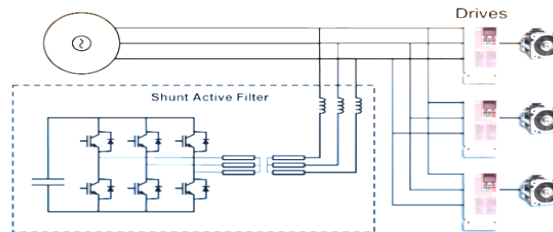


**Σχήμα 25** Κυματομορφές και φάσματα αρμονικών συχνοτήτων εναλλασσόμενων ρευμάτων δικτύου ρυθμιστών στροφών 6,12,18 παλμών.

## 6.2.6 Ενεργά φίλτρα (AHF Active Harmonic Filter)

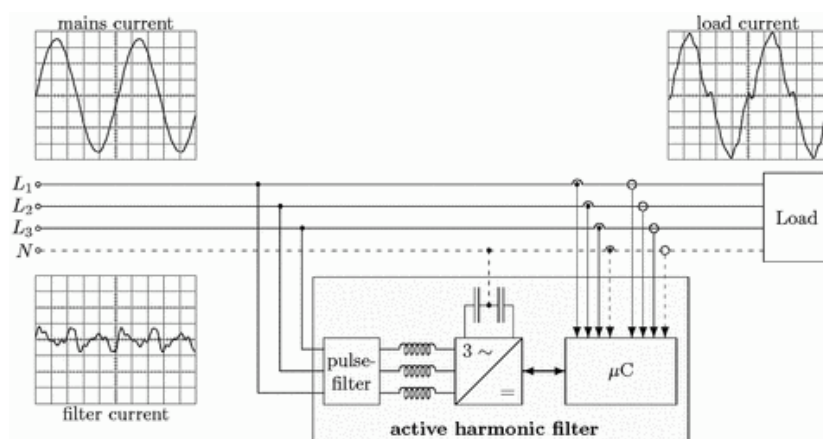
Στο σχήμα 26 φαίνεται το τμήμα ισχύος ενός ενεργού φίλτρου. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αποτελείται από μια τριφασική γέφυρα

αντιστροφής με τρανζίστορ (IGBT inverter) και μία χωρητικότητα DC (DC capacitor link), που παίζει το ρόλο της τράπεζας άεργης ισχύος. Η παράλληλη σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω μετασχηματιστή απομόνωσης και μικρών φίλτρων (πηνίων), ή μόνο μέσω μικρών φίλτρων.



**Σχήμα 26** Παράλληλο ενεργό φίλτρο.

Η αρχή λειτουργίας φαίνεται και στο σχήμα 14 της παραγράφου 6.1.3. Βασίζεται στη μέτρηση των αρμονικών ρευμάτων, αντισταθμίζοντας αυτά με ρεύματα αντίθετης φάσης. Τα ρεύματα του ενεργού φίλτρου είναι άεργα και δημιουργούνται από τον PWM αντιστροφέα και τον DC πυκνωτή. Το αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι ότι τα ρεύματα δικτύου έχουν μόνο θεμελιώδη συνιστώσα, δηλαδή είναι ημιτονοειδή. Ο έλεγχος των ενεργών φίλτρων γίνεται από μικροελεγκτή ( $\mu C$ , microcontroller), που ελέγχει την PWM διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα. Ο μικροελεγκτής αποτελεί τμήμα του κλειστού βρόχου των μετρούμενων ρευμάτων, μέσω μετασχηματιστών ρεύματος (CT, Current Transformer) και των μετρούμενων τάσεων, μέσω μετασχηματιστών μέτρησης τάσεων (VT, Voltage Transformer). Στο σχήμα 27 φαίνεται η συνολική δομή του ενεργού φίλτρου αρμονικών κλειστού βρόχου. Η ροή των διαδικασιών στον κλειστό βρόχο είναι η ακόλουθη. Μετρήσεις  $\rightarrow$  [επεξεργασία + οδήγηση PWM ( $\mu C$ )]  $\rightarrow$  αντιστάθμιση αρμονικών ρευμάτων. Επιπλέον φαίνονται η κυματομορφή του μη γραμμικού φορτίου, η κυματομορφή του άεργου ρεύματος διόρθωσης του φίλτρου και το ημιτονοειδές ρεύμα δικτύου. Τα ενεργά φίλτρα μπορεί να συνδεθούν και σε μεμονωμένα κινητήρια συστήματα για την εξάλειψη των αρμονικών, όμως το κόστος της μεθόδου είναι δυσανάλογο με το αποτέλεσμα.



**Σχήμα 27** Κλειστός βρόχος ενεργού φίλτρου.

Τα ενεργά φίλτρα αποτελούν συνήθως κεντρική λύση για το σύνολο των φορτίων (γραμμικών και μη γραμμικών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (π.χ. μεγάλα κτήρια, βιομηχανίες, κλπ ), γιατί, πέραν του περιορισμού των αρμονικών, μπορούν να εκτελέσουν ταυτόχρονα και άλλες λειτουργίες, που συμβάλουν καθοριστικά σ αυτό που αποκαλούμε ποιότητα ισχύος (PQ Power Quality). Εκτός από τα αρμονικά ρεύμα μπορούν να αντισταθμίσουν και τα άεργα επαγωγικά ρεύματα μιας εγκατάστασης τροφοδοτώντας την εγκατάσταση με τα αντίστοιχα χωρητικά ρεύματα. Κατά αυτό τον τρόπο ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης μπορεί να γίνει μονάδα ή ακόμα και χωρητικός, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά κυκλώματα πυκνωτών για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, η ενεργή αντιστάθμιση των φίλτρων λειτουργεί συνεχώς απαλλάσσοντας τα δίκτυα από τα μεταβατικά διακοπτικά φαινόμενα, που δημιουργούν τα ρελέ σύνδεσης και αποσύνδεσης των πυκνωτών. Πέραν αυτού, οι πυκνωτές διόρθωσης του συνημίτονου είναι ένα φορτίο που μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα συντονισμού με κάποιες αρμονικές συχνότητες των μη γραμμικών φορτίων.

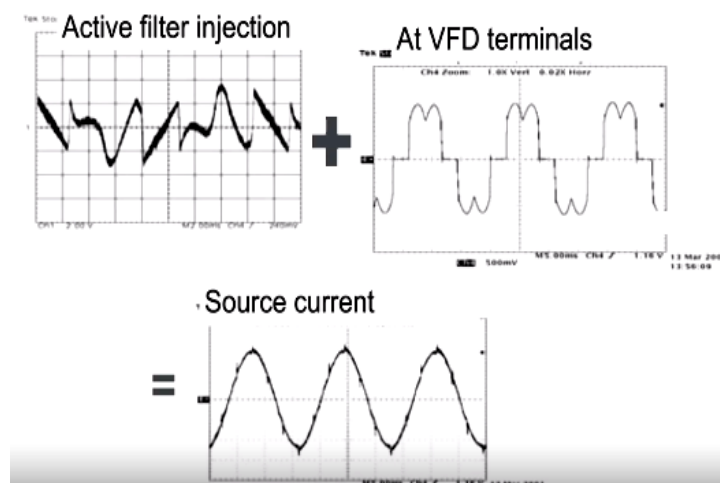
Μια ακόμα πολύ σημαντική λειτουργία των ενεργών φίλτρων είναι η συμμετρική φόρτιση των τριφασικών γραμμών, όπου συνυπάρχουν τριφασικά και μονοφασικά φορτία. Η συμμετρική φόρτιση των τριών φάσεων των γραμμών οδηγεί σε συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων, που είναι καθοριστικής σημασίας για την καλή λειτουργία των τριφασικών φορτίων είτε αυτά είναι γραμμικά φορτία, είτε όχι. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ένα παράδειγμα των δυνατοτήτων ενεργού φίλτρου στη συμμετρική φόρτιση τριφασικής γραμμής 4 αγωγών.

	<b>ΧΩΡΙΣ ΦΙΛΤΡΟ</b>	<b>ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ</b>
<b>L<sub>1</sub></b>	<b>49,1 A</b>	<b>19,6 A</b>
<b>L<sub>2</sub></b>	<b>5,3 A</b>	<b>19,4 A</b>
<b>L<sub>3</sub></b>	<b>5,1 A</b>	<b>19,5 A</b>
<b>N</b>	<b>44,1 A</b>	<b>3,5 A</b>

Ο περιορισμός των αρμονικών ρευμάτων, η διόρθωση του συνολικού συντελεστή ισχύος, αλλά, πολλές φορές και η συμμετρική φόρτιση καθορίζουν την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος. Γι αυτό συχνά τα ενεργά φίλτρα αποκαλούνται και φίλτρα ποιότητας ισχύος (PQF Power Quality Filter). Τα ενεργά φίλτρα κατασκευάζονται για τεράστια γκάμα ισχύος (από λίγα kVA μέχρι πάνω από 3 MVA).

Οι επιδόσεις ενός ενεργού φίλτρου για τον περιορισμό των αρμονικών ρευμάτων σε 6-pulse VFD 100 kW φαίνονται στα παλμογραφήματα ρευμάτων

του σχήματος 28. Πριν τη σύνδεση του φίλτρου ο TDD ήταν 35,3%, ενώ μετά ο TDD ελαττώθηκε στο 2,8%.



**Σχήμα 28** Παλμογραφήματα ρευμάτων. Ενεργού φίλτρου.+ Ρυθμιστή στροφών = Δικτύου.

Σαν μέθοδος περιορισμού αρμονικών σε ένα VFD ισχύει σε γενικές γραμμές:

**Μείωση TDD = 3 - 5 % . Αύξηση κόστους περίπου 100 % προς στάνταρ VFD.**

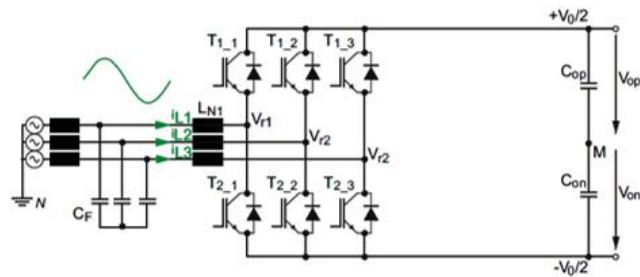
Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να αντισταθμίζει τις αρμονικές πολλών VFDs, που λειτουργούν ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται σε τυποποιημένες διαστάσεις, για να ενσωματώνονται στις καμπίνες ελέγχου των κινητήρων (MCC, Motor Control Center).

### 6.2.7 Ενεργός ανόρθωση (AFE Active Front End)

Όπως είναι γνωστό, η ανόρθωση με διόδους μαζί με τα DC φίλτρα για τη δημιουργία σταθερής DC τάσης και η ελεγχόμενη ανόρθωση με θυρίστορ μαζί με τα DC φίλτρα για τη δημιουργία μεταβλητής DC τάσης προκαλούν αρκετά προβλήματα στα AC δίκτυα τροφοδοσίας. Τα προβλήματα συνδέονται με τη φύση των AC ρευμάτων που απορροφούν και οι δύο παραπάνω κατηγορίες ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Τα AC ρεύματα πρώτο δεν είναι ημιτονοειδή (προβλήματα λόγω αρμονικών ρευμάτων) και δεύτερο εμφανίζουν διαφορά φάσης σε σχέση με την τάση (προβλήματα λόγω χαμηλού συντελεστή ισχύος).

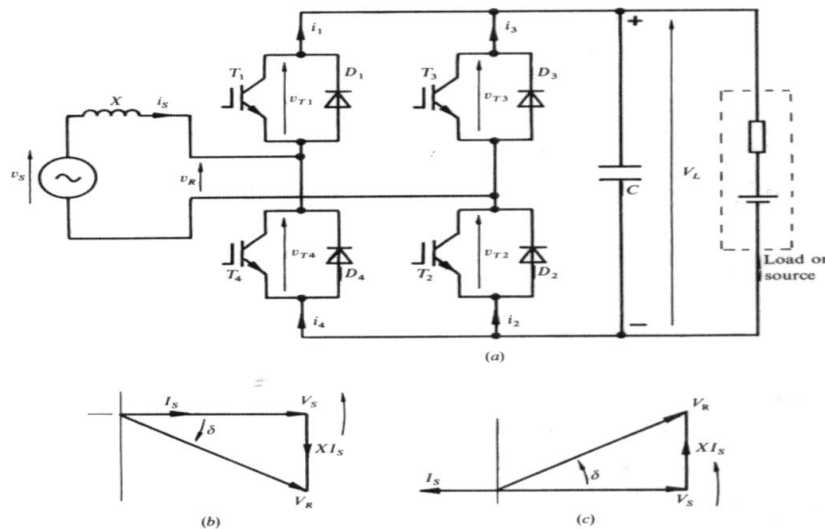
Η πλέον ενδιαφέρουσα λύση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, σε σχέση με τις μεθόδους επίλυσης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, είναι η ενεργός ανόρθωση ή AFE. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας AC/DC αποτελείται από μια τριφασική γέφυρα με

τρανζίστορ IGBT (σχ. 29), πανομοιότυπη με την τριφασική γέφυρα του αντιστροφέα τάσης (inverter), που τροφοδοτεί τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα. Τα τρανζίστορ και των δύο τριφασικών γεφυρών ελέγχονται με PWM διακοπτικές συχνότητες, διαφέρουν όμως ριζικά στη λογική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών. Με την ενεργό ανόρθωση ή με άλλα λόγια με τη χρήση της PWM ανόρθωσης μπορούμε να απορροφήσουμε σχεδόν ημιτονοειδή AC ρεύματα, απαλλαγμένα από περιεχόμενο αρμονικών συνιστωσών και ταυτόχρονα τα AC ρεύματα να βρίσκονται σε φάση με την AC τάση, οπότε ο συντελεστής ισχύος του κινητήριου συστήματος γίνεται μοναδιαίος.



**Σχήμα 29** Τριφασική ενεργός γέφυρα με τρανζίστορ IGBTs.

Για την κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία ενός ενεργού ανορθωτή ακολουθεί το παράδειγμα ενός μονοφασικού PWM μετατροπέα, γιατί ο τριφασικός είναι αρκετά πολυπλοκότερος στην κατανόηση. Η δομή του κυκλώματος ισχύος του μονοφασικού PWM μετατροπέα ισχύος φαίνεται στο σχήμα 30 (α).



**Σχήμα 30** Μονοφασική γέφυρα PWM μετατροπέα. (α) Βασική δομή. (β) Στρεφόμενα διανύσματα AC μεγεθών, ανόρθωση. (γ) Στρεφόμενα διανύσματα AC μεγεθών, αντιστροφή.

Σε κάθε κλάδο διόδου της γνωστής 1Φ γέφυρας συνδέεται και ένα αντιπαράλληλο τρανζίστορ IGBT. Καθοριστικής σημασίας στη λειτουργία της

ενεργού γέφυρας είναι ο μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτής (C) στην έξοδο για να διατηρεί την τάση εξόδου χωρίς κυμάτωση και το πηνίο (X) στην είσοδο για να περιορίζει το λόγο  $di/dt$ . Στα σχήματα 30(b) & 30(c) βλέπουμε τα στρεφόμενα διανύσματα στην AC πλευρά, θεωρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή το ρεύμα και η τάση τροφοδοσίας σε φάση. Η πτώση τάσης στο πηνίο προστίθεται διανυσματικά στην τάση τροφοδοσίας για να προκύψει η τάση στην είσοδο του μετατροπέα. Με κατάλληλη PWM παλμοδότηση των τρανζίστορ της γέφυρας δημιουργούμε την PWM τάση εισόδου  $v_R$ , η οποία έχει θεμελιώδη συνιστώσα με ενεργό τιμή μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας. Οι δύο αυτές διαφορετικές τάσεις επικρατούν στα άκρα του πηνίου, που λειτουργεί σαν αποθήκη ενέργειας. Μια θετική διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου κάνει το ρεύμα να αυξάνεται, ενώ μια αρνητική το κάνει να μειώνεται. Επίσης, ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και σε αντίστροφη διαδικασία, σαν αντιστροφέας DC/AC, αρκεί στη θέση του φορτίου να υπάρχει πηγή συνεχούς τάσης. Η ισχύς της τροφοδοσίας είναι όλη ενεργός ( $I_s$ ,  $V_s$  σε φάση) και ισούται με  $P = V_s I_s$ , ενώ από τα διανυσματικά διαγράμματα προκύπτει :  $X I_s = V_R \sin\delta$  συνεπώς :

$$P = \frac{V_s V_R}{X} \sin\delta$$

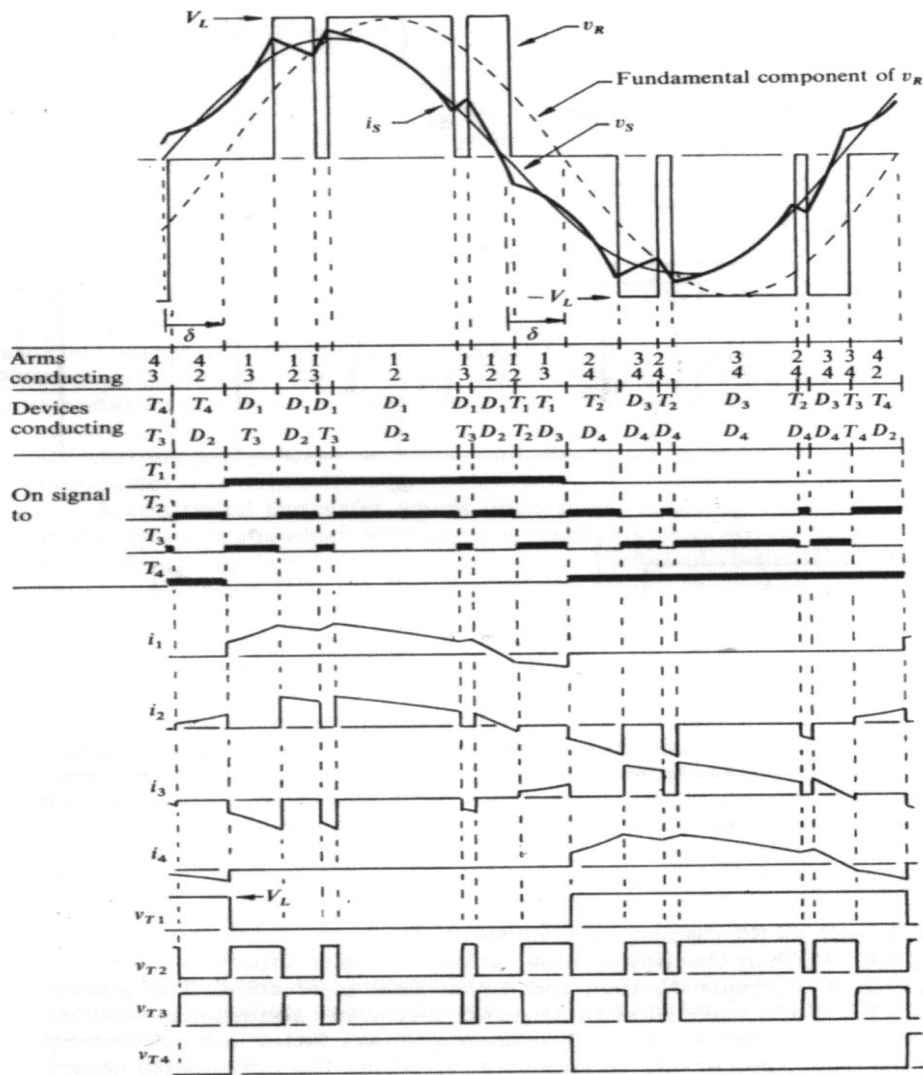
Αν η  $V_R$  καθυστερεί ως προς τη  $V_s$ , τότε η ροή της ισχύος είναι από την AC πηγή προς το DC φορτίο, ενώ αν προηγείται, η ροή ισχύος αντιστρέφεται, δηλαδή από την DC πηγή προς το AC δίκτυο. Να σημειωθεί ότι υποθέσαμε συντελεστή ισχύος μονάδα, ο οποίος όμως μπορεί να αλλάξει σε επαγωγικό (καθυστέρησης), ή χωρητικό (προήγησης), αρκεί να μεγαλώσουμε το μέγεθος της μιας τάσης κρατώντας τη γωνία  $\delta$  σταθερή.

Για να κατανοήσουμε την αρχή λειτουργίας του ενεργού μετατροπέα πρέπει να κατανοήσουμε τις κυματομορφές των τάσεων και ρευμάτων σε διάφορα σημεία του μετατροπέα, που φαίνονται στο σχήμα 31, οι οποίες προκύπτουν από τη διαδοχική αλληλουχία του εύρους των παλμών της διακοπτικής λειτουργίας (PWM) των τεσσάρων IGBTs της γέφυρας. Για λόγους ευκολότερης κατανόησης των διαδικασιών, η κυματομορφή της PWM τάσης εισόδου έχει λίγους παλμούς και συγκεκριμένα τρεις στη θετική ημιπερίοδο και τρεις στην αρνητική. Οι έλεγχοι on & off των τρανζίστορ, που δημιουργούν την PWM  $v_R$  γίνονται με αναφορά την τάση τροφοδοσίας  $V_s$ , αλλά με κάποια καθυστέρηση, έτσι ώστε η θεμελιώδης συνιστώσα της να καθυστερεί κατά γωνία  $\delta$ . Η τάση στην είσοδο του μετατροπέα παίρνει τιμές  $\pm V_L$  ή 0. Στα διαστήματα που η τάση έχει τιμή 0 (βραχυκύκλωμα AC τροφοδοσίας), το ρεύμα ρέει μόνο στο δίκτυο αυξανόμενο, ενώ ο ρυθμός αύξησης ( $di/dt$ ) περιορίζεται και καθορίζεται από την ποσότητα του πηνίου, το οποίο στο διάστημα αυτό αποθηκεύει ενέργεια. Στα διαστήματα που η τάση είναι  $\pm V_L$  το ρεύμα ρέει μειούμενο (εκφόρτιση πηνίου) από το δίκτυο προς τον πυκνωτή μέσω των διαγώνιων ζευγαριών των διόδων, όπως στην κλασική



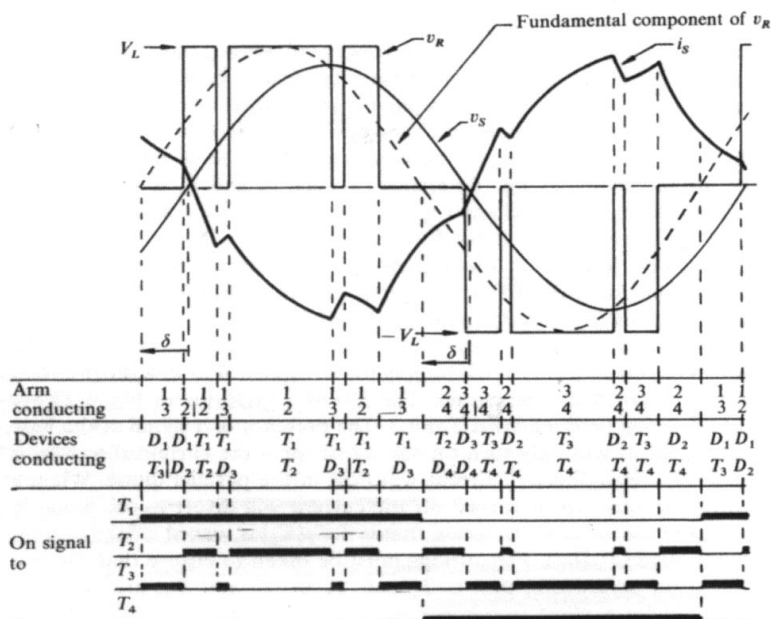
ανορθωτική γέφυρα. Η σύνδεση του παλμού ελέγχου στη πύλη ενός IGBT το ενεργοποιεί μόνο αν το ρεύμα έχει κατάλληλη φορά (από συλλέκτη προς εκπομπό), διαφορετικά ρέει από την αντιπαράλληλη δίοδο. Όταν το ρεύμα που περνά από ένα τρανζίστορ διακόπτεται τότε αυτό εκτρέπεται στη δίοδο του άλλου μισού του ίδιου κλάδου (π.χ. από  $T_3$  σε  $D_2$  κτλ). Προφανώς η ταυτόχρονη παλμοδότηση των τρανζίστορ του ίδιου κλάδου ( $T_1$  &  $T_4$  ή  $T_3$  &  $T_2$ ) προξενεί βραχυκύκλωμα του πυκνωτή και καταστροφή.

Η παρατήρηση των AC κυματομορφών στο σχήμα 31 δείχνει ότι το AC ρεύμα είναι σχεδόν ημιτονοειδές και σε φάση με την τάση τροφοδοσίας. Στην πράξη τα τρανζίστορ ενεργοποιούνται πολύ περισσότερες φορές, έτσι ώστε να δημιουργείται μια PWM κυματομορφή με πολύ περισσότερες on/off περιόδους, με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει καλύτερο ημίτονο με μικρή αρμονικά συχνότητα κυμάτωσης. Τυπικά μια συχνότητα διαμόρφωσης 3 kHz δίνει 60 βήματα (παλμούς) σε μία περίοδο AC τάσης 50 Hz.



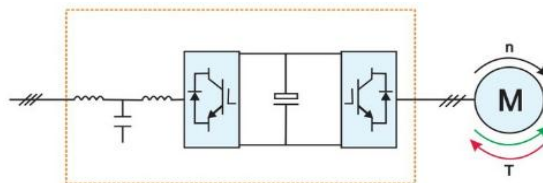
Σχήμα 31 Κυματομορφές μονοφασικής γέφυρας PWM μετατροπέα, κατάσταση ανόρθωσης.

Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε κατάσταση αντιστροφής, δηλαδή η ισχύς ρέει από την DC πλευρά προς την AC, η παλμοδότηση των IGBTs πρέπει να είναι τέτοια ώστε η γωνία  $\delta$ , με άλλα λόγια η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εισόδου, να προπορεύεται της τάσης δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 32. Οι παλμοσειρές ενεργοποίησης των τεσσάρων IGBTs συσχετιζόμενες χρονικά είναι ταυτόσημες και κατά την ανόρθωση και κατά την αντιστροφή. Η λειτουργική διαφοροποίηση προκύπτει από το πότε συμβαίνουν σε σχέση με την τάση δικτύου. Προσεκτική παρατήρηση των παλμοσειρών οδήγησε των 4 IGBTs στα σχήματα 31 και 32 δείχνει ότι οι παλμοσειρές κατά την αντιστροφή είναι ίδιες, όπως στην ανόρθωση, αλλά προηγούνται (σε σχέση με την ανόρθωση) σε χρόνο που αντιστοιχεί σε γωνία  $2\delta$ . Ένα παράδειγμα θα ξεκαθαρίσει πλήρως τη λειτουργική διαφοροποίηση του μετατροπέα. Στο διάστημα γύρω από την κορυφή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εισόδου (το μέσο της θετικής ημιπεριόδου της PWM τάσης) παλμοδοτούνται τα τρανζίστορ  $T_1$  και  $T_2$  και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Κατά την ανόρθωση όμως δεν ενεργοποιούνται αυτά τα τρανζίστορ, γιατί σε αυτό το διάστημα το ρεύμα ρέει από το πηνίο με μεγαλύτερο δυναμικό προς το + του πυκνωτή με μικρότερο δυναμικό μέσω των διόδων  $D_1$  και  $D_2$ , οπότε το πηνίο εκφορτίζεται. Σε λειτουργία αντιστροφής τα  $T_1, T_2$  ενεργοποιούνται γιατί τότε το δυναμικό στο θετικό ακροδέκτη του πυκνωτή είναι μεγαλύτερο από το άκρο του πηνίου, οπότε το ρεύμα ρέει σε αντίθετη κατεύθυνση μέσω των τρανζίστορ  $T_1$  και  $T_2$ , φορτίζοντας τώρα το πηνίο. Η ροή της ισχύος καθορίζεται από τη διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος δικτύου. Ροή ισχύος από δίκτυο προς φορτίο (δίκτυο  $\rightarrow$  κινητήρας, κίνηση), διαφορά φάσης  $0^\circ$ , ενώ από φορτίο προς δίκτυο (δίκτυο  $\leftarrow$  γεννήτρια, αναγεννητική πέδηση, (regenerative breaking)) διαφορά φάσης  $180^\circ$ .



Σχήμα 32 Κυματομορφές μονοφασικής γέφυρας PWM μετατροπέα, κατάσταση αντιστροφής.

Στο σχήμα 33 φαίνονται το μονογραμμικό κύκλωμα ισχύος ενός ρυθμιστή στροφών με ενεργή ανόρθωση. Στη είσοδο (AC/DC) και στη θέση της τριφασικής γέφυρας διόδων υπάρχει τριφασική γέφυρα με IGBT, πανομοιότυπη με αυτή που υπάρχει στην έξοδο (DC/AC). Επί πλέον φαίνεται το LCL φίλτρο που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία αυτού του τύπου ρυθμιστή στροφών. Η λειτουργία του κινητήριου συστήματος μπορεί τώρα να είναι αμφίδρομη. Όταν η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας, τότε η ηλεκτρική ισχύς ρέει από το δίκτυο προ τον κινητήρα μετατρέπόμενη σε μηχανική. Όταν όμως χρειάζεται πέδηση του συστήματος, τότε η μηχανική ισχύς (κινητική ή δυναμική) αλλάζει τη λειτουργία της μηχανής σε γεννήτρια, οπότε η ροπή αντιτίθεται στην κίνηση του άξονα. Η πέδηση αυτή είναι ωφέλιμη με αποτέλεσμα σημαντικά ποσά εξοικονόμησης ενέργειας.



**Σχήμα 33** Χονδρικό διάγραμμα δομής τριφασικού ρυθμιστή στροφών με ενεργή ανόρθωση.

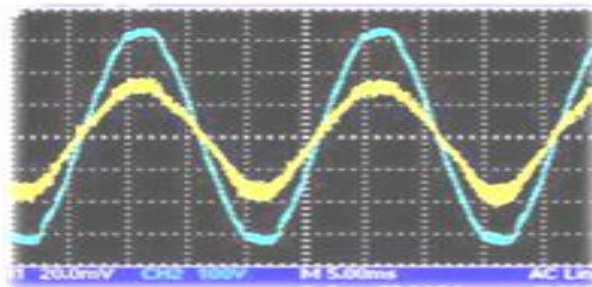
#### Πλεονεκτήματα

- Συντελεστής ισχύος 1
- Σύστημα 4 τεταρτημορίων

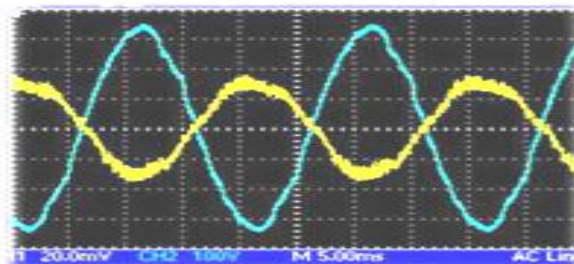
#### Μειονεκτήματα

- Πολύ αυξημένο κόστος

**Μείωση TDD = 3 - 5 % . Αύξηση κόστους άνω του 100 % προς στάνταρ VFD.**



**Σχήμα 34** Παλμογραφήματα δικτύου. Τάση - Ρεύμα σε φάση,  $PF=1$ . Ανόρθωση, κινητήρας.



**Σχήμα 35** Παλμογραφήματα δικτύου. Τάση - Ρεύμα σε αντίθετη φάση,  $PF=1$ . Αντιστροφή, γεννήτρια, ωφέλιμη ηλεκτρική πέδηση.

## Κανονισμοί & Πρότυπα

Στις βιομηχανικά προηγμένες χώρες του κόσμου υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί και πρότυπα, που εξετάζουν με λεπτομερή τρόπο τις αρμονικές και τα προβλήματα που δημιουργούν και συνιστούν πρακτικές για την επίλυση των προβλημάτων αυτών. Υπάρχουν μάλιστα και εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που επιβάλουν στους πελάτες τους ποινές μη συμμόρφωσης προς τους κανονισμούς. Στη χώρα μας δεν υπάρχει ακόμα κάποιος αντίστοιχος κανονισμός του ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) και για τον λόγο αυτό υπάρχει ανυπαρξία ελληνικής τεχνικής ορολογίας γύρω από τις αρμονικές, τα προβλήματα και την επίλυση αυτών. Η ΔΕΗ εξετάζει τα προβλήματα των αρμονικών στα δίκτυα περιστασιακά και μόνο αν υπάρχουν παράπονα πελατών της για κακή ποιότητα της τάσης.

Στη συνέχεια παραθέτουμε δύο πίνακες για τα όρια παραμόρφωσης τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης και παραμόρφωσης ρεύματος στα δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης του προτύπου IEEE-519. Το στάνταρ IEEE-519, με τελευταία αναθεώρηση το 2014, είναι ένας κανονισμός 100 σελίδων, που εφαρμόζεται στη Βόρεια Αμερική, και λίγο πολύ αποτελεί τη βάση για τους κανονισμούς διαφόρων χωρών παγκοσμίως.

Στο σχήμα 36 προσδιορίζονται με λεπτομέρεια το βάθος και η επιφάνεια των εγχοπών τάσης (notch), του πίνακα 10.2 του προτύπου IEEE-519.

**Table 10.2, p77**  
**Low-Voltage System Classification and Distortion Limits**

	Special Applications <sup>1</sup>	General System	Dedicated System <sup>2</sup>
Notch Depth	10%	20%	50%
<b>THD (voltage)</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>	10%
Notch Area (A <sub>N</sub> ) <sup>3</sup>	16 400	22 800	36 500

NOTE: The Value A<sub>N</sub> for other than 480 V systems should be multiplied by V/480

- <sup>1</sup> **Special applications include hospitals and airports**
- <sup>2</sup> A dedicated system is exclusively dedicated to the converter load
- <sup>3</sup> In volt-microseconds at rated voltage and current

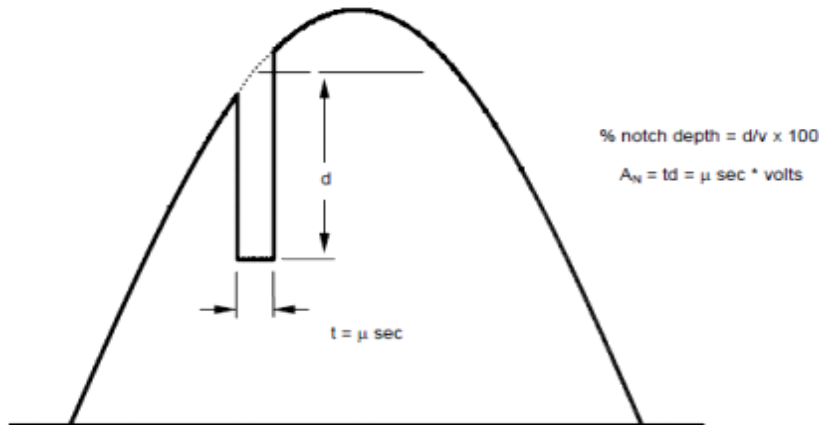
**Table 10.3, p78**  
**Current Distortion Limits for General Distribution Systems**  
 (120 V Through 69,000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I <sub>L</sub>						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Where:

I<sub>sc</sub> = maximum short-circuit current at PCC.

I<sub>L</sub> = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.



**Σχήμα 36** Παραμορφωμένη ημιτονοειδής τάση (Notching voltage) .

## ΑΓΓΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

AC	Alternating Current
AFD	Adjustable Frequency Drive
AFE	Active Front End
AHF	Active Harmonic Filter
BJT	Bipolar Junction Transistor
CT	Current Transformer
DC	Direct Current
DFE	Diode Front End
EMC	Electro-Magnetic Compatibility
EMI	Electro-Magnetic Interference
HMT	Harmonic Mitigating Transformer
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
$I_L$	$I_{LOAD}$
$I_{sc}$	$I_{SHORT\ CIRCUIT}$
LV	Low Voltage
MCC	Motor Control Center
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field – Effect Transistor
MV	Medium Voltage
PCC	Point Common Coupling
PF	Power Factor
$PF_{DISP}$	$PF_{DISPLACEMENT}$
$PF_{DIST}$	$PF_{DISTORTION}$
PQ	Power Quality
PQF	Power Quality Filter
PWM	Pulse Width Modulation
RFI	Radio Frequency Interference
RMS	Root Mean Square
SMPS	Switched Mode Power Supply
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
Std	Standard
TDD	Total Demand Distortion
$THD_I$	Total Harmonic Distortion (current)
$THD_V$	Total Harmonic Distortion (voltage)
UPS	Uninterruptible Power Supply
VFD	Variable Frequency Drive
VSD	Variable Speed Drive
VT	Voltage Transformer