



**Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΥΝΗΜΙΤΟΝΟΥ  
ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

ΚΑΡΑΒΙΔΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ | ΑΓΓΕΛΟΣ ΣΥΡΜΟΣ  
Α.Μ.: 32773 | Α.Μ.: 31208

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ ΗΡΑΚΛΗΣ

**2013**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	1
	ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
<b>1</b>	<b>ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b><u>Εισαγωγικά στοιχεία</u>.....</b>	<b>3</b>
1.1.1	Αρμονική παραμόρφωση.....	3
1.1.2	Αρμονικές και μεταβατικά.....	4
1.1.3	Συντελεστής ισχύος.....	8
1.1.4	Αρμονική ακολουθία.....	9
1.1.5	Προβλήματα του χαμηλού συντελεστή ισχύος.....	10
1.1.6	Φαινόμενη ισχύς μετασηματιστή.....	12
1.1.7	Διόρθωση του συντελεστή ισχύος.....	13
1.1.8	Αντιστάθμιση αέργου ισχύος.....	14
1.1.9	Αυτόματες συστοιχίες πυκνωτών.....	17
1.1.10	Διόρθωση του συντελεστή ισχύος με μη συντονιζόμενα φίλτρα (detuning filters).....	18
<b>1.2</b>	<b><u>Αρμονικές</u>.....</b>	<b>21</b>
1.2.1	Πηγές αρμονικών.....	21
1.2.2	Συνέπειες από την δημιουργία των αρμονικών.....	25
1.2.3	Αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούν οι αρμονικές.....	27
<b>1.3</b>	<b><u>Τηλεπικοινωνίες και συσκευές διόρθωσης συνημιτόνου</u>.....</b>	<b>31</b>
<b>1.4</b>	<b><u>Σύγκριση διατάξεων διόρθωσης συντελεστή ισχύος</u>.....</b>	<b>35</b>
<b>2</b>	<b>ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1</b>	<b><u>Αποθήκευση ενέργειας σήμερα</u>.....</b>	<b>37</b>
2.1.1	Τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ισχύος.....	38
2.1.2	Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή – Τεχνολογία μπαταριών.....	40
2.1.3	Μηχανικά συστήματα (σφόνδυλοι).....	52
2.1.4	Οι υπερπυκνωτές.....	54
<b>2.2</b>	<b><u>Ανανεώσιμες πηγές και αποθήκευση ενέργειας</u>.....</b>	<b>58</b>
2.2.1	Αιολική ενέργεια.....	59
2.2.2	Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή υδρογόνου – Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.....	63
2.2.3	Αποθήκευση ενέργειας και προϊόντα στις τηλεπικοινωνίες.....	67
<b>3</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>70</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρακάτω πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται πώς μπορεί να γίνει η διόρθωση συνημιτόνου στις τηλεπικοινωνίες και με ποιες συσκευές ολοκληρώνεται ακόμα γίνεται περιγραφή των τρόπων αποθήκευσης ενέργειας στις μέρες μας.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** της πτυχιακής εργασίας δίνονται οι βασικοί ορισμοί ισχύος, αναφερόμαστε στην αντιστάθμιση της αέργου ισχύος και τις σχετικές διατάξεις που επιτελούν αυτήν, στις πηγές αρμονικών ,στις συνέπειες από την δημιουργία τους και στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούν. Ακόμα παρουσιάζονται συσκευές διόρθωσης συνημιτόνου στις Τηλεπικοινωνίες.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μία περιγραφή τρόπων αποθήκευσης ενέργειας. Παρουσιάζονται τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ισχύος, μπαταρίες, μηχανικά συστήματα (σφόνδυλοι), υπερπυκνωτές και αποθήκευση ενέργειας με Ανανεώσιμες πηγές.

# Κεφάλαιο 1 Βελτίωση Συντελεστή Ισχύος

## 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

### 1.1.1 Αρμονική παραμόρφωση

Στα συστήματα ισχύος η αρμονική παραμόρφωση προκαλείται από μη γραμμικές διατάξεις. Σε μια μη γραμμική διάταξη ισχύει κατά ορισμό ότι το διαρρέομενο σε αυτή ρεύμα δεν είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την ως άνω αναφερθείσα αρχή, όπου μια ημιτονοειδής τάση εφαρμόζεται σε μια μη γραμμική αντίσταση. Ενώ η εφαρμοζόμενη είναι ένα τέλειο ημίτονο, το προκύπτον ρεύμα είναι παραμορφωμένο. Αυξάνοντας την τάση, το ρεύμα μεταβάλλεται δυσανάλογα ή ακόμα μπορεί να λάβει μια διαφορετική κυματομορφή. Αυτό αποτελεί μια συνήθη πηγή αρμονικής παραμόρφωσης σε ένα σύστημα ισχύος.

Κάθε περιοδική (όμοια από κύκλο σε κύκλο) παραμορφωμένη κυματομορφή, χρησιμοποιώντας ανάλυση Fourier μπορεί να αναπαρασταθεί ως το άθροισμα μιας θεμελιώδους συχνότητας και ενός αριθμού αρμονικών. Έτσι, κάνοντας χρήση των συνηθισμένων μεθόδων υπολογισμού που έχουν αναπτυχθεί για καθαρά ημιτονοειδείς κυματομορφές, μπορούμε να αναλύσουμε παραμορφωμένες μη ημιτονοειδείς κυματομορφές. Με τον τρόπο αυτόν το σύστημα αναλύεται για κάθε αρμονική ξεχωριστά και το τελικό αποτέλεσμα λαμβάνεται από την υπέρθεση των ξεχωριστών αποκρίσεων για κάθε αρμονική. Όταν η θετική και η αρνητική ημιπερίοδος μιας κυματομορφής έχουν όμοια σχήματα, τότε η προκύπτουσα σειρά Fourier περιέχει μόνο περιττές αρμονικές. Αυτό το γεγονός απλουστεύει την ανάλυση των περισσότερων συστημάτων ισχύος επειδή οι περισσότερες διατάξεις που παράγουν αρμονικές έχουν όμοια θετικά και αρνητικά ημικύκλια. Συνήθως στην ανάλυση ενός συστήματος ισχύος η ύπαρξη άρτιων αρμονικών αποτελεί ένδειξη λάθους είτε με το φορτίο ή με τον μετρητικό αισθητήρα που χρησιμοποιείται στο σύστημα (εξαιρέσεις αποτελούν οι ημιανορθώσεις και οι φούρνοι εκκένωσης).

Σύμφωνα με το IEEE (Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών – Institute of Electrical and Electronics Engineers) ορίζονται δύο τύποι αρμονικών:

- Οι χαρακτηριστικές αρμονικές, που είναι της τάξεως ακεραίου πολλαπλασίου της θεμελιώδους συχνότητας.
- Οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές, που είναι της τάξεως μη ακεραίου πολλαπλασίου της θεμελιώδους συχνότητας. Αυτές χωρίζονται σε υποαρμονικές (subharmonics) που έχουν μικρότερη συχνότητα από την θεμελιώδη και σε ενδοαρμονικές (interharmonics) που οι

συχνότητες αυτών βρίσκονται μεταξύ των συχνοτήτων των χαρακτηριστικών αρμονικών.

Οι χαρακτηριστικές αρμονικές είναι οι συμβατικές αρμονικές που παράγονται από ημιαγωγικές διατάξεις ισχύος κατά την διάρκεια της συνήθους λειτουργίας, ενώ οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές αποτελούν προϊόντα ανωμάλου λειτουργίας και προκαλούνται από συχνότητες συμβολής (beat frequencies) και από ασυμμετρία του δικτύου παροχής ισχύος. Οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές παράγονται επίσης από κυκλομετατροπείς κατά την διάρκεια της συνήθους λειτουργίας τους.

Πάντως, άσχετα από τον τύπο τους, οι αρμονικές δημιουργούν προβλήματα στις ηλεκτρικές διατάξεις και πρέπει να περιορίζονται στο μέγιστο δυνατό.

### **1.1.2 Αρμονικές και μεταβατικά**

Πολλές φορές η αρμονική παραμόρφωση κατηγορείται για διαταραχές στην ποιότητα ισχύος ενώ στην πραγματικότητα μεταβατικά φαινόμενα ευθύνονται για αυτές τις διαταραχές. Αν και οι μεταβατικές διαταραχές προκαλούν την εμφάνιση υψηλών συχνοτήτων, τα μεταβατικά και οι αρμονικές αποτελούν ξεχωριστά φαινόμενα και πρέπει να αναλύονται ξεχωριστά. Τα μεταβατικά εμφανίζουν υψηλές συχνότητες μόνο για ελάχιστο χρόνο και ύστερα από μια απότομη αλλαγή στο σύστημα ισχύος. Αυτές οι συχνότητες είναι φυσικές συχνότητες του συστήματος, δεν έχουν σχέση με την θεμελιώδη συχνότητα, οφείλονται στο μεταβατικό φαινόμενο και δεν είναι αρμονικές. Εν αντιθέσει, οι αρμονικές έχουν διαρκή παρουσία στο σύστημα και υπάρχουν κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Έτσι, όταν εκτιμούμε δια μετρήσεων την ύπαρξη αρμονικών στο σύστημα, πρέπει να μη συντρέχουν ταυτόχρονα μεταβατικές καταστάσεις στο σύστημα, οι οποίες θα μας οδηγήσουν σε λάθος εκτιμήσεις.

### **Ενεργός ισχύς**

Η ενεργός ισχύς  $P$  συνήθίζεται να αναφέρεται ως μέση ισχύς και ως πραγματική (average or real power). Αντιπροσωπεύει την χρήσιμη ισχύ που πραγματικά καταναλώνεται από τα φορτία για να εκτελέσουν κάποιο έργο, όπως για να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε άλλη μορφή ενέργειας, κινητική, θερμική κλπ. Έτσι για παράδειγμα ενεργός ισχύς καταναλώνεται από έναν λαμπτήρα πυράκτωσης για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή και θερμική ενέργεια. Σε μεγέθη ηλεκτρικής ισχύος, πραγματική ισχύς καταναλώνεται για το ποσοστό του ρεύματος φορτίου που είναι συμφασικό με την τάση του δικτύου. Κάτω από ημιτονοειδείς συνθήκες ισχύει:

$$P = \sqrt{3}V_{1RMS}I_{1RMS} \cos \phi_1 = S \cos \phi_1 \quad (\text{Watt}) \quad (1)$$

όπου  $\phi_1$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος στην θεμελιώδη συχνότητα.

### Η φύση της αέργου ισχύος

Οι ηλεκτρομαγνητικές μηχανές επαγωγής που λειτουργούν σε ένα δίκτυο ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις γεννήτριες σε μηχανικό έργο και θερμότητα. Προκειμένου να επιτελεστεί η μετατροπή αυτή, μαγνητικά πεδία πρέπει να αναπτυχθούν στις μηχανές αυτές και αυτά τα πεδία σχετίζονται με μια μορφή ενέργειας που την ονομάζουμε άεργο. Για τον ίδιο λόγο ένα κύκλωμα επαγωγικής συμπεριφοράς απορροφά ενέργεια από το σύστημα κατά την διάρκεια ανάπτυξης του μαγνητικού του πεδίου και επανατροφοδοτεί το σύστημα κατά την διάρκεια κατάρρευσης του μαγνητικού του πεδίου. Παρόμοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα και με τα χωρητικής συμπεριφοράς φορτία του συστήματος, όπως είναι οι χωρητικότητες των καλωδίων και οι πυκνωτές διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Στην περίπτωση αυτή έχουμε αποθήκευση ενέργειας υπό ηλεκτροστατική μορφή. Η κυκλική φόρτιση και εκφόρτιση των χωρητικών κυκλωμάτων γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό των επαγωγικών κυκλωμάτων αλλά με ρεύματα αντιθέτου φάσεως.

Αν και τα άεργα ρεύματα δεν καταναλώνουν ενέργεια από το σύστημα ισχύος, προκαλούν εντούτοις απώλειες ισχύος κατά την κυκλοφορία τους στα συστήματα διανομής ενέργειας δια της θερμάνσεως των ηλεκτρικών καλωδίων. Στα πρακτικά συστήματα ενέργειας κυκλοφορούν επαγωγικά ρεύματα (λόγω της συνήθους επαγωγικής φύσεως των φορτίων) διαμέσου επαγωγικών στοιχείων του συστήματος διανομής (λόγω της επαγωγικής φύσεως των καλωδίων). Ο παραπάνω συνδυασμός δημιουργεί προβλήματα όπως πτώσεις τάσεως και συνεπώς η κυκλοφορία αέργων επαγωγικών ρευμάτων απαιτείται να περιορίζεται στο μέγιστο δυνατό από τις εταιρείες παροχής ενέργειας. Κάτω από ημιτονοειδείς συνθήκες ισχύει:

$$Q = \sqrt{3}V_{1RMS}I_{1RMS} \sin \phi_1 = S \sin \phi_1 \quad (\text{Var}) \quad (2)$$

όπου  $\phi_1$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος στην θεμελιώδη συχνότητα.

### Σχέσεις ισχύος κάτω από ημιτονοειδείς και μη συνθήκες

Υπάρχουν τρεις βασικές ποσότητες που σχετίζονται με την ισχύ:

- Φαινόμενη ισχύς (VA): το γινόμενο των ενεργών τιμών τάσης και ρεύματος.
- Ενεργός ισχύς (W): ο μέσος ρυθμός απόδοσης της ενέργειας.
- Άεργος ισχύς (Var): το κλάσμα της φαινομένου ισχύος το οποίο είναι εκτός φάσης ή ορθογώνια συνιστώσα ως προς την ενεργό ισχύ της φαινομένου ισχύος.

Η φαινόμενη ισχύς αποτελεί μέτρο επιβάρυνσης των φορτίων στην θερμική ικανότητα του συστήματος. Το ύψος της φαινομένου ισχύος που απαιτεί κάποιο φορτίο διαστασιολογεί ανάλογα και την ικανότητα, το μέγεθος του συστήματος ισχύος που το τροφοδοτεί. Η σχέση της φαινομένου ισχύος για ημιτονοειδείς και μη συνθήκες είναι η εξής:

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3)$$

όπου  $V_{RMS}$  και  $I_{RMS}$  είναι η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα.

Κάτω από μη ημιτονοειδείς συνθήκες, μια αρμονικά παραμορφωμένη κυματομορφή συνίσταται από το άθροισμα ημιτόνων διαφόρων αρμονικών συχνοτήτων με διαφορετικά πλάτη. Η ενεργός τιμή του ρεύματος και της τάσης μιας τέτοιας κυματομορφής δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} V_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{\max}}^2} \quad (4)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} I_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{\max}}^2} \quad (5)$$

Κάτω από ημιτονοειδείς συνθήκες όπου δεν υπάρχουν αρμονικές έχουμε:

$$V_{RMS} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} \quad (6) \quad \text{και} \quad I_{RMS} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Η ενεργός ισχύς όπως προείπαμε αντιπροσωπεύει την πραγματική ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία και εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται η ενέργεια:

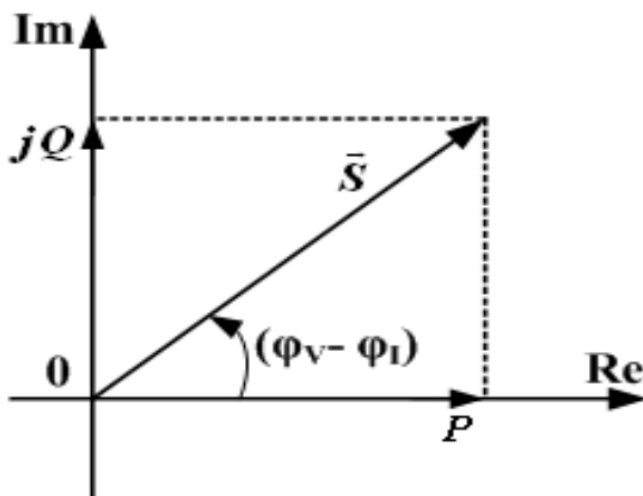
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (8)$$

$$P = P_{1,avg} + P_{2,avg} + P_{3,avg} + \dots \quad (9)$$

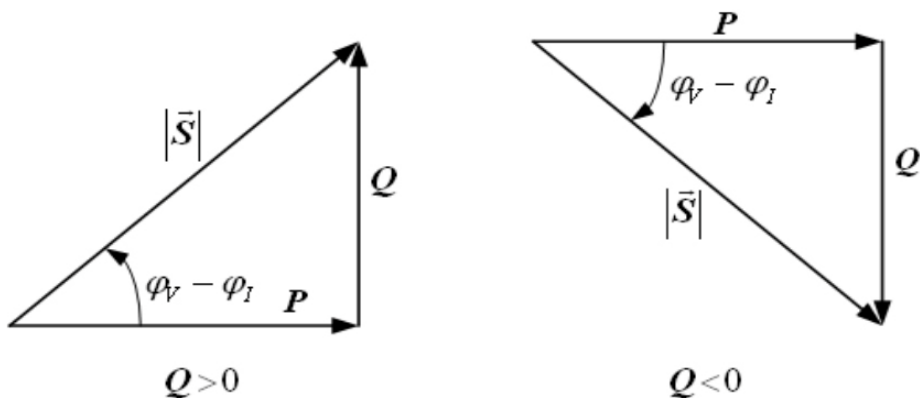
Οι συνιστώσες  $P_{2,avg}$ ,  $P_{3,avg}$  κ.λπ. είναι η συνεισφορά των αρμονικών στην ενεργό ισχύ.

Όταν το ρεύμα ενός φορτίου περιέχει και ανεπιθύμητες αρμονικές συνιστώσες, τότε η φαινόμενη ισχύς αποτελείται από τρεις συνιστώσες ισχύος και συγκεκριμένα από την ενεργό ισχύ  $P$ , την άεργο ισχύ  $Q$  και από τη συνιστώσα που προκύπτει από τις ανεπιθύμητες αρμονικές συνιστώσες,  $D$ .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (10)$$



Σχήμα 1α: Τρίγωνο ισχύος



Σχήμα 1β: Τρίγωνο ισχύος για επαγωγικό ( $Q > 0$ ) και χωρητικό ( $Q < 0$ ) φορτίο.



### 1.1.3 Συντελεστής ισχύος

Σε ημιτονοειδείς συνθήκες, ο πραγματικός συντελεστής ισχύος ισούται με τον συντελεστή ισχύος μετατόπισης:

$$PF_{true} = \frac{P_{avg}}{V_{RMS} I_{RMS}} \quad (11)$$

$$dPF_1 = \frac{P_{1,avg}}{V_{1,RMS} I_{1,RMS}} = \frac{\left(\frac{V_1 I_1}{2}\right) \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\left(\frac{V_1 I_1}{2}\right)} = \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (12)$$

Όταν υπάρχουν αρμονικές τότε έχουμε :

$$PF_{true} = \frac{P_{1,avg} + P_{2,avg} + P_{3,avg} + \dots}{V_{1,RMS} \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot I_{1,RMS} \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (13)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ισχύς που φέρουν οι αρμονικές είναι πολύ μικρή εν συγκρίσει με αυτή της θεμελιώδους όποτε έχουμε  $P = P_{1,avg}$  και επίσης επειδή η αρμονική παραμόρφωση της τάσης είναι μικρότερη από 10% έχουμε :

$$PF_{true} = \frac{P_{1,avg}}{V_{1,RMS} I_{1,RMS} \sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{dPF_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (14)$$

$$PF_{true} = dPF_{disp} \cdot PF_{dist} \quad (15)$$

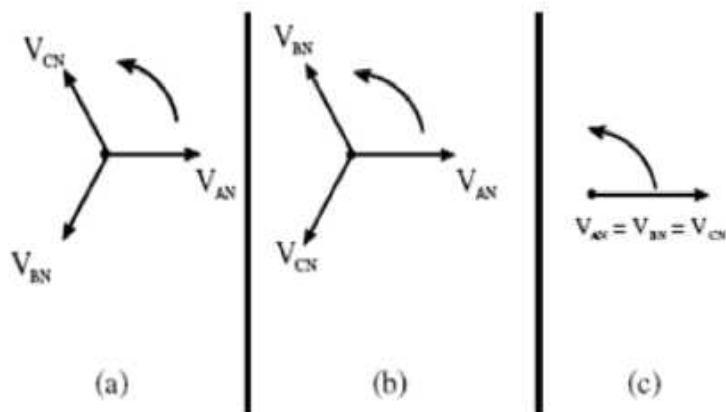
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ισχύος δεν εξαρτάται μόνο από τον συντελεστή μετατόπισης dPF (δηλ.  $\cos\phi$  όπως είναι για τα γραμμικά φορτία) αλλά εξαρτάται και από έναν άλλο συντελεστή, ο οποίος ονομάζεται συντελεστής παραμόρφωσης  $PF_{dist}$  που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (16)$$

Ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ορίζεται ως το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος. Εναλλακτικά ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού ισχύος προς την φαινόμενη ισχύ.

### 1.1.4 Αρμονική ακολουθία

Σε ένα τριφασικό σύστημα η περιστροφή των φασόρων παρουσιάζει ABC διαδοχή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2: Αρμονική ακολουθία (α) Θετική (β) Αρνητική (γ) Μηδενική

Καθώς οι φάσορες περιστρέφονται, η φάση A περνάει από τον άξονα και ακολουθείται από τις φάσεις B και C. Η ABC διαδοχή ( $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$ ) θεωρείται ως θετική ακολουθία (Σχήμα 2.α). Αν η φάση A ακολουθηθεί από την φάση C και μετά από την φάση B, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.β, τότε έχουμε την ACB ( $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ ), η οποία θεωρείται αρνητική ακολουθία. Τέλος, αν έχουμε τους τρεις φάσορες συμφασικούς μεταξύ τους έχουμε την μηδενική ακολουθία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.γ.

Σε ένα τέλεια ισοσταθμισμένο τριφασικό σύστημα η φασική ακολουθία της κάθε αρμονικής μπορεί να προσδιοριστεί αν πολλαπλασιάσουμε τον αριθμό της αρμονικής h με την κανονική θετικής ακολουθίας φασική περιστροφή. Έτσι για παράδειγμα για την δεύτερη και τρίτη αρμονική έχουμε:

$$\begin{aligned}
 h = 2, \quad 2 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) &\rightarrow (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ) && \text{αρνητική ακολουθία} \\
 h = 3, \quad 2 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) &\rightarrow (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ) && \text{θετική ακολουθία}
 \end{aligned}$$

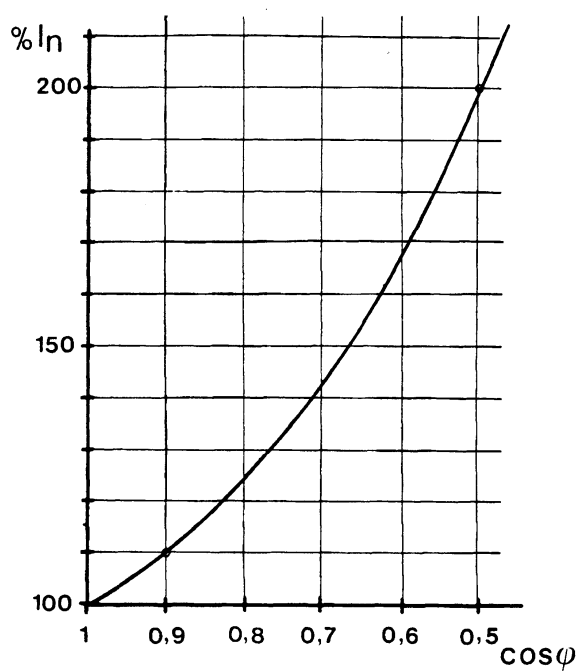
Επειδή μια παραμορφωμένη κυματομορφή στα συστήματα ισχύος περιέχει μόνο περιττές συνιστώσες αρμονικών έχουμε για:

- $h = 1, 7, 13 \dots$  θετικής ακολουθίας αρμονικές
- $h = 5, 11, 17 \dots$  αρνητικής ακολουθίας αρμονικές
- $h = 3, 9, 15 \dots$  τριπλές (μηδενικής) ακολουθίας αρμονικές

### 1.1.5 Προβλήματα του χαμηλού συντελεστή ισχύος

Για σταθερή ωφέλιμη ισχύ όσο πιο χαμηλός είναι ο συντελεστής ισχύος τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη φαινόμενη ισχύς και συνεπώς τόσο μεγαλύτερο είναι το απορροφούμενο από την εγκατάσταση ρεύμα.

Με συντελεστή ισχύος ίσο με 0,5 το απορροφούμενο από την εγκατάσταση ρεύμα είναι διπλάσιο του πραγματικά ωφέλιμου όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα. Έτσι οι μετασχηματιστές και τα καλώδια διανομής υπερφορτίζονται και οι απώλειές τους αυξάνουν ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος.



Σχήμα 3: Μεταβολή του φαινομένου ρεύματος (ποσοστιαία ως προς το πραγματικό) συναρτήσει του συντελεστή ισχύος.

Τα επακόλουθα του παραπάνω φαινομένου είναι τα εξής:

- ✓ Αύξηση θερμικών απωλειών Joule σε όλα τα καλώδια του συστήματος.

- Καλώδια μεταξύ μετρητή και χρήστη.
- Τυλίγματα μετασχηματιστών διανομής.
- ✓ Αύξηση της πτώσης τάσης με αποτέλεσμα την μη ικανοποιητική τροφοδοσία των καταναλώσεων και κατά συνέπεια την μειωμένη απόδοσή τους.

Η επιπλέον πτώση τάσης δημιουργείται στα καλώδια τροφοδοσίας και στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής.

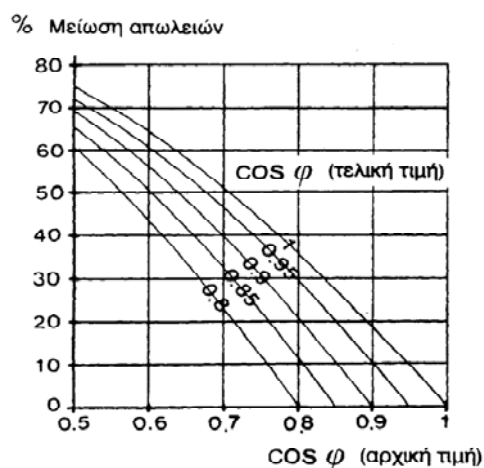
Οι εγκαταστάσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλήρη ικανότητα ισχύος τους με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολλά έτη για την απόσβεσή τους και να γίνεται άσκοπη σπατάλη των φυσικών πόρων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετασχηματιστών διανομής.

Εξαιτίας των παραπάνω προβλημάτων που δημιουργούνται στην παραγωγή (απαίτηση μεγάλων φαινομένων ρευμάτων) και στην διανομή (μεγάλες απώλειες Joule), οι εταιρείες παραγωγής και διανομής ενέργειας επιβάλλουν οικονομικές επιβαρύνσεις στους καταναλωτές με χαμηλό συντελεστή ισχύος.

### Απώλειες καλωδίων

Για δεδομένες διατομές καλωδίων οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος. Βελτιώνοντας τον συντελεστή ισχύος από μια αρχική τιμή  $\cos\phi_1$  σε μια τελική τιμή  $\cos\phi_2$ , οι  $I^2R$  (W) απώλειες μειώνονται κατά τον συντελεστή :

$$\left[ 1 - \left( \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right)^2 \right] \times 100\% \quad (17)$$



Σχήμα 4: Ποσοστιαία μείωση των απωλειών Joule από μια αρχική τιμή  $\cos\phi_1$  σε μια τελική τιμή  $\cos\phi_2$ .

Για δεδομένες διατομές καλωδίων οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος. Βελτιώνοντας τον συντελεστή ισχύος από μια αρχική τιμή  $\cos\phi_1$  σε μια τελική τιμή  $\cos\phi_2$ , οι  $I^2R$  (W) απώλειες μειώνονται κατά τον συντελεστή.

### **Απώλειες μετασχηματιστή**

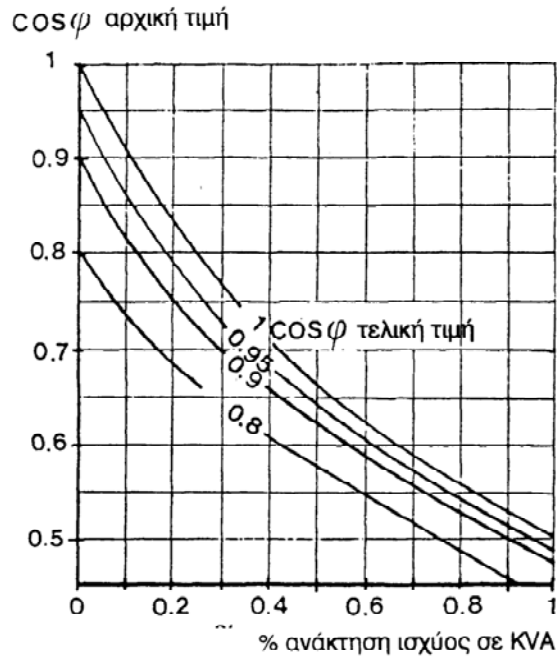
Οι συνολικές απώλειες ισούνται με τις απώλειες σιδήρου συν τις απώλειες χαλκού. Οι απώλειες σιδήρου είναι ίσες με τις απώλειες που καταναλώνονται στον μετασχηματιστή με συνθήκες άνευ φορτίου. Οι απώλειες χαλκού μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος και έτσι συνδέονται άμεσα με τον συντελεστή ισχύος.

#### **1.1.6 Φαινόμενη ισχύς μετασχηματιστή**

Η ονομαστική τιμή ισχύος ενός μετασχηματιστή εκφράζεται σε kVA και είναι η μέγιστη φαινόμενη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο μετασχηματιστής. Η μέγιστη χρησιμοποίηση του M/T γίνεται όταν ο συντελεστής ισχύος πλησιάζει την μονάδα.

Η επιπλέον διαθέσιμη φαινόμενη ισχύς, όταν παραμένει ίδια η ενεργός ισχύς εκφράζεται με τον τύπο:

$$kVA = kW \left[ \frac{1}{\cos\phi_1} + \frac{1}{\cos\phi_2} \right] \quad (18)$$



Σχήμα 5: Ποσοστιαία ανάκτηση φαινομένης ισχύος από μια αρχική τιμή  $\cos\phi_1$  σε μια τελική τιμή  $\cos\phi_2$ .

### 1.1.7 Διόρθωση του συντελεστή ισχύος

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η παραγωγή και μεταφορά ενέργειας να πραγματοποιούνται με τον οικονομικότερο τρόπο. Αυτό κατά βάση σημαίνει ότι πρέπει εκμηδενισθούν όσο είναι δυνατό όλοι οι παράγοντες που προκαλούν απώλειες. Ένας από τους παράγοντες αυτούς είναι η άεργος ισχύς μεταπορείας που προκαλείται στα ηλεκτρικά δίκτυα από την επαγωγική συμπεριφορά των φορτίων.

Σκοπός των συστημάτων διόρθωσης του συντελεστή ισχύος είναι να αντισταθμίσουν την άεργο ισχύ μεταπορείας δια της παραγωγής άεργου ισχύος προπορείας σε συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου. Η απαιτούμενη ισχύς προπορείας παράγεται από πυκνωτές παραλληλισμένους στο δίκτυο τροφοδοσίας και όσο το δυνατό πιο κοντά στο επαγωγικό φορτίο. Έτσι δια της συνδέσεως και αποσυνδέσεως πυκνωτών στο δίκτυο μπορούμε με δυναμικό τρόπο να αντισταθμίζουμε τις μεταβολές της άεργου ισχύος μεταπορείας στο δίκτυο.

Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος προσφέρει συνοπτικά μειωμένες απώλειες μεταφοράς ισχύος, βέλτιστη διαστασιολόγηση καλωδίων και βελτιωμένη ποιότητα τάσης.

### 1.1.8 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος

Η μαγνητική ενέργεια που επιστρέφει στο δίκτυο από τα μη αντισταθμισμένα κυκλώματα μπορεί να αποθηκευτεί προσωρινά στους πυκνωτές αντιστάθμισης. Έτσι στον επόμενο κύκλο ζήτησης αέργου ισχύος από τα επαγωγικά κυκλώματα, η αέργος ισχύς προέρχεται από τους πυκνωτές και όχι από την πηγή του δικτύου. Η απαιτούμενη ποσότητα αέργου ισχύος  $Q_c$  σε Volt-Ampere άεργα (Var) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (19)$$

όπου  $\phi_1$  είναι η γωνία των θεμελιωδών συνιστωσών τάσης και ρεύματος πριν την αντιστάθμιση και  $\phi_2$  είναι η γωνία των θεμελιωδών συνιστωσών τάσης και ρεύματος μετά την αντιστάθμιση. Αν και η ιδανική τιμή του συντελεστή ισχύος είναι  $\cos\phi=1$ , συνήθως για οικονομοτεχνικούς λόγους στοχεύουμε κάποιο συντελεστή ισχύος μεταξύ 0.9 και 1. Για τους πυκνωτές ισχύει:

$$Q_c = V_c \cdot I_c \text{ [Var]} \rightarrow Q_c = \frac{V_c \cdot V_c}{X_c} = \frac{V_c^2}{X_c} \quad (20)$$

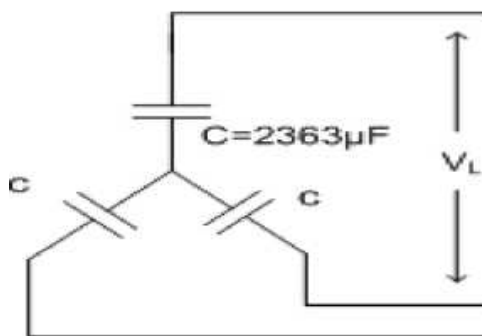
Αν θυμηθούμε όμως ότι:

$$X_c = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot c} \rightarrow Q_c = V_c^2 \cdot \omega \cdot c \rightarrow Q_c = V_c^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot c \quad (21)$$

#### Διάταξη αστέρα

Ο πυκνωτής υπόκειται σε τάση  $V_c / \sqrt{3}$  όπου  $V_c$  η πολική τάση. Έτσι τα ολικά  $K_{var}$  για την αντιστάθμιση υπολογίζονται ως εξής :

$$Q_{TOT} = 3 \frac{V_c^2}{(\sqrt{3})^2} \cdot \omega \cdot c \rightarrow C_{αστέρα} = \frac{Q_{TOT}}{U_c^2 \omega} = \frac{Q_{TOT}}{U_c^2 \cdot 2\pi \cdot f} \quad (22)$$



Σχήμα 6: Διάταξη αστέρα.

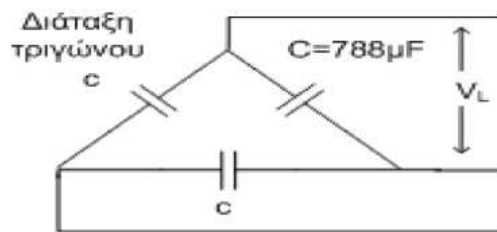
### Διάταξη τριγώνου

Στην περίπτωση της συνδεσμολογίας τριγώνου, ο πυκνωτής υπόκειται σε πολική τάση  $V_c$ . Συνεπώς, τα ολικά  $K_{var}$  για την αντιστάθμιση είναι:

$$Q_{TOT} = 3.V_l^2 \cdot \omega \cdot C \quad (23)$$

Οπότε:

$$C_{\text{τριγώνου}} = \frac{Q_{TOT}}{3 \cdot (U_c)^2 \omega} = \frac{Q_{TOT}}{3 \cdot (U_c)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \rightarrow C_{\text{τριγώνου}} = \frac{C_{\text{αστέρα}}}{3} \quad (24)$$



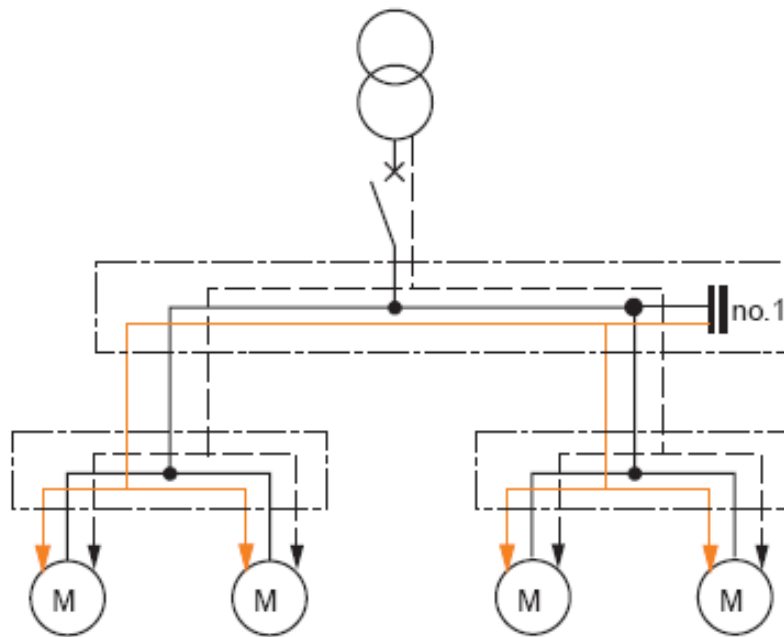
Σχήμα 7: Διάταξη τριγώνου

### Είδη αντιστάθμισης (ως προς το σημείο αντιστάθμισης)

Υπάρχουν τέσσερις τρόποι αντιστάθμισης ως προς το σημείο που επιλέγεται για να γίνει η αντιστάθμιση της αέργου ισχύος. Η αντιστάθμιση σε γενικές γραμμές μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τερματικά σημεία, στην αρχή ή στο τέλος παροχής ηλεκτρικού ρεύματος ή ακόμη και στα καλώδια σε μία βιομηχανία, ενδιάμεσα δηλαδή στην παροχή του ρεύματος, σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι από το κανάλι, το περιβάλλον ή από ορισμένα τερματικά που ενδιάμεσα συνδέονται στο δίκτυο ή ακόμη και από υπερβολικό μήκος καλωδίων, παράγεται σε αυτές τις διαδρομές άεργη ισχύς. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των γνωστότερων τρόπων αντιστάθμισης σε συγκεκριμένα σημεία.

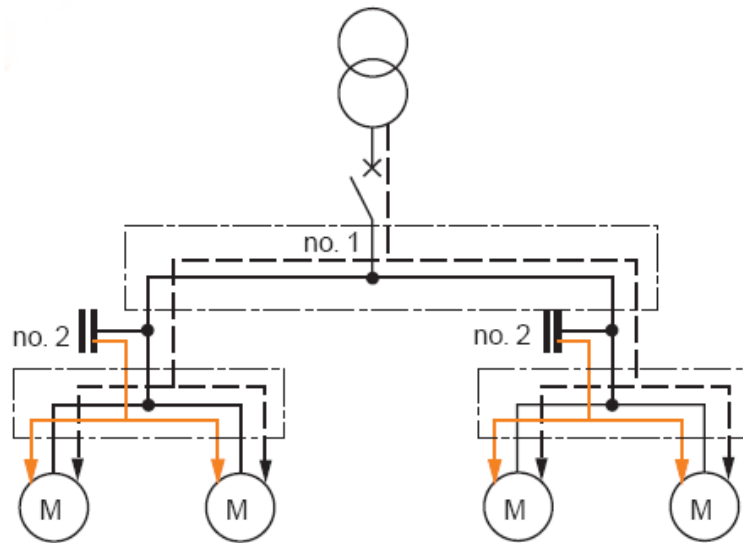
Σε πρώτη φάση, γνωστή είναι η **κεντρική αντιστάθμιση**. Η αντιστάθμιση ισχύος γίνεται σε κάποιο κεντρικό σημείο της εγκατάστασης όπως στο πρωτεύον ή το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσης τάσης. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι ότι μπορεί να εφαρμοσθεί κεντρικός έλεγχος μέσω κάποιου επιτηρητή και ελεγκτή αέργου ισχύος και ότι, λόγω θέσης, η επιτήρηση είναι εύκολη, ενώ επίσης βελτιώνεται το επίπεδο της τάσης και γίνεται πιο αποδοτική χρήση της χωρητικότητας των πυκνωτών. Ανάμεσα στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται ότι οι γραμμές μεταφοράς (καλώδια) μετά το σημείο αντιστάθμισης δεν μπορούν να απαλλαγθούν από τις απώλειες ισχύος που οφείλονται στα μεγάλα φαινόμενα ρεύματα.





Σχήμα 8: Κεντρική αντιστάθμιση

Όσον αφορά στην **αντιστάθμιση κατά ομάδες**, τα φορτία ομαδοποιούνται με βάση κάποιο κριτήριο, όπως για παράδειγμα το γεωγραφικό κριτήριο ή την ταχύτητα της αντιστάθμισης, σε ομάδες και σε κάθε ομάδα εφαρμόζεται η δική της αντιστάθμιση. Τα πλεονεκτήματα στην αντιστάθμιση κατά ομάδες είναι η μείωση του κόστους επένδυσης για τους πυκνωτές σε σχέση με το είδος της ανεξάρτητης αντιστάθμισης, καθώς έχουμε περισσότερες επιλογές, η μείωση των απωλειών μεταφοράς μέχρι το σημείο αντιστάθμισης καθώς και η ευελιξία αντιστάθμισης λόγω ομαδοποίησης των φορτίων. Σημαντικό μειονέκτημα εδώ είναι ότι οι γραμμές μεταφοράς (καλώδια) μετά το σημείο αντιστάθμισης δεν απαλλάσσονται από τις απώλειες ισχύος.



Σχήμα 9: Αντιστάθμιση κατά ομάδες

Στην **ανεξάρτητη αντιστάθμιση**, το κάθε φορτίο αντισταθμίζεται ατομικά. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις φορτίων που η απαίτησή τους σε άεργη ισχύ παραμένει σταθερή. Τα πλεονεκτήματα συνοψίζονται στο ότι η άεργος ισχύς παράγεται ακριβώς στο σημείο που απαιτείται και ότι έχουμε μέγιστη μείωση απωλειών μεταφοράς. Επίσης, δεν απαιτούνται πολύπλοκες διατάξεις ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι απαιτούνται πολλοί μικροί πυκνωτές οι οποίοι κοστίζουν περισσότερο.

Τέλος, υπάρχει και η **συνδυασμένη αντιστάθμιση** όπου κάποιες καταναλώσεις αντισταθμίζονται ατομικά ενώ οι υπόλοιπες ομαδοποιούνται και αντισταθμίζονται ξεχωριστά.

### 1.1.9 Αυτόματες συστοιχίες πυκνωτών

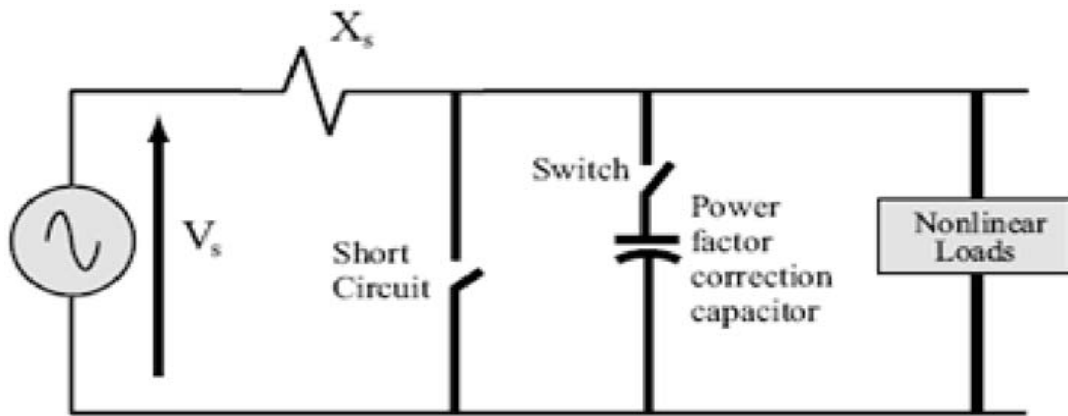
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι σύγχρονοι Πίνακες Διόρθωσης Συντελεστή Ισχύος όπως ενδεικτικά φαίνεται στην εικόνα ο προτεινόμενος πίνακας της ελληνικής Εταιρείας ΕΚΑΠ. Άλλες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα και εμπορεύονται Πίνακες Διόρθωσης Συντελεστή Ισχύος είναι η COSINON της Elesis η οποία παρέχει μείωση της αέργου ισχύος σε Βιομηχανίες Παραγωγής Ηλεκτρικού Ρεύματος και η εταιρεία Sinus C της Rita. Οι εταιρείες αυτές σε γενικές γραμμές προσφέρουν φιλτράρισμα των αρμονικών, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, αποφυγή προβλημάτων συντονισμού και μείωση των ηλεκτρικών διαταραχών και κατ'επέκταση μεγάλη διάρκεια ζωής.



*Σχήμα 10: Αυτόματη συστοιχία πυκνωτών της Ελληνικής Εταιρείας ΕΚΑΠ.*

#### **1.1.10 Διόρθωση του συντελεστή ισχύος με μη συντονιζόμενα φίλτρα (detuning filters)**

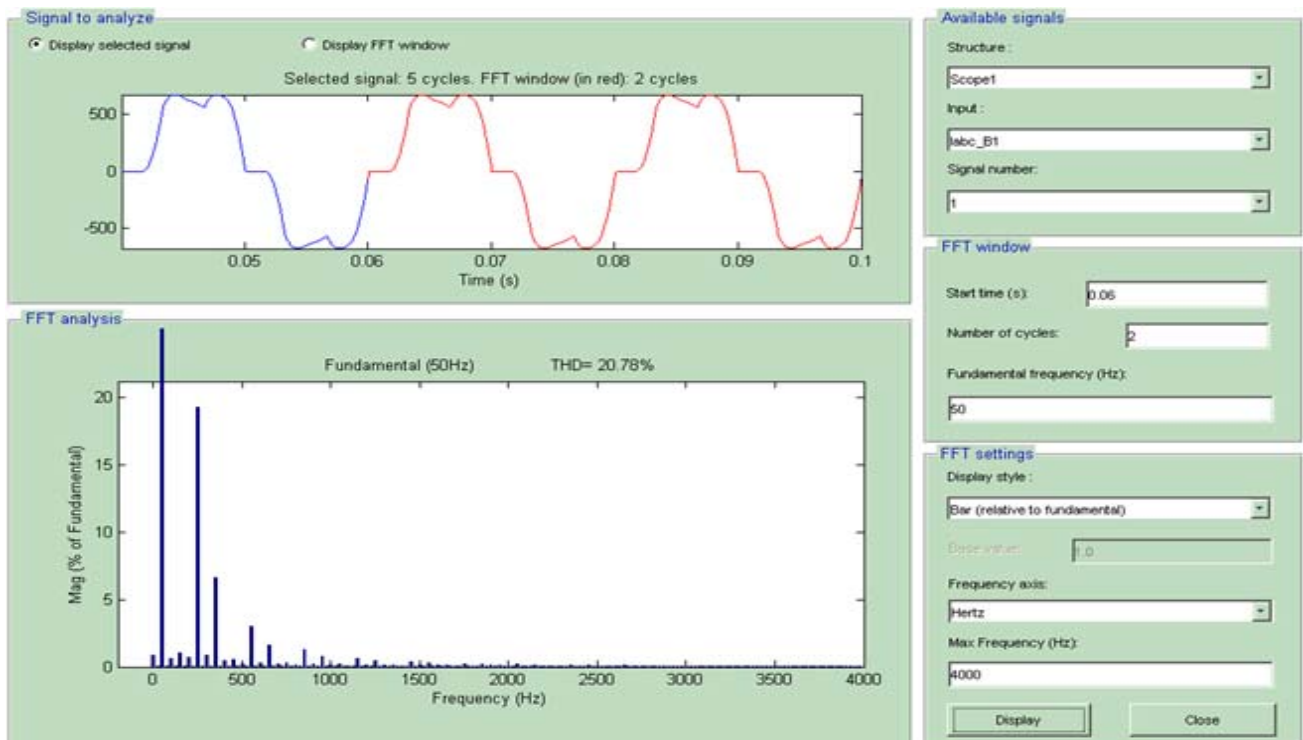
Τα σημαντικότερα προβλήματα που δημιουργούν οι αρμονικές σε μία ηλεκτρονική εγκατάσταση είναι η υπερφόρτωση των γραμμών και συσκευών και η αύξηση της θερμοκρασίας με συνέπεια την υπερβολική κατανάλωση ρεύματος και την λανθασμένη λειτουργία ακόμη και την καταστροφή ευαίσθητων εξαρτημάτων. Συνήθως, στα φίλτρα Διόρθωσης Συντελεστή Ισχύος, έχουμε πυκνωτές και μετασχηματιστές και συνεπώς οι χωρητικότητες και οι επαγωγές είναι ικανές μέχρι και να ενισχύσουν τις αρμονικές και την συχνότητα συντονισμού. Λόγω των ενισχυμένων αρμονικών που δημιουργούνται, οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος ολοένα και παραμορφώνονται. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, μία αντίσταση συνίσταται να τοποθετείται με τρόπο ώστε να αποσβέννεται η άεργος ισχύς αλλά και να μην ενισχύονται οι αρμονικές λόγω του κυκλώματος συντονισμού. Η χωρητικότητα του πυκνωτή του κυκλώματος επιλέγεται έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η άεργος ισχύς στο επιθυμητό επίπεδο, όπως αναλύσαμε παραπάνω. Επίσης, η επαγωγή του πηνίου υπολογίζεται ώστε η τελική συχνότητα συντονισμού που προκύπτει, αν τοποθετηθεί σε σειρά με τον πυκνωτή το πηνίο, να είναι χαμηλότερη από την χαμηλότερη αρμονική συχνότητα που μπορεί να εφαρμοστεί στο δίκτυό μας, όπως για παράδειγμα στις τηλεπικοινωνίες, όπου η χαμηλότερη αρμονική είναι η πέμπτη στην συχνότητα των 250Hz. Το φίλτρο εν τέλει συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής κάτω από την συχνότητα συντονισμού του, εξαλείφοντας την άεργο ισχύ. Πάνω από την συχνότητα αυτή, η συμπεριφορά του φίλτρου είναι επαγωγική, οπότε δεν μπορεί να ενισχύσει τις τυπικές αρμονικές συχνότητες, όπως την πέμπτη, την έβδομη και την ενδέκατη. Συνηθισμένες συχνότητες συντονισμού τέτοιων φίλτρων είναι τα 204Hz και 189Hz.



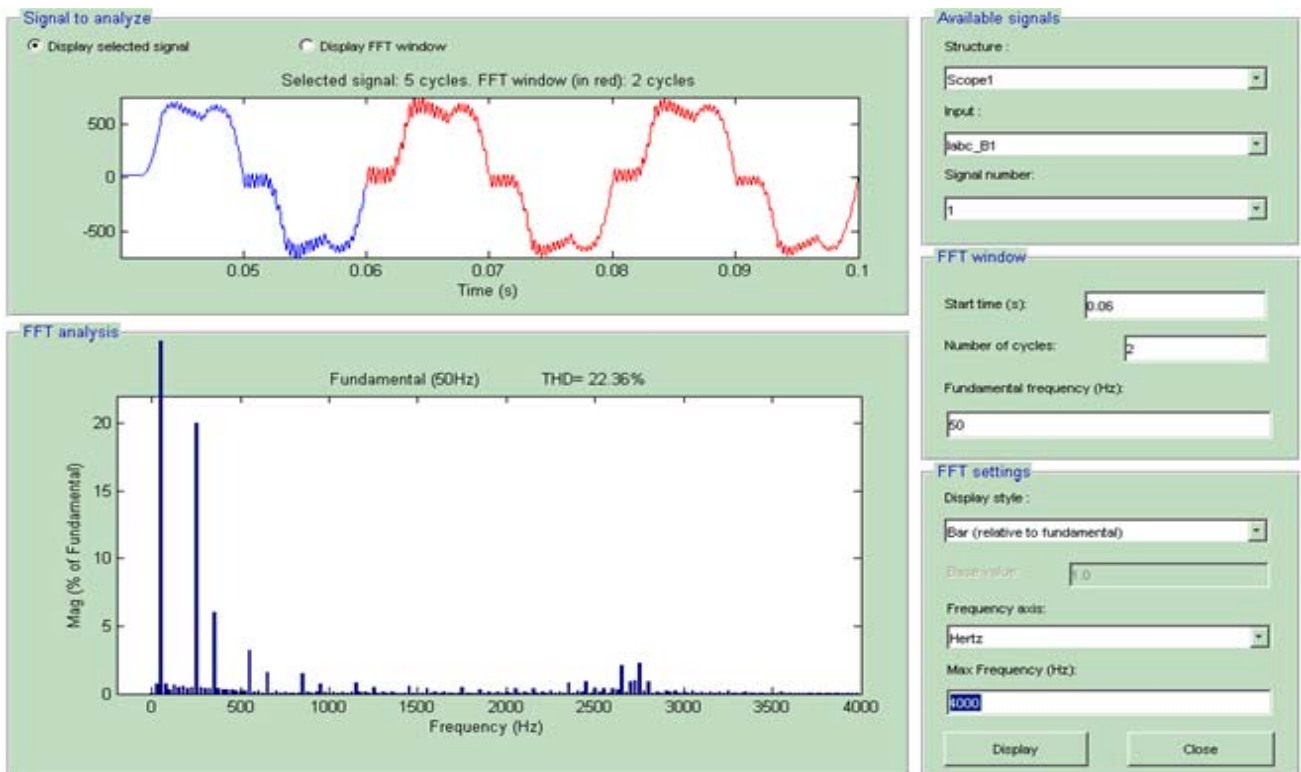
Σχήμα 11: Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος ισχύος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ανάλογα με το κάθε φίλτρο, η αντίσταση, πέραν της συχνότητας συντονισμού, έχει ως ρόλο την απόσβεση των αρμονικών από την εγκατάσταση, έως έναν συγκεκριμένο βαθμό όμως συνήθως πρόκειται για το 5,7% ή 7%. Σε περίπτωση μεγαλύτερης ισχύος των αρμονικών, αυτή η μέθοδος απόσβεσης δεν είναι πια αποδοτική καθώς οι πυκνωτές θα υπερφορτώνονταν. Τα μη συντονιζόμενα φίλτρα τοποθετούνται παράλληλα με το φορτίο μας.

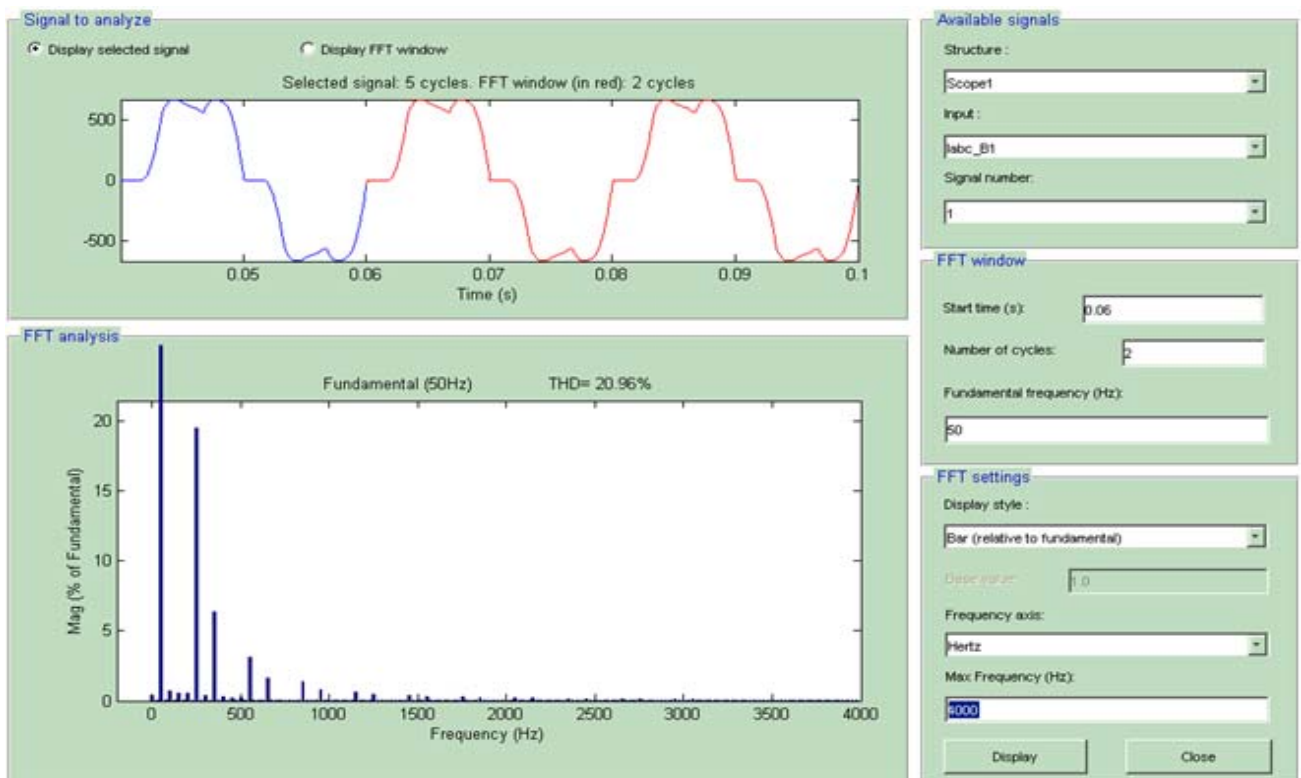
Παρακάτω, μπορούμε να δούμε παραδειγματικά την βελτιωμένη επίδραση τέτοιων φίλτρων σε σχέση με την συστοιχία πυκνωτών, σε εργοστάσιο ηλεκτρισμού, σύμφωνα με την προσομοίωση της Πολυτεχνικής σχολής της Timisoara της Ρουμανίας.



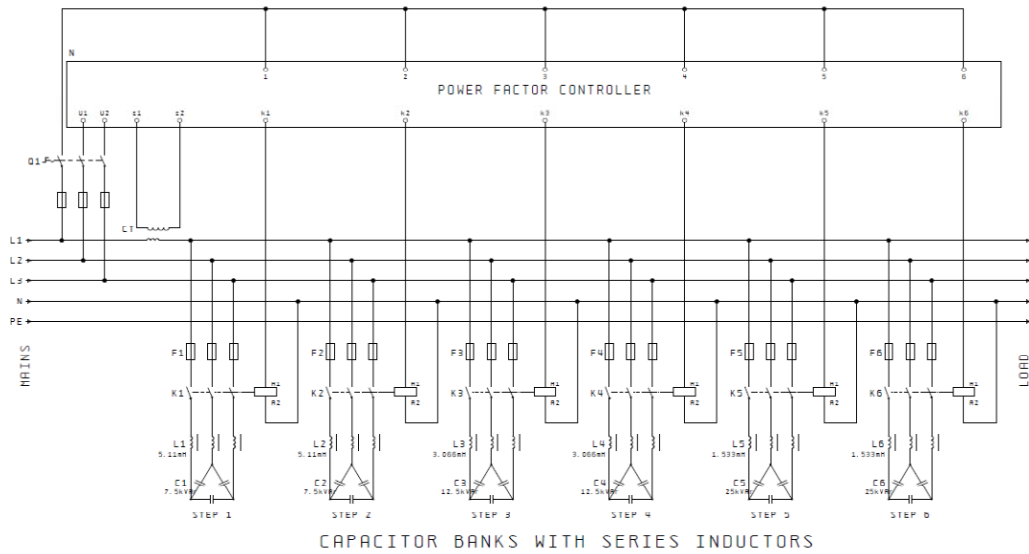
Σχήμα 12: Κυματομορφή ρεύματος πριν την εφαρμογή του φίλτρου



Σχήμα 13: Κυματομορφή ρεύματος με την εφαρμογή φίλτρου πυκνωτών



Σχήμα 14: Κυματομορφή ρεύματος με την εφαρμογή μη συντονιζόμενου φίλτρου

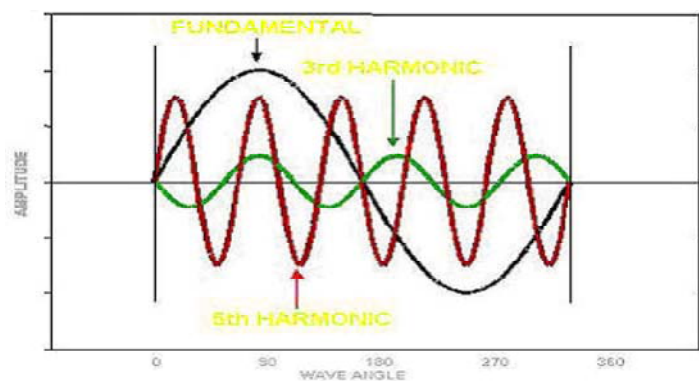


Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα μη συντονιζόμενου φίλτρου

## 1.2 Αρμονικές

### 1.2.1 Πηγές αρμονικών

Αξίζει να σημειώσουμε ότι στις Τηλεπικοινωνίες ειδικά, όπου στην κατασκευή αλλά και χρήση των συσκευών χρησιμοποιούνται κατά κόρον τρανζίστορες, παρατηρείται συγκεκριμένα η δημιουργία αρμονικών. Οι συχνότητες αυτές, που προκαλούνται από την ανάκλαση συνιστωσών τάσεως, οδηγούν επίσης στην υποβάθμιση της ισχύος και σε χαμηλότερους συντελεστές ισχύος. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα βασικά σημεία της περίπτωσης αυτής.

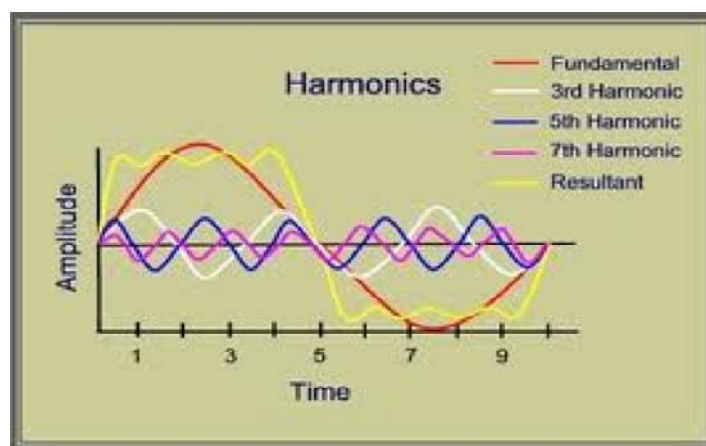


Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση αρμονικών

Τα πολυκαταστήματα, οι πολυκατοικίες, τα νοσοκομεία και οι λοιποί εμπορικοί χρήστες κυριαρχούνται στις μέρες μας από μη γραμμικά φορτία τα οποία παράγουν πλήθος αρμονικών ρεύματος. Τέτοια φορτία αποτελούν οι υψηλής απόδοσης λαμπτήρες φωτισμού, τα παλμοτροφοδοτικά ισχύος που τροφοδοτούν όλων των ειδών τις συσκευές όπως υπολογιστές και τηλεοράσεις και οι ρυθμιζομένων στροφών οδηγοί κινητήρων που απαντώνται στις διατάξεις θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού διαφόρων χώρων και κτιρίων. Κύριο χαρακτηριστικό τέτοιων φορτίων είναι ο μεγάλος αριθμός τους, οπότε παράγουν μεν χαμηλό ποσοστό παραμόρφωσης ατομικά αλλά αθροιστικά αποτελούν αξιόλογη πηγή αρμονικών. Τα ρεύματα των αρμονικών αυτών μπορεί να αθροίζονται ή να αλληλοαναιρούνται μεταξύ τους, Η παραμόρφωση τάσης εξαρτάται από την εμπέδηση του συστήματος παροχής ενέργειας (μετασχηματιστές και αγωγοί παροχής) και από την ολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος των φορτίων.

Η ύπαρξη αρμονικών στην τάση και την ένταση (υπέρθυση συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους 50Hz) 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.

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

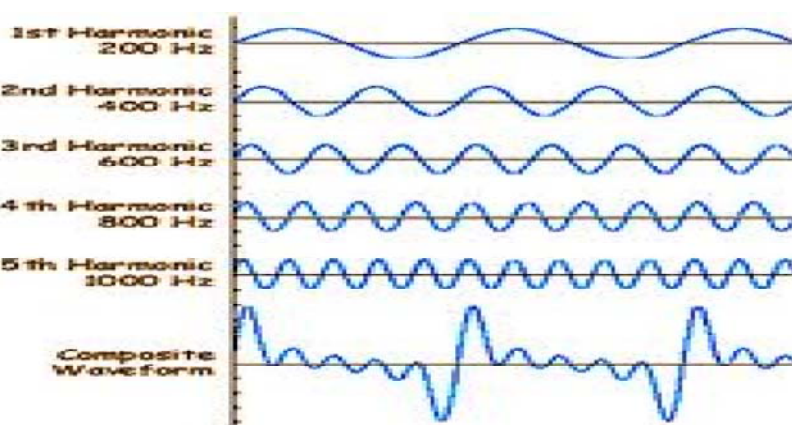


Σχήμα 17: Ανάλυση αρμονικών: 1<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup>, 7<sup>η</sup> και τελική κυματομορφή

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  $THD_V$ . Ο  $THD_V$  είναι ο λόγος της ενεργού τιμής της αρμονικής τάσης προς την ενεργό τιμή της τάσης της θεμελιώδους συχνότητας, όπως φαίνεται και από την επόμενη εξίσωση και συχνά δίνεται σαν ποσοστό:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{k,rms}^2}}{V_{rms}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (25)$$

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 αρμονικές αυτές είτε έχουν διακριτές συχνότητες είτε εμφανίζονται σε μία περιοχή συχνοτήτων και μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα όλων των τάξεων τάσης. Οι συνήθεις πηγές της διαταραχής των ενδιάμεσων αρμονικών είναι κυκλομετατροπείς (cycloconverters), επαγωγικοί κινητήρες, συσκευές εκκενώσεως τόξου αλλά και στατικοί μετατροπείς συχνότητας. Έχει αποδειχθεί γενικώς ότι επηρεάζουν τις γραμμές μεταφοράς και προκαλούν οπτική αστάθεια (flicker) σε οθόνες και αλλά οπτικά μέσα, όπως σωλήνες καθοδικών ακτίνων (CRTs).

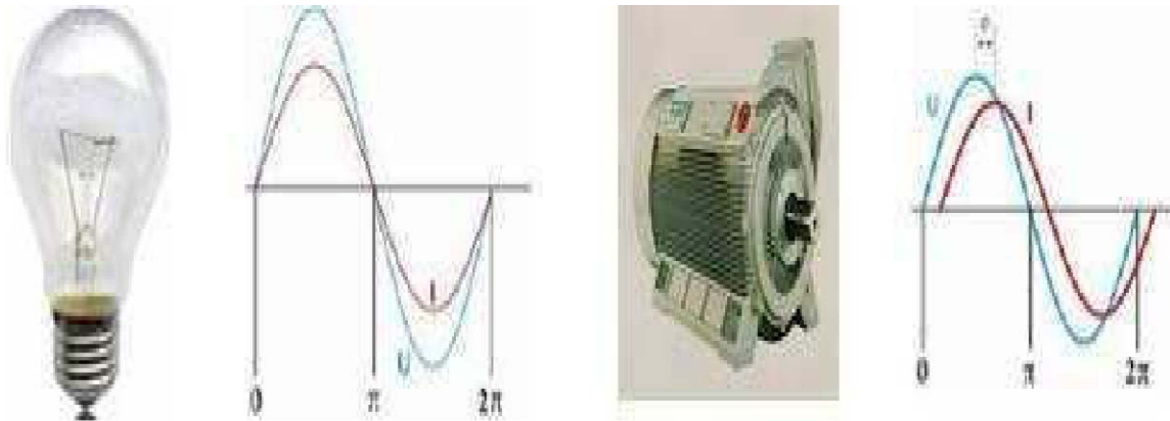


Σχήμα 18: Συνήθεις αρμονικές

Η ύπαρξη αρμονικών στην τάση ή και στην ένταση του ρεύματος, οφείλεται συνήθως σε μη γραμμικά φορτία, όπου, δηλαδή, το ρεύμα δεν ακολουθεί την τάση και δεν έχει την ίδια μορφή με αυτήν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα στοιχεία αυτά άγουν ρεύμα για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Το εύρος που καταλαμβάνουν αυτές οι αρμονικές στο πεδίο των συχνοτήτων εξαρτάται από την φύση αυτών των φορτίων, ενώ οι αρμονικές που

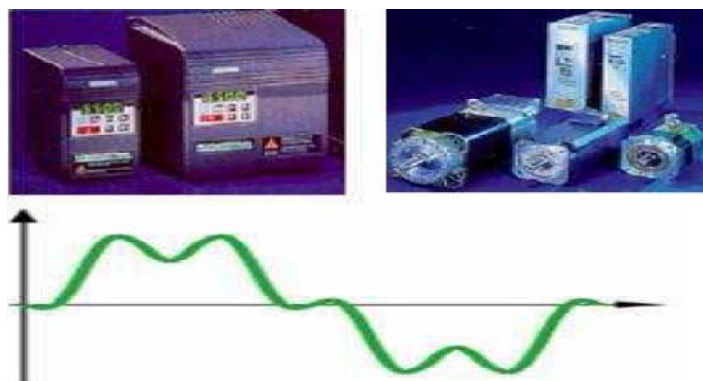


παράγονται σε ένα σημείο διαδίδονται σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Επίσης, αξίζει να σημειώσουμε ότι παρουσιάζονται κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος. Τα προηγούμενα χρόνια, τα περισσότερα φορτία ήταν γραμμικά, όπως οι επαγωγικοί κινητήρες, οι αντιστάσεις θέρμανσης και οι λάμπες πυρακτώσεως.



Σχήμα 19: Γραμμικά φορτία

Σήμερα, χρησιμοποιούνται αρκετά ευρέως μη γραμμικά φορτία τα οποία όταν συνδέονται με μία πηγή παραδείγματος χάριν ημιτονοειδούς ρεύματος, παράγουν μη ημιτονοειδές ρεύμα. Μερικά από αυτά είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι ανορθωτές, οι τηλεοράσεις, φούρνοι μικροκυμάτων, φωτοαντιγραφικά, ηλεκτρονικοί υπολογιστές και κλιματιστικά.



Σχήμα 20: Μη γραμμικά φορτία

### 1.2.2 Συνέπειες από την δημιουργία των αρμονικών

Η απόκριση κάθε συσκευής σε τάσεις αρμονικές είναι διαφορετική ανάλογα με τον σκοπό λειτουργίας και τις ευαισθησίες. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι οικιακοί θερμοσίφωνες και θερμάστρες δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη αρμονικών. Αντιθέτως, τα τυλίγματα των επαγωγικών κινητήρων υπερθερμαίνονται κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και μειούμενη αποδοτικότητά τους καθώς και την μείωση του χρόνου ζωής τους. Επίσης, επειδή, όπως είδαμε και στα διαγράμματα, το συνολικό ρεύμα της επαλληλίας των διάφορων συνιστωσών της τάσης, όπου τώρα συμπεριλαμβάνονται και οι αρμονικές, είναι τελικά μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο από τις προδιαγραφές του εξαρτήματος σε κανονική τάση, μπορεί να έχουμε καταστρεπτικές συνέπειες για τον κινητήρα. Άλλα παραδείγματα συσκευών που έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε συγκεκριμένη τάση και έχουν συγκεκριμένη απόκριση είναι τα θυρίστρον, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα των τηλεπικοινωνιών (π.χ. κατασκευή κινητών τηλεφώνων) και των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

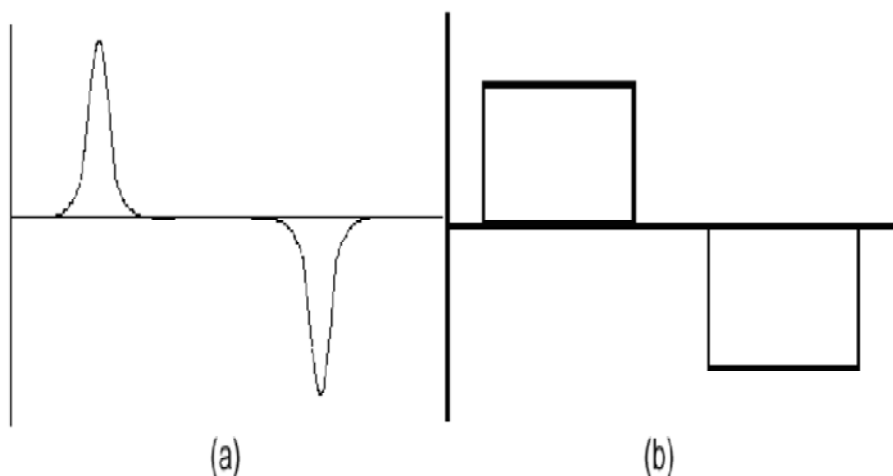
Πολλές από τις αρμονικές που διαρρέουν το δίκτυο οφείλονται στην παραμόρφωση που εισάγουν μονοφασικά φορτία, όπως παρατηρείται σε κτίρια με γραφεία και μπορεί να προκαλέσουν διαρροή ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό που ξεπερνούν την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Εάν δεν υπάρχουν αρμονικές, ο ουδέτερος μεταφέρει πολύ μικρά ρεύματα και πρακτικά 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 ο ουδέτερος κινδυνεύει να υπερφορτιστεί. Οι δύο πιθανές συνέπειες τότε είναι αφενός η υπερθέρμανση του αγωγού στον ουδέτερο και η μείωση του χρόνου ζωής και πιθανή εκδήλωση πυρκαγιάς και αφετέρου ενδεχόμενες παρεμβολές στον ψηφιακό εξοπλισμό και τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών δεδομένου ότι δεν υπάρχει καλό σύστημα γείωσης.

Όσον αφορά στο σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, οι μετασχηματιστές των υποσταθμών και οι πυκνωτές αντιστάθμισης επηρεάζονται περισσότερο. Οι μετασχηματιστές επηρεάζονται από το παραμορφωμένο ρεύμα που μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω θέρμανση και μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι πυκνωτές επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη τάση, που αν είναι σημαντικά παραμορφωμένη και περιέχει αρκετές αρμονικές σημαντικής ισχύος, μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση του διηλεκτρικού μέσου στον πυκνωτή, με κίνδυνο να οδηγήσει και σε έκρηξη.

Έχει παρατηρηθεί ότι, σε γενικές γραμμές, εάν δεν αποσβεστούν οι αρμονικές με βελτίωση του συντελεστή ισχύος, ο χρόνος ζωής μιας συσκευής μπορεί να μειωθεί έως και το μισό. Το ατυχές στην πράξη είναι ότι μετά την αγορά για παράδειγμα ενός εξαρτήματος, εάν δεν ληφθεί μέριμνα για

την λειτουργία του όταν συνδεθεί με το δίκτυο παροχής ενέργειας, είναι πιθανό να μη γίνουν αντιληπτές οι αρμονικές παρά μόνο από μία τυχαία μέτρηση θερμοκρασίας της συσκευής, η οποία θα προκύψει υψηλότερη ή από μία ραγδαία μείωση του χρόνου ζωής της.

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). Όσον αφορά στα ηλεκτρονικά ισχύος, απορροφούν ρεύματα που δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής, όπως τα κομπιούτερ, φαξ και κάποιες οικιακές συσκευές με ηλεκτρονικό έλεγχο. Αντίθετα, ρεύματα τετραγωνικής μορφής, τα οποία και πάλι περιέχουν ασυνέχειες και άρα αρμονικές, απορροφούν συστήματα οδήγησης κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην γραμμή παραγωγής μιας βιομηχανίας ή στους ανελκυστήρες.

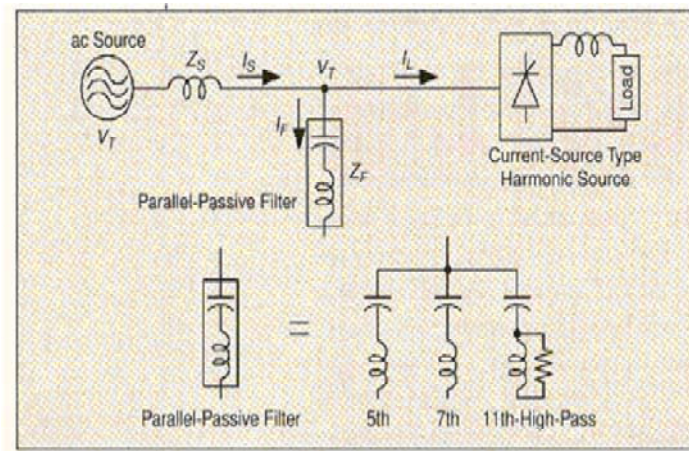


Σχήμα 21: Κυματομορφές ρεύματος που απορροφά (a) ένας υπολογιστής και (b) ένας κινητήρας

Να σημειώσουμε ότι τα όρια παραμόρφωσης της κυματομορφής τάσης από τηνκυματομορφή ρεύματος καθώς και τα σχετικά επίπεδα ισχύος των αρμονικών καθορίζονται από πολλά πρότυπα διεθνή και εθνικά. Η IEC (Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή – International Electrotechnical Commission) θέτει όρια ανάλογα με την εκπομπή της κάθε συσκευής ενώ το IEEE τοποθετεί μέρος της ευθύνης στον καταναλωτή, ο οποίος έχει την επιλογή είτε να αγοράσει καλύτερο εξοπλισμό είτε να αγοράσει φίλτρα , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ώστε να αποσβέσει την άεργο ισχύ και τις αρμονικές και να τις επιστρέφει στο δίκτυο.

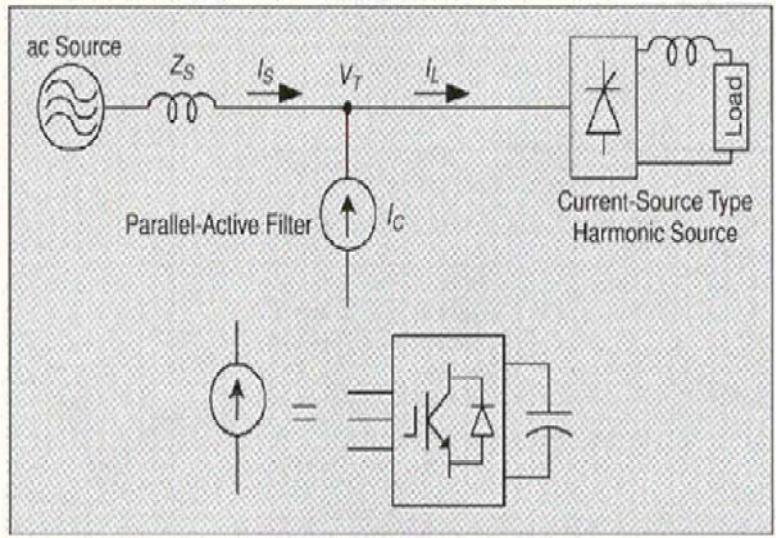
### 1.2.3 Αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούν οι αρμονικές

Συνοπτικά, θα αναφέρουμε τα πιο γνωστά ενεργά και παθητικά φίλτρα που εφαρμόζονται στην εξάλειψη αρμονικών , τα οποία αναλύονται στη διπλωματική των Παναγιώτη Γ. Γιαννόπουλου και Άρη Θ. Πουρνάρα *Μέτρηση ποιότητας Ισχύος και Ανάλυση Αρμονικών* του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Τα επόμενα τέσσερα σχήματα είναι επίσης από την συγκεκριμένη διπλωματική.

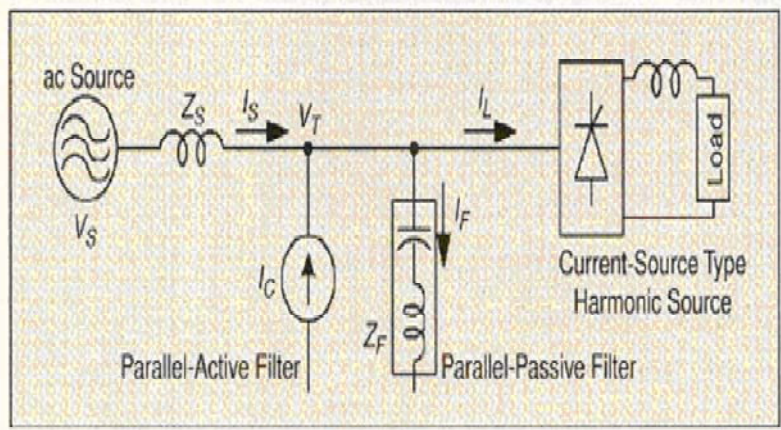


Σχήμα 22: Παράλληλο-παθητικό φίλτρο

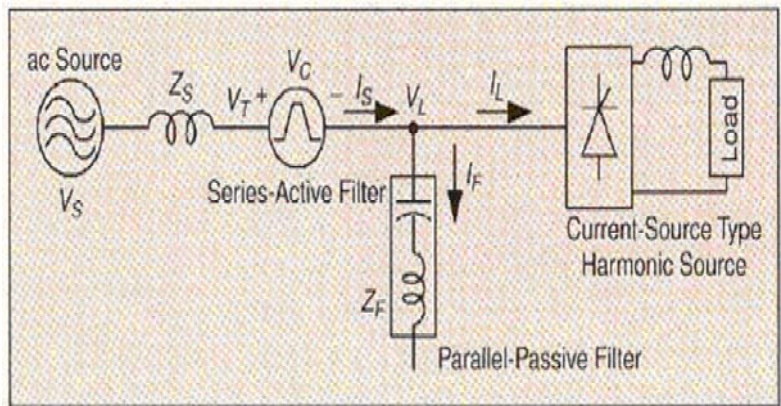
Στο Σχήμα 22 έχουμε την παράλληλη τοποθέτηση στο φορτίο-πηγή αρμονικών συστοιχίας πυκνωτή-πηνίου που συνεισφέρει στην απόσβεση, ανάλογα με την συνδεσμολογία, της 5ης και 7ης αρμονικής.



Σχήμα 23: Παράλληλο-ενεργητικό φίλτρο



Σχήμα 24: Παράλληλο-παθητικό και παράλληλο-ενεργητικό φίλτρο

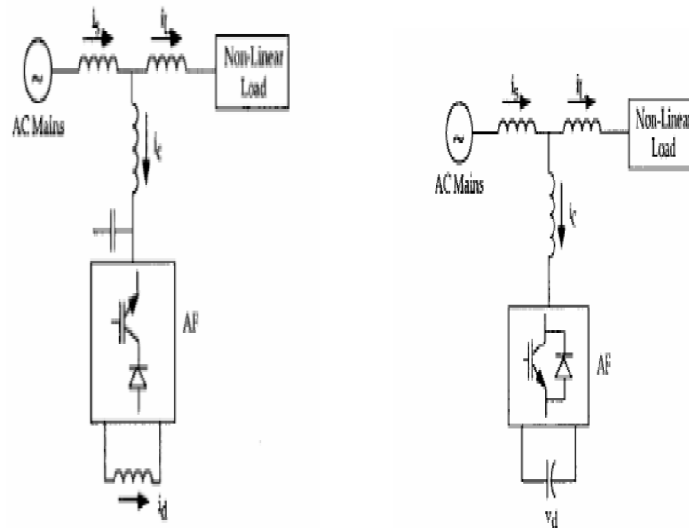


Σχήμα 25: Παράλληλο-παθητικό και σειριακό-ενεργητικό φίλτρο

Στις περιπτώσεις αυτές έχουμε συνδεδεμένες παράλληλα διαφορετικές συνδεσμολογίες παθητικών και ενεργών φίλτρων. Γνωρίζουμε ότι τα παθητικά φίλτρα είναι κυκλώματα και χωρίζονται σε χαμηλοπερατά, υψηλοπερατά, ζωνοπερατά και ζωνοφρακτικά φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος και βάρος, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν μόνο σε συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων και μπορούν να κόψουν μόνο συγκεκριμένες αρμονικές. Επιπλέον, εισάγουν αντήχηση στο σύστημα. Για τους λόγους αυτούς αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια τα ενεργά φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για την αντιστάθμιση των αρμονικών, όσο και για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος. Τα ενεργά φίλτρα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν αρμονικό ρεύμα ίσο με το αρμονικό ρεύμα του φορτίου. Με τον τρόπο αυτόν το ρεύμα της πηγής είναι απαλλαγμένο από αρμονικές. Με μία μετρητική διάταξη μετράται το ρεύμα γραμμής του φορτίου. Με κάποιο τρόπο απομονώνεται η πρώτη αρμονική του ρεύματος αυτού και αφαιρώντας την από το ρεύμα της γραμμής, λαμβάνεται η συνολική παραμόρφωση του ρεύματος γραμμής, η οποία αποτελείται από όλες τις αρμονικές πλην τις πρώτης. Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας μία διακοπτική διάταξη, η οποία αποτελείται από transistor ή mosfet, το φίλτρο προσπαθεί να δημιουργήσει ένα ρεύμα ίσο με το ρεύμα της παραμόρφωσης. Το ρεύμα αυτό εισάγεται στο κύκλωμα έτσι ώστε να προστίθεται στο ρεύμα της γραμμής. Εφόσον οι αρμονικές του ρεύματος γραμμής είναι ίσες με τις αρμονικές που εισάγει το φίλτρο, είναι φανερό ότι το ρεύμα της γραμμής δε θα περιέχει αρμονικές. Συνοψίζοντας, σε ό,τι αφορά την τοπολογία τους, τα φίλτρα μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες: παράλληλα φίλτρα, φίλτρα σε σειρά, υβριδικά φίλτρα, τα οποία είναι συνδυασμός ενεργών και παθητικών φίλτρων και τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ενεργά παράλληλα (shunt) φίλτρα ισχύος.

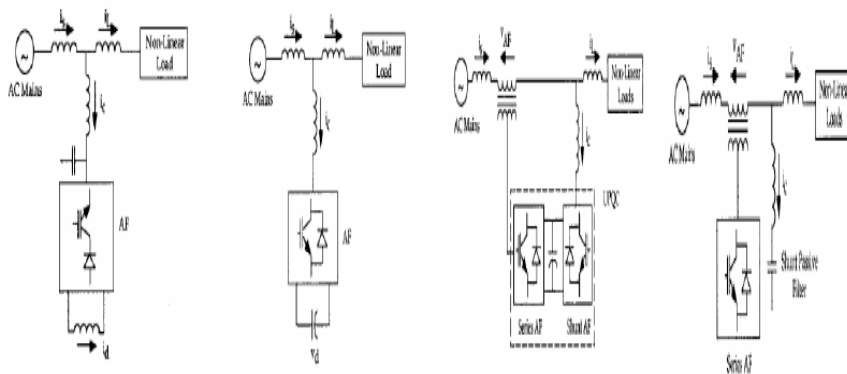
### **Ενεργό φίλτρο**

Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 26, τα ενεργά φίλτρα ανήκουν σε δύο κατηγορίες, τα ενεργά φίλτρα πηγής ρεύματος (current source active filters) και τα ενεργά φίλτρα πηγής τάσης (voltage source active filters).



Σχήμα 26: Ενεργό φίλτρο πηγής ρεύματος και πηγής τάσης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ανάλογα με την τοπολογία, διακρίνουμε κατηγορίες όπως τα παράλληλα φίλτρα, τα εν σειρά φίλτρα, τα unified power quality conditioners καθώς και τα υβριδικά φίλτρα (Σχήμα 27).



Σχήμα 27: Παράλληλα φίλτρο, εν σειρά φίλτρο, unified power quality conditioner, υβριδικά φίλτρο

Γνωρίζουμε ότι σε ένα τριφασικό σύστημα οι τρεις φάσεις παριστάνονται γραφικά σαν τρία διανύσματα με διαφορά 120 μοίρες. Στην λεγόμενη ρq θεωρία, όταν αναφερόμαστε σε συμμετρικό τριφασικό σύστημα, ισχύει για τις δύο συνιστώσες τάσεων (δεν υπάρχει ουδέτερος), καθώς και για την στιγμιαία ισχύ  $p$  και για την στιγμιαία φανταστική ισχύ  $q$ :

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

Ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό του μετασχηματισμού αυτού είναι ότι βασίζεται στις στιγμιαίες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων, γεγονός που προσφέρει πολύ καλή δυναμική απόκριση. Ένα δεύτερο σπουδαίο χαρακτηριστικό είναι ότι με την μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται να είναι γνωστό το όρισμα των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος. Το φίλτρο αρχικά υπολογίζει την 1<sup>η</sup> αρμονική του ρεύματος του φορτίου και όχι τις υπόλοιπες αρμονικές. Για τον λόγο αυτόν, θεωρείται ότι η 1<sup>η</sup> αρμονική είναι εκείνη που έχει ως αποτέλεσμα την ροή της ενεργού ισχύος.

Το ρεύμα του φορτίου μας και σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$i_\alpha = \frac{e_\alpha}{\left[ (e_\alpha^2 + e_\beta^2) p \right]} - \frac{e_\beta}{\left[ (e_\alpha^2 + e_\beta^2) q \right]} \quad (28)$$

Έτσι προκύπτει ότι φίλτρο αποδίδει και όλη την άεργο ισχύ του φορτίου και την ισχύ παραμόρφωσης. Συνεπώς, το ρεύμα της πηγής θα είναι πλήρως απαλλαγμένο από αρμονικές συνιστώσες και θα μεταφέρει μόνο την ενεργό ισχύ του φορτίου.

### **1.3 Τηλεπικοινωνίες και συσκευές διόρθωσης συνημιτόνου**

Κάνοντας μία έρευνα στις σημερινές εταιρίες Τηλεπικοινωνιών, όπως στην ιστοσελίδα της Vodafone η οποία μας παραπέμπει στα προϊόντα για βελτίωση της ποιότητας ισχύος της εταιρείας και στις σελίδες όπου διαφημίζονται οι προμηθευτές τους, σημειώσαμε ορισμένα προϊόντα που διακινούνται σήμερα μέσω του διαδικτύου καθώς και μερικά χαρακτηριστικά τους. Ένα φίλτρο αρμονικών που χρησιμοποιείται στους πίνακες των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών φαίνεται ενδεικτικά στην επόμενη εικόνα. Η συσκευή χρησιμοποιεί ολοκλήρωση ισχύος και δεν επηρεάζεται από τις αρμονικές που προκύπτουν μηδέν σε έναν ακέραιο αριθμό περιόδων ως



συνημίτονα. Η ευαισθησία του είναι στα 100mA, οι χρονικές αποκρίσεις του είναι ταχείες και σε ένα δίκτυο μπορεί να τοποθετηθεί ανά διαστήματα, προστατεύοντάς το από τις αρμονικές, με ανθρώπινο χειρισμό και δυνατότητα παρέμβασης.



*Σχήμα 28: Φίλτρο αρμονικών σε πίνακες τηλεπικοινωνιακών εταιριών*

Μία συσκευή που προτείνεται για μεγαλύτερης κλίμακας εγκαταστάσεις και συνολική απόσβεση αρμονικών αλλά και αποκατάσταση της στάθμης ισχύος δικτύου είναι η παρακάτω, για τριφασικό δίκτυο.



*Σχήμα 29: Συσκευή απόσβεσης αρμονικών και αποκατάστασης στάθμης ισχύος δικτύου σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις*

Μία συσκευή που ίσως αξιοποιηθεί από εταιρείες μεγάλης ισχύος και εκπομπής μεγάλου βεληνεκούς είναι η επόμενη, η οποία διαθέτει και επιπλέον λειτουργίες όπως η περαιτέρω σταθεροποίηση του συνεχούς ρεύματος και η διεύρυνση του σημείου λειτουργίας. Η συσκευή συνδέεται παράλληλα με το δίκτυο όπως μία μεταβλητή πηγή ρεύματος. Με βάση τα χαρακτηριστικά του επιθυμητού ρεύματος εξόδου και με τη βοήθεια ημιαγωγών, ρυθμίζει την στάθμη του εναλλασσόμενου ρεύματος και κατ' επέκταση την ισχύ στο δίκτυο παράγοντας ή απορροφώντας άεργο ισχύ.



Σχήμα 30: Συσκευή σταθεροποίησης συνεχούς ρεύματος και διεύρυνσης του σημείου λειτουργίας

Βλέπουμε στην εικόνα που ακολουθεί ένα παράδειγμα της δράσης της, όπου, ανάλογα με το φορτίο ή αλλιώς με την ισχύ του δικτύου, λειτουργεί άλλοτε επαγωγικά σαν πηνίο και άλλοτε χωρητικά σαν πυκνωτής, εξισορροπώντας την άεργο ισχύ στο δίκτυο.

work mode	wave form	explain
no load	<p>(a) <math>U_1 = U_2</math></p>	In case of $U_1 = U_2$ , SVG has no compensation capability.
Inductive operation	<p>(b) <math>U_1 &lt; U_2</math></p>	If $U_1 < U_2$ , SVG can output inductive current continuously.
Capacitive operation	<p>(c) <math>U_1 &gt; U_2</math></p>	If $U_1 > U_2$ , SVG can output capacitive current continuously.

Σχήμα 31: Εναλλακτικές εξισορρόπησης αέργου ισχύος

Σαν παράδειγμα, ένας μετρητής ακριβείας παρουσιάζεται στο Σχήμα 32, ο οποίος βοηθάει στην σωστή ρύθμιση των επιπέδων της αέργου ισχύος με ακρίβεια της τάξης του 0,5% του επιπέδου του ρεύματος του δικτύου ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.



Σχήμα 32: Μετρητής ακριβείας

Ένα προϊόν για κλίμακα μεγάλης ισχύος, τριφασικό δίκτυο και δυνατότητα φιλτραρίσματος 100% αρμονικής τάσης απεικονίζεται στο Σχήμα 33.



Σχήμα 33: Συσκευή με δυνατότητα φιλτραρίσματος 100% αρμονικής τάσης

#### **1.4 Σύγκριση διατάξεων διόρθωσης συντελεστή ισχύος**

Η άεργη ισχύς δεν παράγει έργο και οφείλεται στην δημιουργία περιοδικών πεδίων στις αυτεπαγωγές ή στους πυκνωτές, όπου ενέργεια απορροφάται από το δίκτυο κατά την διάρκεια δημιουργίας του πεδίου και αποδίδεται πάλι στο δίκτυο κατά την διάρκεια μείωσης του πεδίου. Η άεργη ισχύς επηρεάζει σε ένα δίκτυο τις απώλειες των γραμμών που τροφοδοτούν το φορτίο, την πτώση τάσης των γραμμών η οποία εξαρτάται, κατά ένα μεγάλο μέρος, από το άεργο φορτίο του καταναλωτή, το ρεύμα του φορτίου, κ.ά. Η παραγωγή άεργου ισχύος με στοιχεία, όπως πυκνωτές ή αυτεπαγωγές, χρησιμοποιείται για να αλλάξουμε την άεργη ισχύ ενός καταναλωτή ή μιας γραμμής, οπότε μιλάμε για αντιστάθμιση. Όταν η συμπεριφορά του δικτύου είναι επαγωγική, που είναι και η συνήθης περίπτωση, για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος τοποθετούμε πυκνωτές σε συνδεσμολογία αστέρα (Y) ή τριγώνου (Δ). Στην αντίθετη περίπτωση της χωρητικής συμπεριφοράς, για αντιστάθμιση χρησιμοποιούμε αυτεπαγωγές με ανάλογη συνδεσμολογία. Χωροταξικά, η άεργη ισχύς μπορεί να αντισταθμιστεί είτε τοπικά, δηλαδή σε κάθε συσκευή που λειτουργεί συνεχώς με σταθερό φορτίο είτε ομαδικά, δηλαδή σε ομάδες συσκευών, αν αυτές έχουν συνεχή σταθερή λειτουργία είτε κεντρικά, αν η φόρτιση των διαφόρων συσκευών είναι κυμαινόμενη.

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύσαμε διεξοδικά το ζήτημα της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος με την χρήση κατάλληλων διατάξεων και σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να συγκρίνουμε τους διάφορους τρόπους, συγκεντρώνοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης. Η χρήση των αυτομάτων συστοιχιών πυκνωτών επιτρέπει την επίτευξη του επιθυμητού συντελεστή ισχύος, μεταβάλλοντας το μέγεθος της συστοιχίας, το οποίο μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται κατά βήματα διά του ελέγχου των κατάλληλων ηλεκτρονόμων. Μάλιστα, αν αντί για ηλεκτρονόμους χρησιμοποιηθούν στατικοί ημιαγωγικοί διακόπτες (π.χ. thyristors), επιτυγχάνονται επιπλέον πλεονεκτήματα, όπως άμεση απόκριση στις διακυμάνσεις του συντελεστή ισχύος, απεριόριστος αριθμός μεταγωγών, εξάλειψη μεταβατικών φαινομένων στο σύστημα ισχύος που δημιουργούνται από την μεταγωγή των πυκνωτών, πλήρως αθόρυβη λειτουργία. Από την άλλη, η σύνδεση πυκνωτών στο δίκτυο αλληλεπιδρά με τις επαγωγές του δικτύου και σχηματίζει κάποιο συντονιζόμενο κύκλωμα, το οποίο μπορεί να διεγερθεί από κάποια αρμονική ρεύματος παραγόμενη από κάποιο μη γραμμικό φορτίο. Συνεπώς, όταν εγκαθίστανται πυκνωτές για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αρμονικές, έτσι ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού, οι οποίες μπορούν να βλάψουν το ηλεκτρικό σύστημα ή να υποβαθμίσουν την ποιότητα των χαρακτηριστικών του (τάση, ρεύμα).

Ο κίνδυνος του συντονισμού μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση μη συντονιζόμενων φίλτρων, οπότε πραγματοποιείται μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού σε τέτοιες συχνότητες όπου δεν

υφίστανται τέτοιες αρμονικές ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αποδοτικότερη διόρθωση του συντελεστή ισχύος ωστόσο η εν λόγω τεχνική χαρακτηρίζεται από υψηλότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Επιπρόσθετα, ο συντελεστής ισχύος επηρεάζεται όταν τα φορτία που τροφοδοτούνται είναι μη γραμμικά και παράγουν αρμονικές. Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος μπορεί να διορθωθεί μόνο με φίλτρα αρμονικών, τα οποία είναι φίλτρα παράλληλης συνδεσμολογίας επειδή συνδέονται παράλληλα με το σύστημα ισχύος και σχηματίζουν κλάδους. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές η χρήση αυτών των συμβατικών λύσεων με την μορφή παθητικών φίλτρων για την καταστολή των αρμονικών μπορεί να είναι αναποτελεσματική ή ακόμα και να δημιουργήσει προβλήματα, όπως παράλληλους συντονισμούς με την αντίδραση του συστήματος και υπεραντιστάθμιση της αέργου ισχύος στην θεμελιώδη συχνότητα.

Έτσι προέκυψε η ανάγκη για την εξεύρεση διατάξεων οι οποίες θα προσφέρουν δυναμικά προσαρμοζόμενες λύσεις στα θέματα ποιότητας ισχύος όπως είναι ο περιορισμός και η εξάλειψη των αρμονικών. Τέτοιες διατάξεις είναι γνωστές ως ενεργά φίλτρα και είναι ικανές όχι μόνο να αντισταθμίσουν τάσεις και ρεύματα αρμονικών και άεργο ισχύ αλλά και να ρυθμίζουν την τάση, να καταστέλλουν τις διακυμάνσεις αυτής και να την εξισορροπούν στα τριφασικά συστήματα ισχύος. Ως εκ τούτου, το βασικό πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων είναι ότι αυτομάτως προσαρμόζονται στις αλλαγές και διακυμάνσεις των στοιχείων του δικτύου και του φορτίου.

## Κεφάλαιο 2 Αποθήκευση ενέργειας

### 2.1 Αποθήκευση ενέργειας σήμερα

Στον σύγχρονο κόσμο, υπάρχει μια συνεχής παγκόσμια ανάγκη για περισσότερη ενέργεια είτε για κάλυψη μεγαλύτερων αναγκών σε ισχύ είτε για κάλυψη αναγκών σε χρονικές περιόδους όπου δεν ικανοποιείται το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης και δεν υπάρχουν αποθέματα. Η ποσότητα της ισχύος που παράγεται από τις διατάξεις των πηγών δεν προσαρμόζεται εύκολα στις διακυμάνσεις της ζήτησης, δημιουργώντας την ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση. Ανάλογα με την εφαρμογή τους, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διατάξεις βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Τεχνολογίες με υψηλή πυκνότητα ισχύος και ικανότητα ανταπόκρισης στα αιτήματα σε μικρά χρονικά πλαίσια, όπως οι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές και τα υπεραγωγία μαγνητικά πηνία ανήκουν στην πρώτη κατηγορία. Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης με ικανότητα να απορροφούν και να αποδεσμεύουν την ηλεκτρική ενέργεια για περιόδους μακράς διάρκειας, όπως οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου εντάσσονται στην δεύτερη κατηγορία. Προκειμένου να επιλέξουμε κάθε φορά την συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που ικανοποιεί τις ανάγκες μας, απαιτείται μία εκτεταμένη μελέτη του μεγέθους του δικτύου, των διακυμάνσεων του φορτίου καθώς και των οικονομικών παραγόντων. Στις Τηλεπικοινωνίες, σε σταθμούς αλλά και στις μικροσυσκευές τους, που θεωρούνται μεσαίας και μικρής ισχύος εγκαταστάσεις, τείνουν να χρησιμοποιούνται μεσαίας και μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας.

Επίσης, αξίζει να αναφέρουμε ότι η σημερινή, μη βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας σε συνδυασμό με την ανάγκη για απεξάρτηση από την ηλεκτροπαραγωγή μέσω συμβατικών μέσων, λόγω των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, καθιστούν αναγκαία την προώθηση της εκμετάλλευσης των φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Όμως, οι ΑΠΕ βασίζονται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς) με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αδυναμία αυτής της πρόβλεψης της διακύμανσης φορτίου στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι και η κύρια αιτία ανάγκης αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας.

### 2.1.1 Τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ισχύος

Τα τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ισχύος - UPS (Uninterruptible Power Supply) είναι συσκευές που αναλαμβάνουν να τροφοδοτήσουν τον υπολογιστή μας και άλλες συσκευές που θέλουμε να προστατεύσουμε (στο εξής, φορτίο) με σταθερή τάση είτε υπάρχει ρεύμα στο δίκτυο της ΔΕΗ είτε όχι. Για τον σκοπό αυτόν διαθέτουν μπαταρίες οι οποίες μπορούν να τροφοδοτήσουν για κάποιο χρονικό διάστημα το φορτίο με ρεύμα. Επιπλέον διαθέτουν φίλτρα σταθεροποίησης και συνεπώς προστατεύουν και από διακυμάνσεις της τάσης εισόδου. Πολλά UPS παρέχουν προστασία και από τις υπερτάσεις των τηλεφωνικών γραμμών που μπορεί να προκληθούν από την πτώση ενός κεραυνού. Όλα τα UPS έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία και προστασία των φορτίων 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες τον χρόνο. Πολλές φορές μάλιστα τα UPS σβήνουν όταν γίνεται διακοπή παροχής εάν δεν υποστηρίζουν κάποιο φορτίο. Η πραγματική διάρκεια ζωής των μπαταριών ποικίλλει και μπορεί να είναι 4 έως 5 χρόνια (μπαταρίες κλειστού τύπου, μολύβδου οξέος) ή 6 έως 8 χρόνια (μπαταρίες NiCad). Συνήθως τα UPS διαθέτουν τρόπο ειδοποίησης για αντικατάσταση των μπαταριών.

Ωστόσο θα πρέπει να έχουμε υπόψη ότι πολλά UPS παρέχουν σήμα εξόδου τετραγωνικής και όχι ημιτονοειδούς μορφής. Αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα στα τροφοδοτικά των υπολογιστών λόγω του ιδιαίτερου τρόπου σχεδιασμού τους, όμως μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και να καταπονήσει τα τροφοδοτικά άλλων συσκευών που χρησιμοποιούν μετασχηματιστές. Επίσης, σε πολλά UPS, ενώ μπορεί να υπάρχουν αρκετές τριπολικές έξοδοι ρεύματος για την σύνδεση των συσκευών μας, ωστόσο κάποιες από αυτές μπορεί να εξασφαλίζουν μόνο φιλτραρισμένη τάση εξόδου και όχι παροχή ισχύος από την μπαταρία σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος. Να σημειωθεί ότι δεν ενδείκνυται η προστασία εκτυπωτών laser και άλλων αντίστοιχων συσκευών (laser fax, φωτοτυπικά, κ.ά.) με UPS καθώς έχουν υψηλό ρεύμα εκκίνησης.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες UPS, τα Off-Line (Stand By), τα Line Interactive και τα On-Line.

Τα Off Line είναι ο απλούστερος και οικονομικότερος τύπος UPS. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η άμεση τροφοδότηση του φορτίου με την τάση που παρέχει το δίκτυο. Το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας συνδέεται παράλληλα. Όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει κάποια αποδεκτά όρια τότε η τροφοδοσία του φορτίου συνεχίζεται από την μπαταρία. Ο χρόνος μεταγωγής από την παροχή του δικτύου στις μπαταρίες είναι γύρω στα 5 ms. Τα UPS αυτής της κατηγορίας ενσωματώνουν φίλτρα ικανά να απορρίψουν πιθανές αιχμές στην τάση εισόδου, όμως δεν την σταθεροποιούν.

Τα Line Interactive UPS μοιάζουν αρκετά με τα Off-Line όσον αφορά στα επίπεδα κόστους και

απόδοσης. Όμως διαθέτουν επιπλέον σταθεροποιητή τάσης ο οποίος διορθώνει την τάση εισόδου χωρίς την συνδρομή της μπαταρίας με αποτέλεσμα την αύξηση της ανοχής του UPS, την σπανιότερη χρήση της μπαταρίας και επομένως την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της.

Τα On-Line UPS παρέχουν τα υψηλότερα επίπεδα ισχύος εξόδου και την μεγαλύτερη δυνατότητα ρύθμισης της παρεχόμενης τάσης. Το UPS μετατρέπει το ρεύμα εισόδου σε συνεχές (DC) και στην συνέχεια χρησιμοποιεί έναν εναλλάκτη για να δημιουργήσει και πάλι το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) που τροφοδοτεί το φορτίο. Μεταξύ αυτών των δύο κυκλωμάτων μετατροπής παρεμβάλλεται η μπαταρία. Επειδή ο εναλλάκτης είναι συνεχώς ενεργοποιημένος, σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος δεν απαιτείται χρόνος μεταγωγής στην τροφοδοσία από την μπαταρία. Ένα σύστημα On-Line είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την τροφοδοσία ευαίσθητου εξοπλισμού και συσκευών κρίσιμης σημασίας, παρέχει εξαιρετική σταθεροποίηση τάσης, ημιτονοειδή κυματομορφή και έχει μηδενικό χρόνο μεταγωγής.

Η στάθμη ισχύος ενός UPS εκφράζεται σε VA (Volt-Amperes). Για να προσδιορίσουμε το κατάλληλο μέγεθος της μονάδας αθροίζουμε τις απαιτήσεις σε VA όλων των συσκευών μας. Για τον σκοπό αυτόν αρχικά καταρτίζουμε μια λίστα με τις συσκευές που θα τροφοδοτήσουμε. Στην συνέχεια καταγράφουμε τα VA κάθε συσκευής ανατρέχοντας στο πλακίδιο των χαρακτηριστικών λειτουργίας της. Αν η ισχύς αναγράφεται σε Watt τότε υπολογίζουμε τα VA με τον τύπο:  $VA = 1,43 \times W$ . Αν η ισχύς αναγράφεται σε Amperes, τότε υπολογίζουμε τα VA με τον τύπο:  $VA = 230 \times A$ . Ίσως είναι σκόπιμο να προσθέσουμε ισχύ ίση με το 40% αυτής που απαιτείται ώστε να διασφαλιστεί ότι η λειτουργία του UPS δεν θα είναι οριακή καθώς και ότι θα είναι δυνατή η μελλοντική επέκταση των υποστηριζόμενων φορτίων. Αν ο εξοπλισμός προκαλεί στιγμιαίες αιχμές της τιμής του ρεύματος κατά την λειτουργία ή την εκκίνησή του (σκληροί δίσκοι ή άλλα μηχανήματα που χρησιμοποιούν μοτέρ AC) τότε ίσως να χρειάζεται κάποιο φίλτρο εξομάλυνσης ή κάποιο UPS μεγαλύτερης ισχύος.

Η αυτονομία ενός UPS εξαρτάται από την χωρητικότητα (σε Ah) της μπαταρίας. Ο χρόνος αυτονομίας που συνήθως απαιτείται είναι 5 έως 10 λεπτά. Ο συνολικός χρόνος εφεδρικής λειτουργίας με την μπαταρία που δίνουν οι κατασκευαστές είναι για πλήρες φορτίο (100%). Μπορούμε να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση τον χρόνο εφεδρικής λειτουργίας όταν το φορτίο καταναλώνει λιγότερο από το 100% της παρεχόμενης ισχύος ως εξής: υπολογίζουμε πρώτα με τον προαναφερόμενο τρόπο τις συνολικές απαιτήσεις ισχύος (σε VA) του φορτίου και διαιρούμε με την μέγιστη παρεχόμενη ισχύ (VA) του UPS. Αυτό είναι το ποσοστό (%) του φορτίου που έχουμε συνδεδεμένο στο UPS. Για ποσοστό ίσο με το 66% της ισχύος, πολλαπλασιάζουμε τον χρόνο εφεδρικής λειτουργίας που δίνει ο κατασκευαστής επί 2, για ποσοστό 50% πολλαπλασιάζουμε επί 3, για ποσοστό 33% πολλαπλασιάζουμε επί 4, κ.ο.κ. Παραδείγματος χάριν, αν με πλήρες φορτίο ο



συνολικός χρόνος εφεδρικής λειτουργίας είναι 8 λεπτά, τότε με φορτίο 66% θα είναι 16 λεπτά, με φορτίο 50% 24 λεπτά, κ.ο.κ.

Στις Τηλεπικοινωνίες, τα UPS συνήθως συνοδεύονται από ειδικό λογισμικό για να επικοινωνούν με τις συσκευές, π.χ. με υπολογιστές και να εξασφαλίζουν τον ομαλό τερματισμό της λειτουργίας τους. Ο χρόνος λειτουργίας του UPS με τροφοδοσία από την μπαταρία μπορεί να μην επαρκεί στην διάρκεια μιας παρατεταμένης διακοπής του ρεύματος. Όταν δεν βρισκόμαστε δίπλα στον υπολογιστή για να τερματίσουμε εμείς την λειτουργία του, τότε το λογισμικό αναλαμβάνει τον αυτόματο τερματισμό του. Έτσι μετά την λήψη σήματος από το UPS (μέσω της σειριακής ή της USB θύρας) για μειωμένη τάση της μπαταρίας, το λογισμικό μπορεί να κλείσει όλα τα ανοικτά αρχεία του συστήματος, να αποθηκεύσει τα περιεχόμενα της μνήμης και να τερματίσει την λειτουργία του υπολογιστή. Επιπλέον, μπορεί να επανεκκινήσει αυτόματα τον υπολογιστή όταν επανέλθει το ρεύμα.

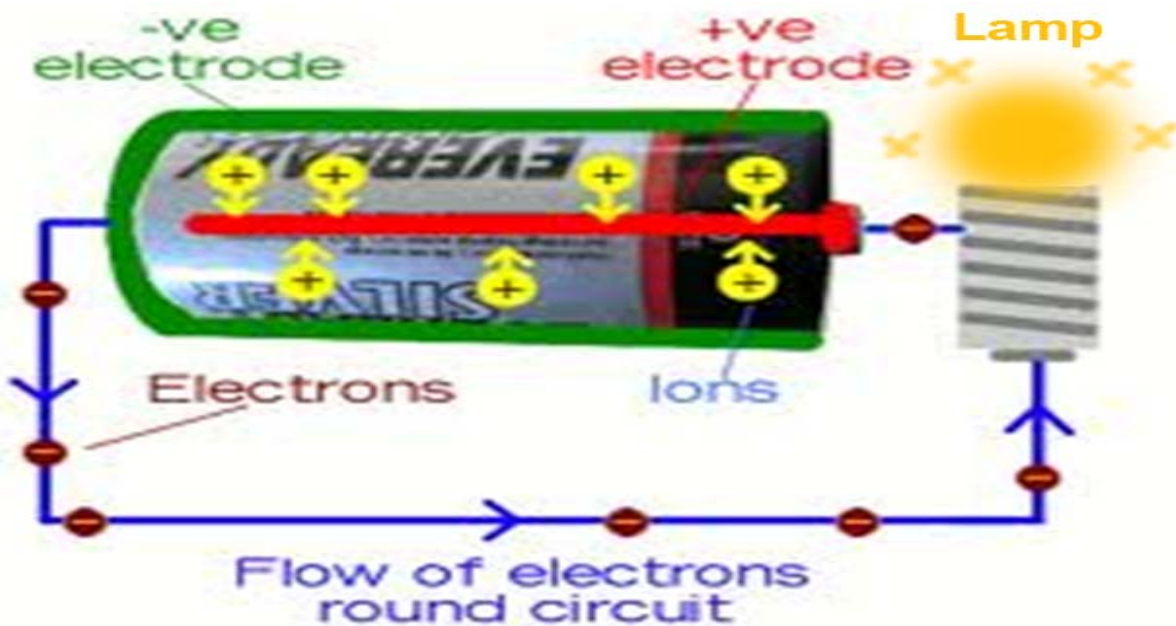
Τα UPS συνήθως χρησιμοποιούνται σε δίκτυα/κέντρα σταθερής και κινητής τηλεφωνίας, σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα και δίκτυα μεταφοράς.

### **2.1.2 Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή – Τεχνολογία μπαταριών**

Τελευταία, η εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας επικεντρώνεται κυρίως στις διατάξεις αποθήκευσης τύπου μπαταρίας. Μια μπαταρία (ή αλλιώς συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψει σε χημική και όταν χρειαστεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Σχηματίζεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο πλάκες, φτιαγμένες από διαφορετικά μέταλλα και βυθισμένες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες πρέπει να είναι αγώγιμες, ονομάζονται ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό είναι και αυτό αγώγιμο και καλείται ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν χημικά με τον ηλεκτρολύτη και η αντίδραση περιλαμβάνει την μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου. Δηλαδή, η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας). Η εκφορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ ταυτόχρονα αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται σχηματικά η δομή κάθε ηλεκτρικού στοιχείου. Το αρνητικό

ηλεκτρόδιο, ή αλλιώς άνοδος, παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα/φορτίο και οξειδώνεται κατά την διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ακολούθως, το θετικό ηλεκτρόδιο, ή αλλιώς κάθοδος, δέχεται τα ηλεκτρόνια και κατά συνέπεια μειώνεται το θετικό του φορτίο κατά την διάρκεια της αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων μεταξύ ανόδου και καθόδου. Τέλος, για ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 34: Διάγραμμα μπαταρίας

Σήμερα χρησιμοποιούνται ή τελούν υπό ανάπτυξη μια πληθώρα τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης τύπου μπαταρίας. Προς το παρόν εμπορικά διαθέσιμες είναι οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου οξέος και οι VRLA (ρυθμιζόμενες με βαλβίδα μολύβδου οξέος), καθώς επίσης και μερικές αλκαλικές μπαταρίες (NiCd, NiMH). Ορισμένες εξελιγμένες μπαταρίες που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης είναι οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμιδίου, οι μπαταρίες λιθίου, οι μπαταρίες νατρίου θείου και οι μπαταρίες μετάλλου αέρα.

### Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead Acid Batteries)

Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου οξέος είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ) για τον σχηματισμό του ηλεκτροδίου καθόδου, μολύβδο ( $Pb$ ) για τον σχηματισμό του ηλεκτροδίου ανόδου και θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ) που ενεργεί ως ηλεκτρολύτης. Η τάση ενός ηλεκτρικού στοιχείου μολύβδου οξέος εκτιμάται στα 2 Volt και η τυπική

ενεργειακή πυκνότητα είναι περίπου 30 Wh/kg, με πυκνότητα ισχύος γύρω στα 180 W/kg. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ παρουσιάζουν ικανοποιητικές ενεργειακές αποδόσεις, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 60 και 95%, εγκαθίστανται εύκολα, απαιτούν χαμηλού επιπέδου συντήρηση και παρουσιάζουν χαμηλό κόστος επένδυσης. Ακόμα, τα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης για αυτό το είδος μπαταριών είναι πολύ χαμηλά (γύρω στο 2 έως 5% ανά μήνα), καθιστώντας τις μπαταρίες οξέος μολύβδου ιδανικές για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.

Εντούτοις, οι περιοριστικοί παράγοντες για αυτό το είδος μπαταριών είναι ο σχετικά χαμηλός αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης και η λειτουργική διάρκεια ζωής τους. Η τυπική διάρκεια ζωής των μπαταριών κυμαίνεται μεταξύ 300 και 1500 κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης επηρεάζεται αρνητικά από το βάθος εκφόρτισης και την θερμοκρασία. Οι προσπάθειες για πλήρη εκφόρτιση της μπαταρίας μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικές για τα ηλεκτρόδια, μειώνοντας έτσι την διάρκεια ζωής. Όσον αφορά στα επίπεδα θερμοκρασιών, οι υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 45°C, που είναι το ανώτερο όριο για την λειτουργία των μπαταριών) δύνανται να βελτιώσουν την απόδοση των μπαταριών από την άποψη της υψηλότερης χωρητικότητας, καθώς επίσης και την ενεργειακή τους απόδοση.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με την μορφή μπαταρίας μολύβδου οξέος, λόγω του χαμηλού τους κόστους, έχουν κυριαρχήσει στην αγορά. Συγκεκριμένα είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές της αιολικής ενέργειας έχει προταθεί η αποθήκευση ισχύος της τάξης των 100 MW ή περισσότερο σε τέτοιου είδους μπαταρίες.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η τεχνολογία μπαταριών εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ βελτιώνεται σταδιακά και με ποικίλους τρόπους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μπαταρίες VELA, που χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, με την διαφορά ότι αυτές φράσσονται με μια βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης. Επιπλέον, ο όξινος ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης νερού στις κυψέλες για να διατηρείται η σωστή λειτουργία του ηλεκτρολύτη ή ανάμειξης του ηλεκτρολύτη για να αποτρέπεται η διαστρωμάτωση. Η ανακύκλωση του οξυγόνου και οι βαλβίδες των VELA αποτρέπουν τον εξαερισμό των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου, καθώς και την είσοδο αέρα στις κυψέλες.

Το υποσύστημα των μπαταριών αυτών μπορεί να χρειάζεται να αντικαθίσταται συχνότερα από ότι στις μπαταρίες μολύβδου οξέος, αυξάνοντας το σταθμισμένο κόστος του συστήματος. Οι μπαταρίες VELA παρουσιάζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι των μπαταριών εμβάπτισης σε οξύ. Πρώτον, μειώνεται δραματικά η απαραίτητη συντήρηση για να διατηρείται η μπαταρία

σε λειτουργία. Επίσης, οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη, οπότε έτσι μειώνεται το ίχνοσ και το βάρος της μπαταρίας. Τα μειονεκτήματα των VELA είναι ότι είναι λιγότεροι στιβαρές από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, ενώ είναι πιο ακριβές και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Οι VELA υποτίθεται πως δεν χρειάζονται συντήρηση και θεωρούνται ασφαλείς, ενώ έχουν καταστεί δημοφιλείς για την εφεδρική τροφοδοσία ισχύος σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, καθώς επίσης και για την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να διατεθούν ειδικοί χώροι για την τοποθέτηση των μπαταριών.

### **Αλκαλικές μπαταρίες**

Οι αλκαλικές μπαταρίες είναι κυρίως οι μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd), νικελίου υδριδίου μετάλλου (NiMH) και νικελίου ψευδαργύρου (NiZn). Και οι τρεις αυτοί τύποι χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη, το οποίο είναι υδροξείδιο του νικελίου και υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου με υδροξείδιο του λιθίου αντίστοιχα. Όσον αφορά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, η μπαταρία νικελίου καδμίου (NiCd) χρησιμοποιεί υδροξείδιο του καδμίου ως αρνητικό ηλεκτρόδιο, η νικελίου υδριδίου μετάλλου (NiMH) ένα κράμα μετάλλων και η νικελίου ψευδαργύρου (NiZn) υδροξείδιο του ψευδαργύρου.

Η τάση για τις αλκαλικές μπαταρίες εκτιμάται γύρω στα 1.2 Volt (1,65 Volt για τον τύπο NiZn), ενώ οι τυπικές μέγιστες ενεργειακές πυκνότητες είναι υψηλότερες από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος. Συγκεκριμένα, η μπαταρία NiCd παρουσιάζει ενεργειακή πυκνότητα 50 Wh/kg, η NiMH 80 Wh/kg και η NiZn 60 Wh/kg. Η τυπική διάρκεια ζωής λειτουργίας και ο αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών NiCd και NiMH οξέος (1000 - 2000 κύκλοι) είναι επίσης υψηλότεροι των μπαταριών μολύβδου οξέος, ενώ η μπαταρία NiZn εμφανίζει παρόμοια ή μικρότερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος. Τέλος και τα τρία αυτά είδη μπαταριών νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως και  $-50^{\circ}\text{C}$ ), ενώ παράλληλα μπορούν να επαναφορτιστούν ταχέως.

### **Μπαταρίες λιθίου (Lithium Batteries)**

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται σήμερα σε ένα τεράστιο εύρος ηλεκτρικών συσκευών, από τα κινητά τηλέφωνα μέχρι τα υβριδικά οχήματα. Μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας ανά μονάδα βάρους (περιέχουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας). Έτσι παρατείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ είναι πιο ελαφριά αφού το λίθιο είναι το πιο ελαφρύ μέταλλο. Μπορούμε επίσης να επαναφορτίσουμε την μπαταρία ιόντων λιθίου όποτε μας βολεύει χωρίς να χρειάζεται πλήρη φόρτιση ή πλήρη αποφόρτιση, πράγμα το οποίο απαιτούν οι άλλες μπαταρίες για

καλύτερη απόδοση. Για τον λόγο αυτόν εξασφαλίζουν καλύτερη απόδοση στα οχήματα, μεγάλη αυτονομία σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολυβδου και έχουν διπλάσια αυτονομία και πενταπλάσια διάρκεια ζωής. Ο όρος μπαταρία λιθίου ή συσσωρευτής λιθίου αναφέρεται σε μια κατηγορία μπαταριών με διαφορετική σύνθεση, περιλαμβάνοντας πολλούς τύπους καθοδικών ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών.

Οι μπαταρίες λιθίου διακρίνονται σε:

- Ιοντικές μπαταρίες λιθίου (όπου συμπεριλαμβάνονται και οι πολυμερείς μπαταρίες λίθιου). Συνήθως είναι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές όπως ο φορητός υπολογιστής, τα κινητά τηλέφωνα, συσκευές MP3, συσκευές DVD, συστήματα πλοήγησης GPS, κάμερες και ηλεκτρικά εργαλεία.
- Μπαταρίες μετάλλων λιθίου (όπου συμπεριλαμβάνονται και οι μπαταρίες κραμάτων λίθιου). Οι συγκεκριμένες είναι επαναφορτιζόμενες ή μίας χρήσης μπαταρίες που έχουν το μέταλλο λιθίου και χρησιμοποιούνται γενικά σε μικρές, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως ρολόγια, θερμομέτρα, υπολογιστές τσέπης, ηλεκτρονικές κλειδαριές αυτοκινήτου, εφεδρικές μπαταρίες υπολογιστών ή επικοινωνιακού εξοπλισμού. Το στοιχείο λιθίου ιόντων έχει ένα θετικό ηλεκτρόδιο που περιέχει οξείδιο του λιθίου. Τα ιόντα του λιθίου μεταφέρονται κατά την φόρτιση ή την εκφόρτιση από το ένα στο άλλο ηλεκτρόδιο, μέσω ενός πορώδους διαχωριστικού φύλλου εμβαπτισμένου σε ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία λιθίου ιόντων έχουν ονομαστική τάση 3,7 V και προσφέρονται σε ελάχιστα μεγέθη και χωρητικότητες (πιο γνωστά τα 450 mAh και 700mAh). Τα στοιχεία λιθίου ιόντων ήταν μία μεγάλη εξέλιξη στον χώρο των ηλεκτρικών στοιχείων, με το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να εκφορτιστούν με ρεύμα μεγαλύτερο από 2C. Για ασφάλεια από υπερβολικό ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης πρέπει να έχουν ενσωματωμένο ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα προστασίας. Χωρίς αυτό το κύκλωμα η χρήση τους εγκυμονεί κινδύνους έκρηξης. Το κύκλωμα αυτό ανοίγει όποτε η τιμή του ρεύματος ξεπεράσει το ασφαλές όριο, αλλά δεν επανέρχεται (δεν ξανακλείνει) μόνο του, παρά μόνο αν αποσυνδεθεί πρώτα η μπαταρία από την κατανάλωση και συνδεθεί εκ νέου. Η φόρτιση των στοιχείων λιθίου ιόντων γίνεται με ειδικό φορτιστή ή ειδικό πρόγραμμα σε σύνθετο φορτιστή. Δεν κάνει να χρησιμοποιηθεί για την φόρτισή τους πρόγραμμα για στοιχεία λιθίου ιόντων πολυμερούς, γιατί το τελευταίο δίνει μεγαλύτερη τάση από την επιτρεπόμενη για τα στοιχεία λιθίου ιόντων (ενώ επιτρέπεται το αντίστροφο).
- Στοιχεία λιθίου ιόντων πολυμερούς. Σήμερα τα πλέον διαδεδομένα επαναφορτιζόμενα στοιχεία λιθίου είναι τα επονομαζόμενα λιθίου πολυμερούς. Αυτά στην πραγματικότητα είναι στοιχεία λιθίου ιόντων πολυμερούς και πληροφοριακά αναφέρουμε ότι υπάρχουν και

αυθεντικά στοιχεία λιθίου πολυμερούς, τα οποία όμως δεν μπορούν να αποδώσουν σε θερμοκρασίες κάτω από 60°C. Στο στοιχείο του λιθίου ιόντων πολυμερούς, το πορώδες διαχωριστικό φύλλο έχει αντικατασταθεί από ένα φύλλο συμπαγούς πολυμερούς υλικού, που να μην είναι μη αγώγιμο στον ηλεκτρισμό, αλλά επιτρέπει να περάσουν τα ιόντα. Τα ηλεκτρόδια στην περίπτωση αυτή είναι λίθιο στην κάθοδο και γραφίτης (άνθρακας) στην άνοδο. Τα στοιχεία λιθίου ιόντων πολυμερούς έχουν ονομαστική τάση 3,7V και η πρακτική περιοχή τάσης είναι από 4,2V όταν είναι φρεσκοφορτισμένα έως 3V όταν εκφορτιστούν. Η εξωτερική διαφορά από τα στοιχεία λιθίου ιόντων είναι ότι περικλείονται σε μαλακό περίβλημα που λέγεται φάκελος. Αυτό το γεγονός τα κάνει να είναι πολύ ελαφριά συγκριτικά με όλα τα άλλα στοιχεία και αποκλείει τον κίνδυνο έκρηξης, αφού δεν μπορεί να αναπτυχθεί μεγάλη πίεση στο εσωτερικό του στοιχείου, όχι όμως και τον κίνδυνο ανάφλεξης όπως θα δούμε στην συνέχεια. Ένα χαρακτηριστικό για τις συγκεκριμένες μπαταρίες που χρειάζεται προσοχή είναι ότι η εργασία για την σύνδεση μεμονωμένων στοιχείων μεταξύ τους είτε σε σειρά είτε παράλληλα, μέσω των γυμνών ακροδεκτών τους, εγκυμονεί κινδύνους βραχυκυκλώματος, που έχει σαν συνέπεια την πιθανότητα ανάφλεξης του στοιχείου.

Όσον αφορά στην φόρτισή τους, οι μπαταρίες λιθίου όταν φεύγουν από το εργοστάσιο κατασκευής τους έχουν περίπου το 50% του φορτίου τους. Τα στοιχεία λιθίου ιόντων και πολυμερούς λιθίου ιόντων απαιτούν ειδικές παραμέτρους φόρτισης, που μόνο φορτιστές κατασκευασμένοι γι' αυτή την αποστολή (ή τα ειδικά προγράμματα λιθίου ιόντων και πολυμερούς λιθίου ιόντων των σύνθετων φορτιστών) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η μέγιστη τάση φόρτισης ανά στοιχείο (σε σειρά) είναι 4,235V. Στην πράξη η τάση φόρτισης ορίζεται στα 4,2V ή στα 4,15V για περισσότερη ασφάλεια. Αντίστοιχα, ο γενικός κανόνας ορίζει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης στο 1C, ενώ στο μέλλον αυτό σίγουρα θα βελτιωθεί. Αν οι τιμές της τάσης ή της έντασης κατά την φόρτιση είναι μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες, υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης ενός ή περισσότερων στοιχείων. Η φλόγα που βγαίνει από ένα στοιχείο πολυμερούς λιθίου ιόντων θυμίζει βεγγαλικό και φθάνει τα 3-4 μέτρα. Το ρεύμα φόρτισης αρχικά είναι 1C, αλλά μειώνεται βαθμηδόν καθώς η μπαταρία φορτίζεται και όταν η τάση του στοιχείου φθάσει τα 4,2V, στο τέλος της φόρτισης η ένταση έχει πέσει στο 0,1-0,2C. Με αρχική ένταση το 1C, η μπαταρία θα επανακτήσει το 90% της χωρητικότητάς της σε μία ώρα, ενώ το υπολοιπούμενο 10% απαιτεί 45-50 ακόμη λεπτά. Φορτίζοντας με ρεύμα μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο, δεν θα κερδηθεί χρόνος που να αντισταθμίζει την αναμενόμενη μείωση της ζωής της μπαταρίας και της χωρητικότητάς της ή τον κίνδυνο ανάφλεξης των στοιχείων. Η φόρτιση μπορεί να γίνει με τα στοιχεία σε σειρά ή παράλληλα ή και σε συνδυασμό των δύο. Σε κάθε περίπτωση τα στοιχεία πρέπει να είναι ακριβώς τα ίδια και δεν εννοούμε το τι γράφει η ετικέτα αλλά το να συμπεριφέρονται ακριβώς όμοια

μεταξύ τους, πράγμα όχι τόσο εύκολο στην πράξη. Επειδή λοιπόν δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι στην πράξη τα στοιχεία είναι ακριβώς ίδια, μετά το τέλος της φόρτισης, είναι απαραίτητο να ελέγχουμε την τάση κάθε ενός στοιχείου χωριστά. Αν υπάρχει στοιχείο που έχει διαφορά τάσης από τα άλλα μεγαλύτερη από 0,05V, το φορτίζουμε ή το εκφορτίζουμε αντίστοιχα μεμονωμένα, για να έρθει στο επίπεδο των υπολοίπων. Επιτρέπεται να φορτίσουμε στοιχεία πολυμερούς λιθίου ιόντων σε φορτιστή ή πρόγραμμα στοιχείων λιθίου ιόντων, αρκεί να επιλέξουμε τον σωστό αριθμό στοιχείων και τιμή ρεύματος το 1C. Αντιθέτως, δεν επιτρέπεται να φορτίσουμε στοιχεία λιθίου ιόντων σε πρόγραμμα στοιχείων πολυμερούς λιθίου ιόντων. Δεν πρέπει να αφήνουμε μόνες τις μπαταρίες λιθίου σε φόρτιση. Χρειάζεται να τις επιβλέπουμε πολύ συχνά και να τις αγγίζουμε με το χέρι για να αισθανθούμε την πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας. Δεν πρέπει να τις φορτίζουμε μέσα στη συσκευή. Στο σπίτι, τοποθετούμε την μπαταρία που φορτίζει μακριά από εύφλεκτα υγρά ή εύφλεκτα αντικείμενα, σε χώρο άκαυστο και καλύτερα την απομονώνουμε σε ένα χώρο που διαχωρίζουμε περιμετρικά με τούβλα ή μέσα μεταλλικό κουτί ή μέσα σε γυάλινο δοχείο. Επίσης, δεν φορτίζουμε μπαταρίες λιθίου μέσα στο αυτοκίνητο. Εάν περάσει ο προβλεπόμενος χρόνος φόρτισης και δεν έχει φορτίσει πλήρως η μπαταρία, σταματάμε την φόρτιση και θεωρούμε την μπαταρία αυτή εκτός χρήσης. Επίσης η φόρτιση πρέπει να σταματήσει οπωσδήποτε αν σύμφωνα με την ένδειξη του φορτιστή έχει περάσει από αυτόν χωρητικότητα μεγαλύτερη από το 1,05C της μπαταρίας. Δηλαδή για μία εκφορτισμένη μπαταρία 700mAh δεν πρέπει να περάσει περισσότερο από 735mAh. Τέλος αν η μπαταρία φουσκώσει, σημαίνει ότι έχει υπερφορτιστεί και πρέπει να χαρακτηριστεί εκτός χρήσης. Επειδή η τάση φόρτισης είναι πολύ κρίσιμη, κυκλοφορούν ειδικά κυκλώματα ελέγχου τάσης (προστασίας από υπέρταση) που παρεμβάλλονται στο κύκλωμα φόρτισης, όταν δεν υπάρχει εμπιστοσύνη ως προς τον φορτιστή.

Οι διάφορες μάρκες ορίζουν διαφορετικές τιμές κατώτατης ασφαλούς τάσης για κάθε στοιχείο. Η εταιρεία Kokam ορίζει ότι τάση ενός εκφορτισμένου στοιχείου πολυμερούς λιθίου ιόντων δεν πρέπει να πέσει πιο κάτω από 3,0V σε ηρεμία ή από 2,5V υπό φορτίο. Αν η τάση πέσει σε χαμηλότερες τιμές από αυτές που ορίζει η εταιρεία του στοιχείου, το στοιχείο θα καταστραφεί. Όλα τα στοιχεία δεν είναι της ίδιας μάρκας και πάλι, από αυτά της ίδιας μάρκας, δεν είναι όλα της ίδιας γενιάς ή της ίδιας παρτίδας. Έτσι δεν μπορούμε να ορίσουμε εδώ το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης με ένα πολλαπλάσιο του C, όπως κάναμε για άλλα είδη στοιχείων, Η πρώτη γενιά στοιχείων πολυμερούς λιθίου ιόντων περιόριζε το ρεύμα εκφόρτισης στα 2- 3C και η δεύτερη γενιά στα 5-6C. Σήμερα υπάρχουν στοιχεία που επιτρέπουν εκφόρτιση με 8-20C, όχι βέβαια χωρίς μείωση της ωφέλιμης χωρητικότητας τους ή ακόμα και της ζωής τους. Ο περιορισμός της έντασης εκφόρτισης ανά στοιχείο, μπορεί να ξεπεραστεί αν ενώσουμε δύο ή περισσότερα ίδια στοιχεία παράλληλα. Για

παράδειγμα, αν ένα στοιχείο μπορεί να εκφορτιστεί με ρεύμα 5A, ενώνοντας δύο ίδια παράλληλα μπορούμε να πάρουμε ρεύμα 10A, με τρία ίδια παράλληλα να πάρουμε ρεύμα 15A, κ.ο.κ. Όταν κάποια μπαταρία πολυμερούς λιθίου ιόντων εκφορτίζεται με ρεύμα πολύ μεγαλύτερο από ότι συνιστάται, για αρκετά λεπτά της ώρας η θερμοκρασία των στοιχείων θα ανέβει σε σημείο που μέσω μιας χημικής αντίδρασης θα αυξηθεί η εσωτερική αντίσταση των στοιχείων. Αν αυτό γίνει, η ισχύς της μπαταρίας ελαττώνεται.

Οι μπαταρίες λιθίου έχουν μικρό βαθμό εκφόρτισης στην αποθήκευση. Θεωρητικά αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να τις φορτίσουμε σήμερα και να τις χρησιμοποιήσουμε μετά από 6 μήνες. Όμως στην πράξη τα πράγματα είναι διαφορετικά. Οι μπαταρίες πολυμερούς λιθίου ιόντων δεν πρέπει να μένουν πλήρως φορτισμένες για περισσότερο από έναν μήνα. Εάν τις αποθηκεύσουμε με πλήρη ενέργεια και για μεγάλο διάστημα, θα μειωθεί η δυνατότητα να ανακτούν όλη την ονομαστική χωρητικότητα τους. Παράλληλα, στην μακρόχρονη αποθήκευση πρέπει να ελέγχουμε ότι η τάση τους δεν θα πέσει κάτω από τα 3,0V (ανά στοιχείο). Αν φοβόμαστε ότι πλησιάζει η στιγμή που θα συμβεί κάτι τέτοιο, θα τις φορτίσουμε στο 5-10%. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να επιχειρήσουμε να ανοίξουμε το πλαστικό περίβλημά τους. Απορρίπτουμε δε εκτός χρήσης στοιχεία σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένες άλλες οδηγίες, πρώτα το εκφορτίζουμε, μετά ανοίγουμε τρύπες στο μαλακό περίβλημά του και μετά το πετάμε στα οικιακά σκουπίδια. Οι μπαταρίες λιθίου θεωρούνται φιλικές στο περιβάλλον.

Να σημειώσουμε ότι οι μπαταρίες λιθίου δεν έχουν φαινόμενο μνήμης, όπως είχαν οι παλαιότερες τεχνολογίες. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, οι συμπληρωματικές φορτίσεις στις παλαιότερου τύπου μπαταρίες, π.χ, τις αφήναμε να εκφορτίσουν ως το 80% και μετά φορτίζαμε, είχαν κακή επίδραση πάνω τους. Η μπαταρία από κάποιο σημείο και μετά είχε μνήμη πως στο 80% πήγαινε για πλήρη εκφόρτιση και όταν κάποια στιγμή θέλαμε να εκφορτίσουμε περισσότερο, η μπαταρία θεωρούσε πως δεν είχε άλλη ενέργεια μέσα της. Έτσι, το ιδανικό σε εκείνες τις μπαταρίες ήταν να τις αφήνουμε να αδειάσουν εντελώς πριν τις βάλουμε πάλι στην φόρτιση, ενώ στις λιθίου δεν υπάρχει κανένα τέτοιο όφελος, το αντίθετο μάλιστα.

Βέβαια, οι μπαταρίες λιθίου θεωρούνται ως επικίνδυνα αγαθά εξαιτίας του γεγονότος ότι μπορούν να υπερθερμανθούν και να αναφλεχθούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Οι μπαταρίες λιθίου, ήρθαν να επιλύσουν προβλήματα των παλαιότερων τεχνολογιών, όπως το φαινόμενο μνήμης όμως παράλληλα πρόσθεσαν και νέα προβλήματα. Ο λόγος που θεωρούνται επικίνδυνες κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι πως τα ενεργά χημικά συστατικά που τις απαρτίζουν διαχωρίζονται από κάποιο μονωτικό υλικό, εσωτερικά των κελιών της μπαταρίας, το οποίο εάν διαρραγεί και τα χημικά έρθουν απότομα σε επαφή, τότε η αντίδραση είναι βίαιη και παράγει μεγάλη ποσότητα αερίων και ανεβάζει πολύ υψηλή θερμοκρασία. Ο συνδυασμός αυτός είναι που τις κάνει επικίνδυνες γιατί η

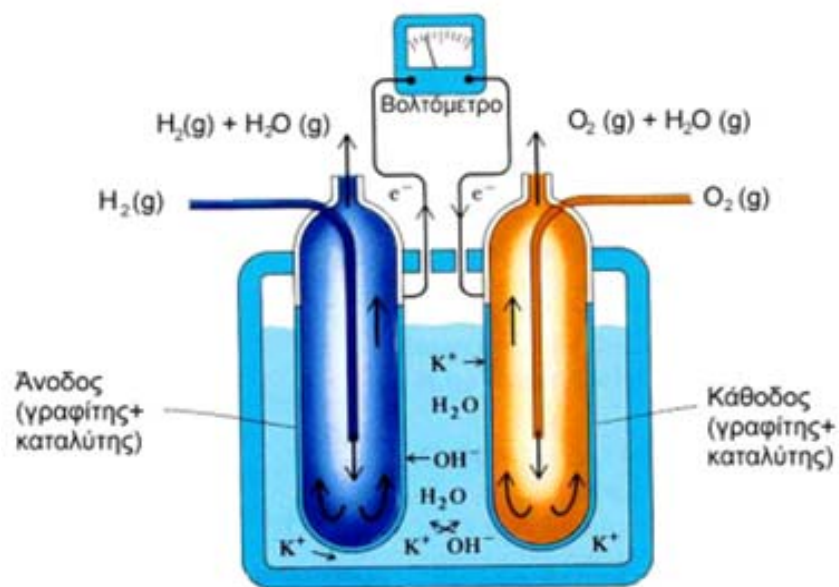
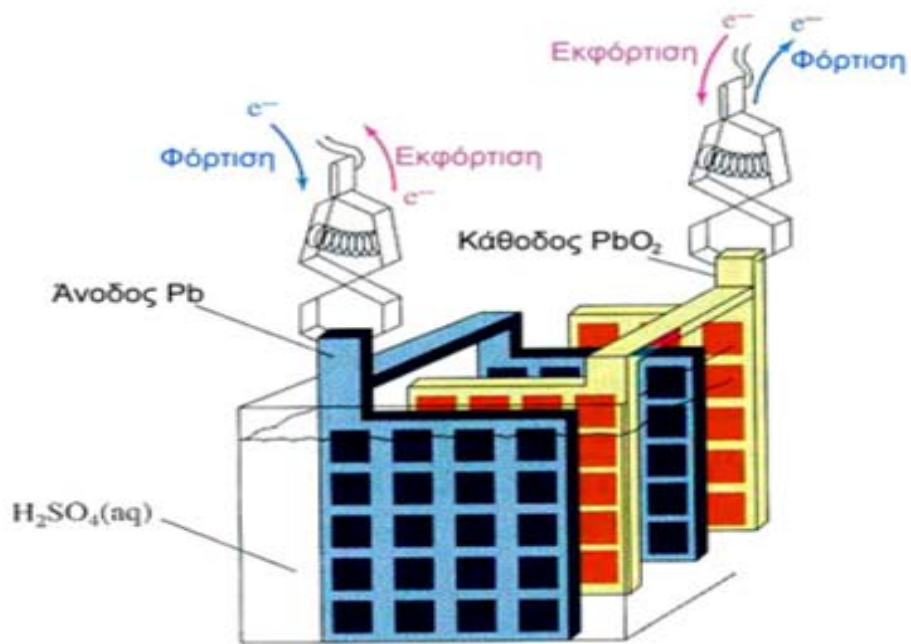


βίαη εκτόνωση θα προκαλέσει έκρηξη. Αυτό το πρόβλημα δεν υπήρχε σε καμία παλαιότερη τεχνολογία κατασκευής όπως οι Ni-Cd και η Ni-MH.

Συνοπτικά, να αναφέρουμε ότι οι μπαταρίες λιθίου επιλέχθηκαν, παρά τον κίνδυνο που ενδεχομένως ενέχουν, γιατί ήταν η καλύτερη τεχνολογία με πολλά θετικά χαρακτηριστικά, όπως η δυνατότητα υψηλής παροχής ρεύματος, η απάλειψη του φαινομένου μνήμης και η μεγαλύτερη χωρητικότητα ενέργειας σε μικρότερο όγκο. Το πρόβλημα της επικινδυνότητας επιλύθηκε με ηλεκτρονικές μεθόδους. Κάθε συστοιχία μπαταριών λιθίου περιέχει εσωτερικά ένα ενεργό έξυπνο κύκλωμα ελέγχου της κατάστασης λειτουργίας των κελιών, διαθέτοντας επεξεργαστή και μνήμη. Η μπαταρία του laptop μας είναι ένας μικρός υπολογιστής δηλαδή, ο οποίος και επικοινωνεί με τον υπολογιστή μας συνεχώς, ώστε να του αναφέρει την κατάστασή της, πιθανές ανωμαλίες στην λειτουργία, την κατάσταση φόρτισης και όλα τα συναφή. Σε οποιαδήποτε περίπτωση υπάρξει κάποια δυσλειτουργία, το κύκλωμα ελέγχου διακόπτει την λειτουργία των κελιών ώστε να αποφευχθεί έκρηξη. Μάλιστα είναι τόσο έξυπνο, ώστε αν κάποιος παρέμβει στο εσωτερικό της συστοιχίας και διαταράξει τις ισορροπίες, δηλαδή τις καταμετρημένες τάσεις και τα ρεύματα, το κύκλωμα θέτει εκτός οριστικά την συστοιχία μπαταριών. Έτσι πήραν έγκριση λοιπόν οι συγκεκριμένες μπαταρίες, μέσω δηλαδή του αυστηρού ελέγχου από ηλεκτρονικό κύκλωμα.

### **Μπαταρίες νατρίου (Sodium Sulphur Batteries, NaS)**

Η μπαταρία νατρίου θείου (NaS) είναι ο πιο εξελιγμένος τύπος υψηλής θερμοκρασίας μπαταρίας. Χρησιμοποιεί υγρό (τηγμένο) θείο ως υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και υγρό λιωμένο νάτριο για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα στερεό ηλεκτρολύτη από αλουμίνιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου του και να αντιδράσουν με το θείο σχηματίζοντας τα πολυσουλφίδια νατρίου.

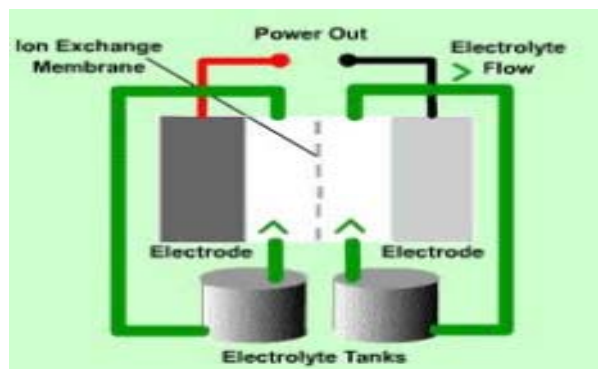


Σχήμα 35: Δομή στοιχείου NaS

Οι μπαταρίες NaS παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 150-240 Wh/kg. Ακόμη, η διάρκεια ζωής τους εκτιμάται στα 15 έτη (ή 2500-4500 κύκλοι), ενώ η ενεργειακή τους απόδοση φθάνει και το 90%. Οι μπαταρίες NaS μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια οικονομικά αποδεκτή διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης, η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό χρόνο εκφόρτισης. Τα ικανοποιητικά αυτά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους τις καθιστούν κατάλληλες για την αποθήκευση μεγάλου ποσού αιολικής ενέργειας. Μπορούν να τροφοδοτούν το σύστημα με υψηλό ποσό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή με μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Τέλος, όσον αφορά στην περιβαλλοντική «συμβατότητα» των μπαταριών NaS, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες από τη χρήση τους είναι περιορισμένες, δεδομένου ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται περιβαλλοντικά αδρανή υλικά. Εγκυμονεί βέβαια μικρός κίνδυνος από τις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να λειτουργήσουν, προκειμένου να διατηρήσουν το θείο στην λιωμένη του μορφή. Αυτήν την περίοδο, οι μπαταρίες νατρίου θείου (NaS) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος (για να βελτιώσουν δηλαδή την ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου) ή σε εφαρμογές εξομάλυνσης αιχμών.

### **Μπαταρίες ροής (Flow Batteries)**

Οι μπαταρίες ροής είναι κατάλληλες για να αποθηκεύουν υψηλές ποσότητες ισχύος, κυμαινόμενες από 5 έως 500 MW, για περιόδους διάρκειας από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 12 ώρες. Οι μπαταρίες αυτού του είδους αποθηκεύουν και αποδεσμεύουν την ενέργεια μέσω μιας αντίστροφης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών. Ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε χωριστές δεξαμενές, από τις οποίες ρέει μέσα σε σωλήνες, συγκρατώντας την συναρμολόγηση των ηλεκτροδίων της μπαταρίας. Αυτή η διάταξη διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους ογκομετρικούς περιορισμούς που τίθενται σχετικά με την ποσότητα του ηλεκτρολύτη που μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σύστημα και ως εκ τούτου αυξάνει και την ποσότητα της ισχύος που μπορεί να αποθηκευτεί.



*Σχήμα 36: Μπαταρία ροής*

Η ηλεκτροχημική απελευθέρωση της ενέργειας εμφανίζεται όταν οι δύο διαφορετικές ενώσεις άλατος (ηλεκτρολύτες) φέρονται κοντά η μία στην άλλη μέσα στην κυψέλη, χωριζόμενες από μία μεμβράνη ροής ιόντων. Η ροή ρεύματος μέσω της μεμβράνης δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια και κατά συνέπεια ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτή η ροή ρεύματος συνοδεύεται από χημικές μεταβολές και στους δύο ηλεκτρολύτες. Αυτές οι μεταβολές αναιρούνται αν κατά την διάρκεια του κύκλου επαναφόρτισης εφαρμοστεί εξωτερικά στα ηλεκτρόδια ένα αντίστροφο δυναμικό. Με αυτόν τον τρόπο οι συνδεδεμένοι ηλεκτρολύτες επιστρέφουν στην αρχική ηλεκτροχημική τους κατάσταση.

Αυτή την περίοδο, τρεις μπαταρίες ροής που βρίσκονται στο τελευταίο στάδιο ανάπτυξης είναι οι ψευδαργύρου βρωμιδίου (zinc bromine flow battery), οι οξειδοαναγωγής βαναδίου (vanadium redox batteries, VRB) και οι πολυσουλφιδίου βρωμιδίου (polysulphide bromide batteries, PSB). Το πρώτο σύστημα, βασισμένο στην τεχνολογία των μπαταριών ροής και συγκεκριμένα στις μπαταρίες πολυσουλφιδίου βρωμιδίου, άρχισε να κατασκευάζεται στο Little Harford της Αγγλίας, μαζί με μια εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου, με στόχο την εξομάλυνση των φορτίων. Είχε προβλεφτεί να λειτουργήσει το 2003, αλλά λόγω ορισμένων καθυστερήσεων δεν λειτούργησε τελικά και το 2004 οι Regenesys σταμάτησαν την ανάπτυξη των μπαταριών τύπου πολυσουλφιδίου βρωμιδίου. Το σύστημα αυτό είχε δύο δεξαμενές 1800 κυβικών μέτρων που περιείχαν υγρούς ηλεκτρολύτες πολυσουλφιδίων νατρίου και βρωμιδίων νατρίου. Είχε επίσης προγραμματιστεί χωρητικότητα των 120MWh, με ισχύ αιχμής των 15MW, διάρκεια ζωής 15 έτη και ενεργειακή απόδοση 60-65% με χρόνο εκφόρτισης λιγότερο από 100 ms, Επρόκειτο δηλαδή για την μεγαλύτερη μπαταρία παγκοσμίως.

### **Μπαταρίες μετάλλου αέρα (Metal Air Batteries)**

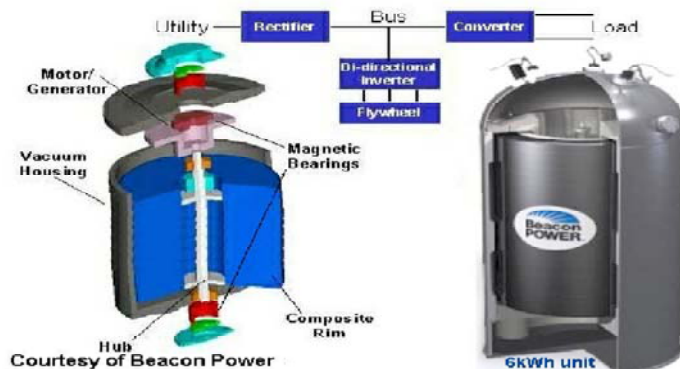
Οι μπαταρίες μετάλλου αέρα είναι υπό συνεχή έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη ώστε να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες. Σε αυτές τις μπαταρίες, ως αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα, όπως είναι το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος ή ακόμη και σίδηρος, τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο ηλεκτρολύτη, π.χ. από κάλιο και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια κατά την μετέπειτα αντίδραση οξείδωσης. Τα ηλεκτρόνια καθώς έλκονται από την κάθοδο καταλύτη και άνθρακα και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας.

Οι ενεργειακές πυκνότητες των μπαταριών μετάλλου αέρα είναι υψηλές (συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος) και κυμαίνονται μεταξύ 110-420 Wh/kg. Ακόμα, είναι από τις πιο φθηνές μπαταρίες και παρουσιάζουν περιβαλλοντική συμβατότητα, αφού κανένα τοξικό υλικό δεν περιλαμβάνεται στην κατασκευή τους. Σημαντικό όμως μειονέκτημά τους είναι η δυσκολία τους να

επαναφορτιστούν, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση της τάξης του 50%, καθώς και το ότι το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας τους είναι περιορισμένο.

### 2.1.3 Μηχανικά συστήματα (σφόνδυλοι)

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels) αναμένεται να έχουν εφαρμογές ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα και κυρίως για την παροχή εφεδρείας και όχι τόσο για την παροχή ενέργειας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται από την περιστροφή μάζας με υψηλή ταχύτητα μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική με την σύνδεση της μάζας με μια γεννήτρια. Το ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε στρεφόμενη μάζα είναι ανάλογο της μάζας του στροφέα και του τετραγώνου της ταχύτητας του στροφέα. Τα τελευταία χρόνια στον σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών η έμφαση έχει μετατοπιστεί από τον σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ταχύτητες μέχρι 40000 rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60000 rpm προβλέπεται για τις επόμενες γενιές.



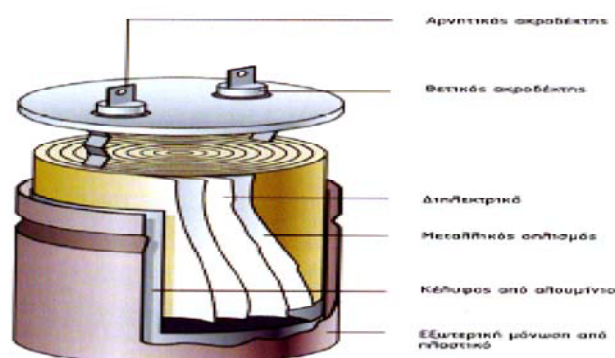
Σχήμα 37: Τυπική διάταξη μονάδας σφονδύλου

Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται από λίγα sec μέχρι και 15-30 λεπτά, βοηθώντας περισσότερο από τις μπαταρίες σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας. Αντίθετα από τις μπαταρίες, οι σφόνδυλοι δεν είναι ευαίσθητοι στην θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει έως το 80-90%, ενώ ο χρόνος ζωής τους τα 15-20 χρόνια με μικρή συντήρηση και εγκατάσταση.

Οι στρεφόμενες μάζες μπορούν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διεύθυνση μονάδων ΑΠΕ εξισορροπώντας τις απότομες και γρήγορες μεταβολές στο φορτίο. Οι μεταβολές αυτού του είδους θα έφθειραν γρήγορα τις μπαταρίες λόγω των περιορισμένων κύκλων ζωής που έχουν.

#### 2.1.4 Οι υπερπυκνωτές

Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Βρίσκονται στους αποταμιευτές φορτίου για ακαριαία εκφόρτιση όπως, για παράδειγμα, στα φλας των φωτογραφικών μηχανών, στα ηλεκτρικά γκλομπς των αστυνόμων, στα συστήματα συγκόλλησης μετάλλων, στα συστήματα ανάφλεξης, στα συστήματα πυροδότησης των αερόσακων και των προεντατήρων ζωνών ασφαλείας. Βρίσκονται, επίσης, στους αποταμιευτές ήπιας εκφόρτισης, όπως το κύκλωμα προσωρινής διατήρησης των δεδομένων στην RAM των εγκεφάλων. Οι πυκνωτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τους ηλεκτροστατικούς, τους ηλεκτρολυτικούς και τους ηλεκτροχημικούς. Αν και το όνομα των τελευταίων παραπέμπει στην αρχή λειτουργίας των μπαταριών, εντούτοις και οι τρεις αυτές κατηγορίες αποθηκεύουν ενέργεια με την μορφή του ηλεκτροστατικού πεδίου (λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς).



Σχήμα 37: Τυπική μορφή συμβατικού πυκνωτή

Οι πυκνωτές, λοιπόν, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα πτώσης της απόδοσής τους ανάλογα με τον αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, ακόμα κι αν οι κύκλοι πλήρους φόρτισης / πλήρους εκφόρτισης ξεπεράσουν τους 100.000. Από την άλλη, είναι ικανοί να αποδώσουν ρεύματα μεγέθους σημαντικά πολλαπλάσιου από εκείνο που θα έκανε μια μπαταρία να εκραγεί. Σε αυτά προστίθεται και ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για την φόρτισή τους, άρα και η αυξημένη δυνατότητά τους να αποθηκεύσουν μεγάλα ποσά ενέργειας που ανακτώνται κατά την πέδηση του οχήματος, καθώς

και η σημαντικά μειωμένη εσωτερική τους ωμική αντίσταση. Έτσι, δημιουργείται η αίσθηση ότι οι πυκνωτές αποτελούν μια πλήρως αξιόπιστη λύση για τα υβριδικά οχήματα. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη διότι υπάρχουν σοβαρά μειονεκτήματα. Κυριότερα από αυτά είναι η μεγάλη μεταβολή της τάσης κατά την εκφόρτιση και ο μεγάλος όγκος (και ως ένα βαθμό το βάρος) που απαιτείται να έχουν. Η ποσότητα του ρεύματος που μπορούν να αποθηκεύσουν οι πυκνωτές εξαρτάται άμεσα από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων τους.

Η απάντηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει δοθεί στην μορφή των υπερπυκνωτών, μια τεχνολογία με ζωή ελάχιστων δεκαετιών, η οποία βασίζεται, μεταξύ άλλων, στην ανάπτυξη ενεργού επιφάνειας σε ολόκληρη την μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτόν έγινε εφικτή η μείωση του συνολικού όγκου σε ένα μικρό μόλις κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών αλλά και ο εντυπωσιακός πολλαπλασιασμός της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους, παρά το ότι εξακολουθεί να υπολείπεται σημαντικά αυτής των μπαταριών.



*Σχήμα 37: Τυπική μορφή υπερπυκνωτή*

Οι υπερπυκνωτές δεν είναι τίποτε άλλο από ηλεκτροχημικοί πυκνωτές (EC capacitors) και συγκεκριμένα, μια παραλλαγή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, όπου, αντί το παραδοσιακό στρώμα του οξειδίου να παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού, η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτόν, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά, χωρίς να πραγματοποιούνται δηλαδή χημικές αντιδράσεις, μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον οργανικό ηλεκτρολύτη και στο ηλεκτρόδιο. Αν και οι αρχές λειτουργίας τους είναι γνωστές εδώ κι έναν αιώνα, η εμπορική εκμετάλλευση των EC άρχισε

στα τέλη της δεκαετίας του 1970 από την NEC, η οποία τους έδωσε το όνομα υπερπυκνωτές (supercapacitors). Η εμπορική ονομασία ultracapacitors τους δόθηκε αργότερα από την Pinnacle και την Maxwell. Η τάση ενός υπερπυκνωτή με υδατώδη ηλεκτρολύτη συνήθως δεν ξεπερνά τα 2V, ενώ εξαίρεση αποτελούν οι πυκνωτές της Maxwell, οι οποίοι λειτουργούν στα 2,5V με όριο τα 2,7V.

Όπως και με τις μπαταρίες, έτσι και με τους πυκνωτές, μπορεί να επιτευχθεί μια αξιοποιήσιμη τάση για την κίνηση των οχημάτων (48-600V) αν τους συνδέσουμε σε σειρά. Δυστυχώς, όμως, ο κάθε πυκνωτής έχει διαφορετικό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, πράγμα που παραβιάζει την ισορροπία τάσεων ανάμεσα στους συνδεδεμένους σε σειρά πυκνωτές. Το πρόβλημα χειροτερεύει καθώς σε κάθε κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης, αυτή η ανισορροπία αυξάνεται, προκαλώντας υπέρταση (βράσιμο του ηλεκτρολύτη και διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο) και κατάρρευση κάποιου ή κάποιων από τους πυκνωτές της συστοιχίας. Για τον λόγο αυτόν, όταν είναι συνδεδεμένοι σε σειρά πάνω από τρεις συμμετρικοί πυκνωτές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε παθητική ισορρόπηση είτε ενεργητική. Στην πρώτη περίπτωση, ο κάθε πυκνωτής έχει ενσωματωμένη μια παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση (φτηνή λύση που μας παρέχει ένα μεγάλο βαθμό αυτοεκφόρτισης, αδειάζοντας τον πυκνωτή μέσα σε μερικές ώρες), ενώ στην δεύτερη περίπτωση γίνεται χρήση ακριβών εξωτερικών ψηφιακών κυκλωμάτων, τα οποία εξισώνουν την τάση όλων των πυκνωτών, περιορίζοντας την τιμή αυτοεκφόρτισης. Βέβαια να σημειώσουμε ότι αν οι ψηφιακοί εξισορροπητές τάσεων αστοχήσουν, οι πυκνωτές μένουν απροστάτευτοι.



*Σχήμα 37: Πυκνωτής που προορίζεται για όχημα*

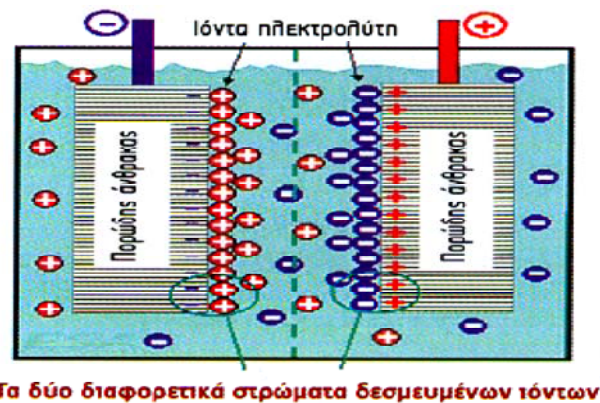
Οι ασύμμετροι πυκνωτές, από την άλλη, δεν χρειάζονται εξισορροπητές τάσεων ενώ, επιπλέον, έχουν και πενταπλάσια πυκνότητα ενέργειας. Έχουν, ωστόσο, μικρότερη πυκνότητα ισχύος και επιπλέον είναι πολωμένοι. Όταν δε η τάση τους πέσει στο μισό, η αποθηκευμένη ενέργειά τους έχει εξαντληθεί κατά τα  $\frac{3}{4}$ . Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διακρίνονται σε ηλεκτρικούς πυκνωτές διπλού



στρώματος (Electric Double Layer Capacitor - EDLC) και σε ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitor). Στην πρώτη περίπτωση, οι οπλισμοί είναι κατασκευασμένοι από ενεργό άνθρακα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, από οξειδία μετάλλων ( $\text{RuO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ) πάνω σε φορέα από ενεργό άνθρακα. Και στις δυο περιπτώσεις, οι οπλισμοί είναι εμβαπτισμένοι σε ηλεκτρολύτη. Οι ψευδοπυκνωτές αντιπροσωπεύουν την τελευταία γενιά των υπερπυκνωτών. Μπορούν να αποθηκεύσουν 80% περισσότερη ενέργεια από έναν ίδιων διαστάσεων EDLC, χάρη στην μεγαλύτερη πυκνότητα των ηλεκτροδίων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από οξειδία μετάλλων. Είναι ασύμμετροι, άρα πολωμένοι, με μεγάλη εσωτερική αντίσταση, συνεπώς ακατάλληλοι για εναλλασσόμενο ρεύμα και επιπλέον εμφανίζουν αυξημένες διαρροές, ενώ χαρακτηρίζονται και από μεγάλη αστάθεια χωρητικότητας. Εξάιρεση αποτελούν αυτοί που τα ηλεκτρόδιά τους χρησιμοποιούν οξειδία  $\text{RuO}_2$  αλλά το μεγάλο τους κόστος προβληματίζει ακόμα και την ίδια την NASA. Σε έναν υπερπυκνωτή, η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια προσδιορίζεται από το μέγεθος των ιόντων στον ηλεκτρολύτη που έλκονται προς το φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Αυτό το φυσικό διηλεκτρικό υλικό έχει πάχος που δεν ξεπερνά τα 10 Angstrom και τέτοιο διηλεκτρικό, προφανώς, είναι αδύνατον να κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Το ηλεκτρικό διπλό στρώμα λειτουργεί σαν μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) και δεν παραβιάζεται εφόσον η τάση δεν ξεπεράσει την επιτρεπόμενη. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε την αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη, άρα και του φυσικού διηλεκτρικού. Ο διαχωριστής, σε αυτήν την περίπτωση, δεν παίζει τον ρόλο του διηλεκτρικού υλικού, απλώς χωρίζει τον ενεργό άνθρακα σε δύο τμήματα. Το αποτέλεσμα, στην πράξη, είναι να έχουμε δυο πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά στη συσκευασία του ενός.

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές αξιοποιούν την επονομαζόμενη χωρητικότητα διπλού στρώματος. Υπάρχουν πολλά θεωρητικά μοντέλα που εξηγούν την δομή του διπλού στρώματος αλλά στην πράξη αξιοποιούνται μόνο τρία: του Helmholtz (από την δεκαετία του 1850), των Guoy – Charman και τέλος των Guoy – Charman - Stern, το οποίο αποτελεί συνδυασμό των δυο πρώτων. Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο, η παρουσία φορτίου (περίσσειμα ή έλλειψη ηλεκτρονίων) σε ένα ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από ενεργό άνθρακα, αντισταθμίζεται από την ανακατανομή ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη (συνήθως ένα μίγμα από προπανονιτρίλιο και άλατα). Έτσι, τα ιόντα που έλκονται από το φορτισμένο ηλεκτρόδιο δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα με ετερόνυμο φορτίο (ως προς το ηλεκτρόδιο) χάρη στην ισορροπία των χημικών και ηλεκτρικών δυνάμεων. Εμβαπτίζοντας, τώρα, μέσα στον ηλεκτρολύτη ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο, δημιουργείται ένας δεύτερος πυκνωτής (δεύτερο διπλό στρώμα) συνδεδεμένος σε σειρά με τον πρώτο. Το μοντέλο αυτό του Helmholtz είναι το πιο απλουστευμένο από όλα και δεν λαμβάνει υπόψη του την διάχυση/μείξη στο διάλυμα (που οδηγεί στην ανομοιόμορφη κατανομή των ιόντων κοντά στα ηλεκτρόδια), την δυνατότητα απορρόφησης ιόντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και την αλληλοεπίδραση ανάμεσα στις διπολικές ροπές του

διαλυτικού και του ηλεκτροδίου. Αντιθέτως, τα άλλα δυο μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους ορισμένους από αυτούς τους περιορισμούς. Παρακάτω διακρίνουμε την σχηματική παράσταση ενός υπερπυκνωτή διπλού στρώματος. Παρατηρούνται ιόντα δεσμευμένα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων αλλά και ελεύθερα. Τα δυο εκατέρωθεν στρώματα δεσμευμένων ιόντων αποτελούν, στην ουσία, δυο ξεχωριστούς πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά.



Σχήμα 38: Σχηματική αναπαράσταση υπερπυκνωτή διπλού στρώματος

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές έχουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα, σε σύγκριση με όλους τους άλλους τύπους πυκνωτών αλλά μικρότερη από αυτή των μπαταριών. Από την άλλη, έχουν μικρότερη εσωτερική αντίσταση από αυτή των μπαταριών αλλά μεγαλύτερη από αυτή των άλλων πυκνωτών. Σε σχέση με τις μπαταρίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η οποία όμως δεν παύει να είναι μικρότερη από αυτήν των υπόλοιπων πυκνωτών, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη του ηλεκτρολύτη (ο οποίος στεγνώνει με την πάροδο του χρόνου ή ξεχειλίζει όταν γίνεται κακομεταχείριση του πυκνωτή). Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνεται και το γεγονός της διαρροής ρεύματος (όταν είναι σε καλή κατάσταση και σε καθαρό περιβάλλον, χάνουν 1,2% της ενέργειας ημερησίως) καθώς και η 'υπόταση' (3V το πολύ). Ταλαιπωρούνται, επίσης, από τις υψηλές θερμοκρασίες (δεν συνίσταται η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες άνω των 65°C) τις οποίες όμως πολύ εύκολα μπορούν να τις 'συναντήσουν' κάτω από το καπό της μηχανής, ενώ παρουσιάζουν ευαισθησία στα καυσαέρια, την υγρασία και τις πιέσεις/δονήσεις. Είναι, όμως, οικολογικοί, δεν αποφορτίζονται ξαφνικά, όπως οι μπαταρίες και προειδοποιούν πάντα για τον θάνατό τους (για παράδειγμα όταν η χωρητικότητά τους έχει μειωθεί κατά 80%, η αντίστασή τους έχει αυξηθεί κατά 200%). Η κατάσταση φόρτισής τους μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με ένα βολτόμετρο και δεν απαιτούν πολύπλοκα συστήματα φόρτισης, καθώς, όταν έχουν γεμίσει, η ένταση του ρεύματος φόρτισης μειώνεται αυτόματα, γεγονός που αποδεικνύεται, κάποιες φορές,

αναγκαίο, όχι για την διατήρηση των ίδιων των υπερπυκνωτών αλλά για την προστασία των υπόλοιπων κυκλωμάτων.

## **2.2 Ανανεώσιμες πηγές και αποθήκευση ενέργειας**

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών, μη ανανεώσιμων καυσίμων αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης μας. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκόσμιων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, αλλά και όλων των ενημερωμένων πολιτών. Η αναζήτηση της απαραίτητης ενέργειας από τον άνθρωπο, η επάρκεια των αποθηκών/πηγών της, η βέβαια και ταχεία εξάντληση μερικών από αυτές, οι βέλτιστοι τρόποι εκμετάλλευσης και εξοικονόμησής της, τα οικονομικά, κοινωνικά και ηθικά προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοβαρή, άλλοτε αλόγιστη χρήση της, καθώς και η μεγάλη και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τους μηχανισμούς και τα συστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας, συνιστούν το ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα, ένα από τα κρισιμότερα, σήμερα, προβλήματα του ανθρώπου.

Τα τελευταία χρόνια είχε ξεκινήσει μια παγκόσμια προσπάθεια για την μείωση αυτών των επιπτώσεων, με την ορθολογική χρήση της ενέργειας και την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησής της. Επιπρόσθετα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), συμβάλλοντας οριστικά στην αειφόρο ανάπτυξη. Πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδάτινη χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες, αφού ανανεώνονται συνεχώς και είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμες από τον άνθρωπο

Αν και είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς τις μορφές ΑΠΕ, εντούτοις δεν παρουσιάζει ποσοστό αξιοποίησής τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Μεταξύ των παραγόντων που συμβάλλουν στην μη επιθυμητή αξιοποίηση των ΑΠΕ μπορεί να αναφερθεί η άγνοια, η καχυποψία για την περιβαλλοντική συμβατότητα των έργων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν. Βέβαια, αξίζει να αναφέρουμε ότι σε παγκόσμιο επίπεδο γίνεται όλο και πιο έντονα αποδεκτό το γεγονός ότι η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ συνδυάζεται και συνεισφέρει στην βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη, σε αντίθεση και συγκριτικά πάντα με τα προβλήματα που προκαλούνται από την εξόρυξη και χρήση των συμβατικών καυσίμων.

### 2.2.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα. Η ακανόνιστη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τους ανέμους. Η θερμότητα που απορροφάται από το έδαφος ή το νερό μεταφέρεται στον αέρα, όπου προκαλεί διαφορές στην θερμοκρασία, την πυκνότητα και την πίεσή του. Με την σειρά τους, οι διαφορές αυτές προκαλούν δυνάμεις που ωθούν τον αέρα ολόγυρα. Σύμφωνα με την Μηχανική των Ρευστών, ο αέρας κινείται από τις υψηλής πίεσης προς τις χαμηλής πίεσης περιοχές του πλανήτη.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ισημερινού και των πόλων προκαλεί τους αληγείς ανέμους, οι οποίοι δρουν ως γιγαντιαίος εναλλάκτης θερμότητας εμποδίζοντας την περαιτέρω θέρμανση του ισημερινού και ψύξη των πόλων. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα, οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του εδάφους και της θάλασσας και μεταξύ των βουνών και των κοιλάδων δημιουργούν συχνά ισχυρές αύρες. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται επίσης και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η περιστροφή της Γης, τα τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η τραχύτητα του εδάφους.

Η ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνεμο είναι κινητική και δίνεται από την σχέση (Ζερβός Αρθούρος, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας):

$$E_{\text{ΚΙΝΗΤΙΚΗ}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (29)$$

Μπορούμε να συνειδητοποιήσουμε την κινητική ενέργεια του ανέμου, αν αναλογιστούμε μια ροή ανέμου που διέρχεται δια μέσου ενός κυλινδρικού σωλήνα επιφάνειας  $A$  με ταχύτητα  $V$ . Εισάγοντας την πυκνότητα του αέρα, υπολογίζουμε την μάζα του αέρα που διέρχεται από την επιφάνεια  $A$  ανά δευτερόλεπτο:

Αντικαθιστώντας την μάζα προκύπτει η κινητική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο:

$$E_{\text{ΚΙΝΗΤΙΚΗ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (30)$$

Όμως, η ισχύς ορίζεται ως ενέργεια ανά δευτερόλεπτο, άρα:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (31)$$

Διακρίνουμε δύο είδη ανεμογεννητριών, τις δίπτερες και τις τρίπτερες. Οι τρίπτερες, με ρότορα μικρότερο των 10 μέτρων, έχουν την δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού. Στις μηχανές μεγάλου μεγέθους επικρατούν οι δίπτερες, με κόστος κατασκευής και συντήρησης

μικρότερο από αυτό των τρίπτερων αντίστοιχου μεγέθους. Η σύγχρονη τεχνολογία χρήσης της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε με μικρές ανεμογεννήτριες δυναμικότητας 20 ως 75 KW, ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες δυναμικότητας 200 ως 2000 KW.



*Σχήμα 39: Εγκατάσταση με ανεμογεννήτριες*

Ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού τους έχουν οι περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Ένα πάρκο ανεμογεννητριών, το οποίο σε ταχύτητα 8m/sec αποδίδει 1600 KW, σε ταχύτητα 4 m/sec αποδίδει μόνο 200 KW. Σημαντικό ρόλο παίζει ο τύπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Η ύπαρξη ανωμαλιών εδάφους, κτιρίων, δέντρων ή εμποδίων γενικά μπορεί να δημιουργήσει στροβιλισμούς και να μειώσει την αποδοτικότητα. Πριν την επιλογή της περιοχής, απαιτείται μελέτη στατιστικών μετεωρολογικών δεδομένων για τις κατευθύνσεις των κυρίαρχων ανέμων για περίοδο ενός χρόνου.

Παρά την μεγάλη αύξηση και βελτίωση τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, η βιομηχανία αιολικής ενέργειας συνεχίζει προκειμένου να επιτύχει ακόμη καλύτερη απόδοση. Οι τοποθεσίες με το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό έχουν ήδη καταληφθεί και οι τοποθεσίες που είναι κατάλληλες μειώνονται διαρκώς, οπότε ο τομέας της αιολικής ενέργειας κινείται στην κατεύθυνση της

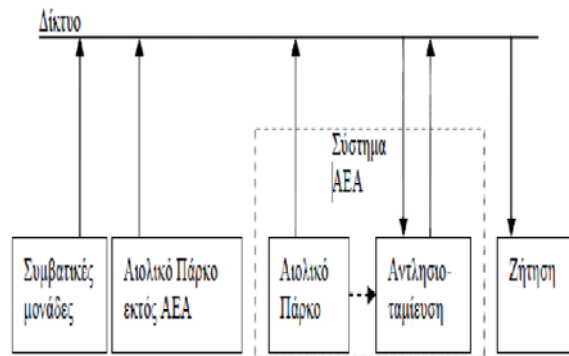
αντικατάστασης των παλαιών και μικρών ανεμογεννητριών με νεότερες και μεγαλύτερης ισχύος. Το ποσοστό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να διεισδύσει σε ένα δίκτυο μπορεί να φθάσει το 40% της εγκατεστημένης ισχύος, εάν η αιολική παραγωγή είναι υψηλή τις στιγμές της μεγάλης ζήτησης. Έχοντας στο σύνολο μεγαλύτερη έκταση δικτύου, μπορεί να αυξηθεί το ποσοστό διείσδυσης αιολικής ενέργειας. Αρκετά σημεία τα οποία επηρεάζουν το ποσό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματωθεί έχουν ήδη αναγνωριστεί. Η εξισορρόπηση και η ενσωμάτωση μεγάλων εκτάσεων βοηθούν στην μείωση των διακυμάνσεων και των λαθών στην πρόβλεψη του ανέμου, όπως επίσης βοηθούν και στην χρήση ακόμη αποδοτικότερων (από πλευράς κόστους) μεθόδων εξισορρόπησης. Η λειτουργία του συστήματος και οι ενεργές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας με λιγότερο από ημέρα μπροστά, βοηθούν ώστε να μειωθούν τα λάθη στην πρόγνωση του ανέμου. Η μετάδοση είναι το σημείο κλειδί για τα οφέλη της άθροισης στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και στην εξισορρόπηση μεγάλων εκτάσεων. Υπάρχει επίσης όφελος όταν προστίθεται αιολική ενέργεια στο σύστημα, αφού μειώνονται τα συνολικά λειτουργικά κόστη και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα καθώς αντικαθίστανται τα ορυκτά καύσιμα. Πράγματι τα πλεονεκτήματα ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας αναμένεται να είναι αρκετά υψηλότερα από τα κόστη, λαμβάνοντας υπόψη και την εξοικονόμηση καυσίμων.

	2005 [MW]	2010 [MW]	2015 [MW]	2020 [MW]	2020 [%]
Belgium	190	733	2049	4320	2
Bulgaria	8	336	964	1256	1
Czech Republic	22	243	493	743	0
Denmark	3129	3584	4180	3950	2
Germany	18415	27676	36647	45750	21
Estonia	31	147	400	650	0
Ireland	494	2088	3151	4649	2
Greece	491	1327	4303	7500	4
Spain	9918	20155	27997	38000	18
France	752	5542	13445	25000	12
Italy	1639	5800	9068	12680	6
Cyprus	0	82	180	300	0
Latvia	26	28	104	416	0
Lithuania	1	179	389	500	0
Luxembourg	35	35	105	131	0
Hungary	n.a.	330	577	750	0
Malta	0	0	7	110	0
Netherlands	1224	2221	5578	11178	5
Austria	694	1011	1951	2578	1
Poland	121	1100	3540	6650	3
Portugal	1063	4256	6125	6875	3
Romania	1	560	3200	4000	2
Slovenia	0	2	60	106	0
Slovakia	5	5	300	350	0
Finland	80	170	670	2500	1
Sweden	536	1873	3210	4547	2
United Kingdom	1565	5430	14210	27880	13
All Member States (total)	40440	84913	142922	213379	100

Σχήμα 40: Συνολική υπολογιζόμενη αιολική ενέργεια χερσαίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη από το 2005 μέχρι το 2020

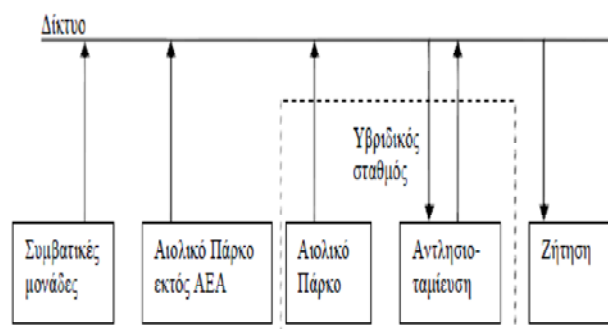
### Διασύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλιοσταμείωση

Η ύπαρξη άμεσης ανεξάρτητης σύνδεσης δίνει την δυνατότητα στα αιολικά πάρκα να παρέχουν την απορριπτόμενη ισχύ στο σύστημα αντλιοσταμείωσης. Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις: Αν  $P_w > R_f$ , τότε το αιολικό πάρκο καλύπτει εξ' ολοκλήρου την στιγμιαία ζήτηση φορτίου και η περίσσεια της παρεχόμενης από αυτό ενέργειας τροφοδοτεί την αντλία του υδροηλεκτρικού συστήματος προκειμένου να αποταμιευτεί μέσω της ανύψωσης του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Αν υποθέσουμε ότι η πάνω δεξαμενή είναι γεμάτη τότε είτε απορρίπτουμε την περίσσεια της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είτε την αξιοποιούμε με κάποιον άλλο τρόπο (π.χ. αφαλάτωση) είτε μειώνουμε την παραγόμενη ισχύ από το αιολικό πάρκο. Αν  $P_w < R_f$ , τότε όλη η ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο διοχετεύεται στην κατανάλωση, ενώ παράλληλα παράγεται ένα επιπλέον ποσό ενέργειας από τον υδροστρόβιλο για την κάλυψη της ζητούμενης ισχύος.



Σχήμα 40: Άμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ (Πηγή: Γεώργιος Κάραλης. Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμειωτήρων)

Αν μάλιστα κατά τον σχεδιασμό του συστήματος προβλέπεται συμπληρωματικά η χρήση ισχύος από το δίκτυο και συνεπώς υπάρχει διασύνδεση μεταξύ μονάδας αντλιοσταμείωσης και κεντρικού δικτύου, τότε σε περίπτωση απώλειας των αιολικών, οι αντλίες θα συνεχίσουν να λειτουργούν τραβώντας ισχύ από το κυρίως δίκτυο. Για να μην συμβεί αυτό, απαιτείται πρόσθετο κατάλληλο σύστημα, το οποίο θα παρακολουθεί και θα προσαρμόζει κάθε στιγμή την κατανάλωση ισχύος των αντλιών στην διαθέσιμη αιολική ισχύ.

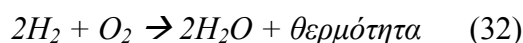


Σχήμα 41: Έμμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ, μέσω του κεντρικού δικτύου (Πηγή: Γεώργιος Κάραλης. Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμειωτήρων)

## 2.2.2 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή υδρογόνου – Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στην φύση. Σε καθαρή αέρια μορφή συναντάται σπάνια, παρόλο που πολλά ορυκτά και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί περιέχουν ενώσεις του σε πολύ μεγάλο βαθμό. Έτσι, το υδρογόνο βρίσκεται στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στην πέψη, στα μόρια του DNA, καθώς και στις τροφές υπό την μορφή λιπών, πρωτεϊνών και υδατανθράκων. Εξαιτίας της ελαφρότητάς του, το υδρογόνο δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της Γης (Wikipedia, Υδρογόνο).

Σε θερμοκρασία δωματίου, το υδρογόνο βρίσκεται σε αέρια κατάσταση, στην οποία σαν υλικό είναι άοσμο, άχρωμο και εύφλεκτο. Όταν καίγεται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα (ή και με το καθαρό οξυγόνο), το υδρογόνο σχηματίζει νερό και παράγει θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η ονομασία του οφείλεται στον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από την σύμπτυξη δύο αρχαιοελληνικών λέξεων: *ύδωρ* και *γίγνομαι*. Ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766. Το υδρογόνο κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων και το άτομό του συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα H. Κάθε άτομο του αποτελείται από ένα πρωτόνιο και από ένα ηλεκτρόνιο, ενώ κατά την ένωση δύο διαφορετικών ατόμων του παράγεται ένα μόριο υδρογόνου με μοριακό τύπο: H<sub>2</sub>. Το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν οποιοδήποτε άλλο χημικό στοιχείο κι έτσι δίνει τις περισσότερες χημικές ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Στις σημαντικότερες από τις ενώσεις του συγκαταλέγονται το νερό, οι ενώσεις του με τον άνθρακα (ορ-



γανικές ενώσεις) και οι διάφοροι φυσικοί υδρογονάνθρακες, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Όσον αφορά στις φυσικές του ιδιότητες, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή πίεση 1atm (101,325 kPa) και θερμοκρασία 0°C (273,15°K), το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0,0899kg/m<sup>3</sup>, δηλαδή περίπου δέκα φορές μικρότερη από αυτήν του αέρα. Με εξαίρεση το ήλιο, το υδρογόνο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού (20,268°K) και πήξεως (14,025°K). Όταν η θερμοκρασία του αερίου υδρογόνου μειωθεί κάτω από τους 20,268°K σε κανονικές συνθήκες πίεσης (1atm), αυτό αρχίζει να υγροποιείται, περνώντας σταδιακά από την αέρια στην υγρή του φάση. Το υγρό υδρογόνο σε μικρές ποσότητες είναι άχρωμο, αλλά όταν μελετάται σε λεπτά δείγματα παίρνει ένα ανοιχτό μπλε. Με συνεχή μείωση της θερμοκρασίας του σε κανονικές συνθήκες πίεσης ( 1atm), το υγρό υδρογόνο τελικά στερεοποιείται στους 14,025°K. Το στερεό υδρογόνο σαν υλικό είναι και αυτό άχρωμο όπως και το υγρό υδρογόνο (Wikipedia).

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται σαν βιομηχανικό καύσιμο εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από την συνολική ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται κάθε χρόνο σε παγκόσμια κλίμακα, η βιομηχανία της αμμωνίας καταναλώνει περίπου το 50% αυτής, ενώ τα διυλιστήρια του πετρελαίου το 37%. Το υπόλοιπο 13% καταναλώνεται σε διάφορους άλλους βιομηχανικούς τομείς, μεταξύ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό σε κατανάλωση κατέχει η βιομηχανία των τροφίμων (ΕΚΠΑΑ, Νοέμβριος 2003, *Ενέργεια, περιβάλλον και επιχειρηματικότητα - Προτάσεις για τον ενεργειακό τομέα στον ελληνικό χώρο*).

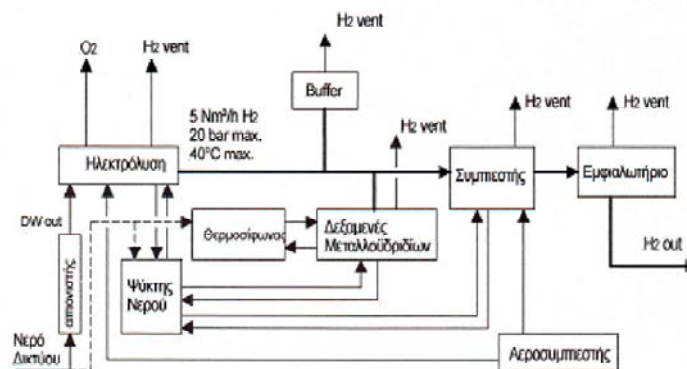
Τα τελευταία χρόνια έχει αναβιώσει η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμων με χρήση υδρογόνου. Οι κυψελίδες καυσίμου βασίζονται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση: παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο ως καύσιμο, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και μοναδική εκπομπή το νερό. Η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμου καθιστά το υδρογόνο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας τελικής χρήσης χωρίς επιβλαβείς εκπομπές και με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Από την άλλη πλευρά, δύναται η παραγωγή υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως αιολική ενέργεια και φωτοβολταϊκά, όπου δεν υπάρχει καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, γεγονός που το καθιστά το πλέον φιλικό καύσιμο για το περιβάλλον. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν είναι ακόμη οικονομικά ανταγωνιστική, απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για την εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ, ενώ μπορεί να χαρακτηριστούν ρυπογόνες οι διαδικασίες κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) και ηλιακής (φωτοβολταϊκά) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου.

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει πολλά κράτη που είναι φτωχά σε διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων να αναπτύξουν τα δικά τους αυτόνομα και ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα. Μέσω

της τεχνολογίας του υδρογόνου, τα κράτη αυτά, που ως γνωστόν είναι και τα πολυπληθέστερα πάνω στον πλανήτη, θα μπορέσουν να αναπτύξουν τις δικές τους αυτόνομες ενεργειακές οικονομίες, ξεφεύγοντας από τον φαύλο κύκλο της ενεργειακής τους εξάρτησης από άλλα κράτη προμηθευτές τους σε ορυκτά καύσιμα.

Στην Ελλάδα, αυτή την στιγμή αρκετά ερευνητικά εργαστήρια ασχολούνται με την τεχνολογία της παραγωγής και χρήσης του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο, ενώ γίνεται μια εθνική προσπάθεια με συνεργασία πανεπιστημίων, ινστιτούτων και φορέων για την δημιουργία του Ελληνικού Νησιού που θα καλύπτει πολλές από τις ενεργειακές του ανάγκες με H<sub>2</sub> παραγόμενο από ΑΠΕ. Να σημειώσουμε ότι η Μήλος αποτελεί το υποψήφιο Ελληνικό Νησί H<sub>2</sub>, μετά από ενημέρωση και αποδοχή του εγχειρήματος από τις τοπικές αρχές και την τοπική κοινωνία (Δρ. Μ.Ζούλιας, ΚΑΠΕ). Επιπρόσθετα, στα πλαίσια του πενταετούς Ευρωπαϊκού προγράμματος για το υδρογόνο που ξεκίνησε το 2001, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς, σχεδίασε και υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ κοντά στο Λαύριο, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 3 MW. Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε και τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ένα - ένα στο διάστημα Μάιος-Ιούλιος 2005. Στην πορεία προέκυψαν διάφορες μικροεργασίες, οπότε η λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ξεκίνησε στο τέλος Σεπτεμβρίου 2005 (ΚΑΠΕ, *Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια*).



Σχήμα 42: Απλό διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ (Πηγή: ΚΑΠΕ, *Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια*)



*Σχήμα 43: Πανοραμική άποψη του σταθμού παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ και αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ (Πηγή: ΚΑΠΕ, Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική)*



*Σχήμα 44: Ο συμπιεστής υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ και δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων. (Πηγή: ΚΑΠΕ, Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια)*

### 2.2.3 Αποθήκευση ενέργειας και προϊόντα στις τηλεπικοινωνίες

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ενδεικτικά ορισμένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα στις τηλεπικοινωνίες. Κατ' αρχάς παρουσιάζουμε μία σειρά των γνωστών τροφοδοτικών UPS. Το εύρος ισχύος τους κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 1000 kVa και συνήθως συνδυάζουν και την αποκοπή μερικών από τις αρμονικές του ρεύματος εισόδου με την βοήθεια φίλτρων.



Σχήμα 45: Τροφοδοτικά UPS

Οι μπαταρίες OPzS μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια και μεγάλες χωρητικότητες.

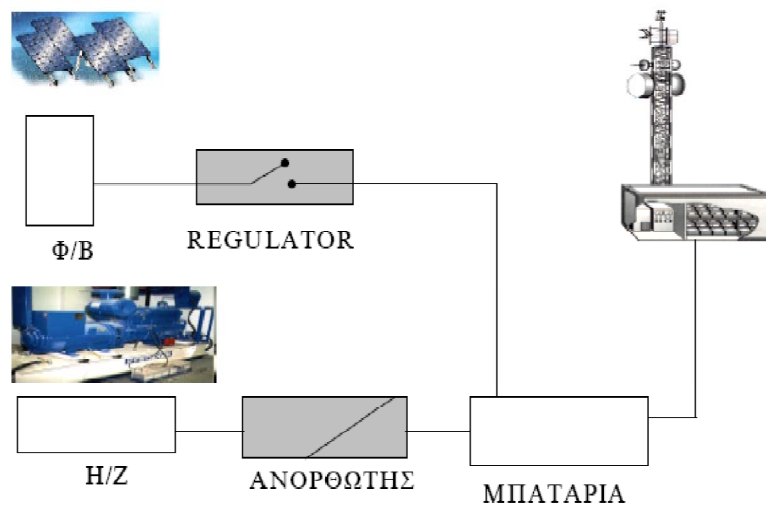


Σχήμα 46: Μπαταρίες OPzS

Μία σημαντική κατηγορία συστήματος ενέργειας είναι τα υβριδικά όπου και χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με αποθηκευτικές συσκευές. Η κύρια χρησιμότητα των αποθηκευτικών συσκευών είναι ότι η ενέργεια που παρέχεται από την φύση όπως ο ήλιος, ο άνεμος ή η ορμή του νερού, δεν παρουσιάζουν σταθερά επίπεδα ισχύος, οπότε, σε ένα υβριδικό δίκτυο αποθηκεύουμε ενέργεια και μακροπρόθεσμα για μετέπειτα χρήση αλλά και προσωρινά ώστε να εξασφαλίσουμε σταθερή παροχή ενέργειας στο δίκτυο.



Σχήμα 47: ΦΒ σύστημα για τις ανάγκες ηλεκτροδότησης ΑΔ της Vodafone στην Μήλο  
 (Πηγή: Κουφομιχάλης Χρήστος, Μπαργωτάκης Χρήστος, Καλδέλλης Ιωάννης, Τσούτσος Θεοχάρης.  
 Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Στις Τηλεπικοινωνίες)



Σχήμα 48: (Πηγή: Κουφομιχάλης Χρήστος, Μπαργωτάκης Χρήστος, Καλδέλλης Ιωάννης, Τσούτσος Θεοχάρης.  
 Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Στις Τηλεπικοινωνίες)



*Σχήμα 49: ΦΒ συστήματα εγκατεστημένα στο Άγιο Όρος (Πηγή:Κουφομιχάλης Χρήστος, Μπαργωτάκης Χρήστος, Καλδέλλης Ιωάννης, Τσούτσος Θεοχάρης. Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Στις Τηλεπικοινωνίες)*



*Σχήμα 50: ΦΒ συστήματα εγκατεστημένα στο Όρος Δίρφυ (Πηγή:Κουφομιχάλης Χρήστος, Μπαργωτάκης Χρήστος, Καλδέλλης Ιωάννης, Τσούτσος Θεοχάρης. Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Στις Τηλεπικοινωνίες)*

## Βιβλιογραφία

- [1] Mihai Deliu, Alexanrou Hedes, Ioan Sora. BeeSpeed Automatizari Ltd, Timisoara, Politehnica University of Timisoara, Department of Electrical Engineering 300223, Bd. V. Parvan, No.2 Timisoara, Romania, Detuned Filters for Power Factor Correction of Adjustable Speed Drives.
- [2] Παναγιώτης Γ. Γιαννόπουλος, Άρης Θ. Πουρνάρας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, Μέτρηση Ποιότητας Ισχύος και Ανάλυση Αρμονικών.
- [3] Διαμάντης Απόστολος του Γεωργίου, Διαμαντής Κωνσταντίνος του Θωμά. Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, Ύβριδικά φίλτρα για Φιλτράρισμα Αρμονικών που οφείλονται σε μη γραμμικά φορτία.
- [4] Σβάρνα Κωνσταντίνα, Παρασκευάς Σέληνας. Σχεδίαση ενός ενεργού φίλτρου, με στόχο την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος του δικτύου.
- [5] Κουφομιχάλης Χρήστος, Μπαργωτάκης Χρήστος, Καλδέλλης Ιωάννης, Τσούτσος Θεοχάρης. ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας, Εργαστήριο ΗΜΕ, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών στις Τηλεπικοινωνίες.
- [6] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- [7] Δημήτριος Παπαντώνης, Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα, Τεχνολογία και Τεχνολογικοί Περιορισμοί.
- [8] Παναγιώτης Σ. Μιχαλακάκος. Τεχνοοικονομική Μελέτη Διόρθωσης του Συντελεστή Ισχύος και Εξάλειψης αρμονικών.
- [9] <http://www.alibaba.com/countrysearch/CN/automatic-power-factor-controller.html>
- [10] <http://www.capacitorconvertors.com/>
- [11] [shgaohe.en.alibaba.com](http://shgaohe.en.alibaba.com)
- [12] [sompower.en.alibaba.com](http://sompower.en.alibaba.com)
- [13] <http://www.systems-sunlight.com>

