

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 1^ο – Βασικά ηλεκτρικά μεγέθη – Μετατροπείς με Η/Ι

(Επιλογές θεωρίας από τις «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος»
του Δρ.-Μηχ. Νικολάου Π. Πολύζου, Επίκουρου Καθηγητή, έτος 2008)

1.2 ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύος όταν κλείνει ή ανοίγει ένας διακόπτης δημιουργούνται κάποια μεταβατικά φαινόμενα, για ένα χρονικό διάστημα, όσο αυτά διαρκούν η συμπεριφορά του κυκλώματος δεν διέπεται πλέον από τους νόμους του Ohm ή του Kirchhoff όπως τους ξέρουμε. Όταν παύουν αυτά τα φαινόμενα, ξεκινάει η κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος, που αποκαλείται **μόνιμη κατάσταση λειτουργίας** ή **κατάσταση ισορροπίας**. Μαθηματικά, μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε όταν οι κυματομορφές όλων των ηλεκτρικών μεγεθών του κυκλώματος επαναλαμβάνονται κάθε χρονική περίοδο **T**. Δηλαδή ισχύει:

$$X(t) = X(t + n \cdot T), \text{ όπου } n: \text{ακέραιος} \quad (1.1)$$

Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε τις βασικές μορφές των ηλεκτρικών μεγεθών που πρόκειται να εξετάσουμε. Αυτά, μπορεί, να είναι σταθερά ή μεταβαλλόμενα και συνεχή ή εναλλασσόμενα.

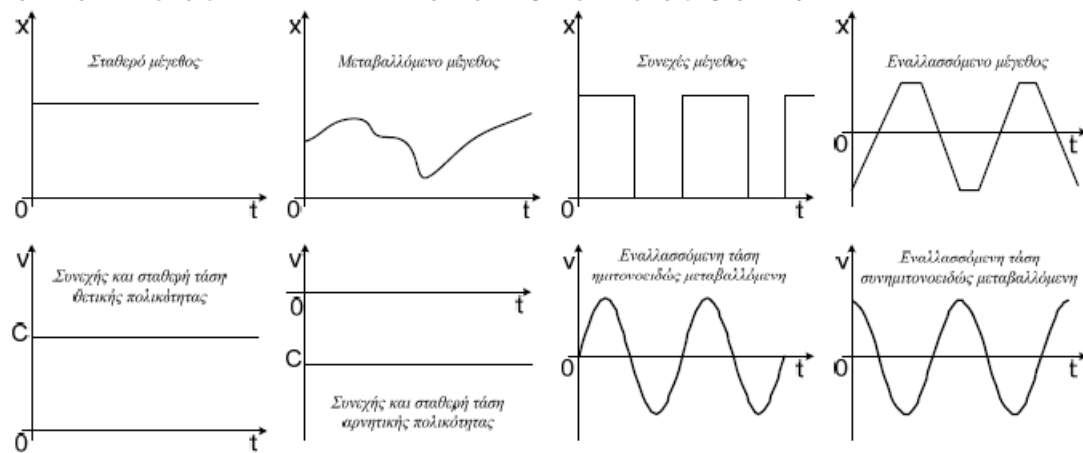
Ένα μέγεθος που δεν εξαρτάται από το χρόνο είναι σταθερό ενώ ένα μέγεθος που εξαρτάται από το χρόνο είναι μεταβαλλόμενο αφού η τιμή του διαφοροποιείται κάθε χρονική στιγμή.

Ένα μέγεθος που είναι σταθερής πολικότητας κάθε χρονική στιγμή ονομάζεται συνεχές, ενώ ένα μέγεθος που η πολικότητά του δεν παραμένει σταθερή στη διάρκεια της περιόδου, αλλά αλλάζει, ονομάζεται εναλλασσόμενο.

Η συνεχής και σταθερή τάση είναι η πιο απλή μορφή τάσεως. Για τον πλήρη καθορισμό μιας συνεχούς σταθερής τάσεως αρκεί το εύρος (πλάτος) της και η πολικότητά της. Η αναλυτική μαθηματική έκφραση μια τέτοιας τάσης είναι : $v(t)=C$, όπου το μέτρο του C παριστάνει το εύρος της και το πρόσημό του την πολικότητά της.

Εναλλασσόμενη τάση ονομάζεται κάθε περιοδική τάση που οι μέσες τιμές των θετικών και αρνητικών ημιπεριόδων, λαμβανόμενες χωριστά, είναι ίσες ή αλλιώς, που η μέση τιμή τους, όταν ληφθούν και οι δύο ημιπερίοδοι μαζί, είναι μηδέν. Η πιο συνηθισμένη μορφή εναλλασσόμενης τάσεως είναι η ημιτονοειδής. Για τον πλήρη καθορισμό μιας εναλλασσόμενης τάσεως αρκεί το εύρος (πλάτος) της και η γωνιακή

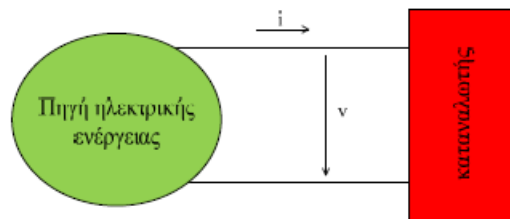
συχνότητά της. Η αναλυτική μαθηματική έκφραση μια τέτοιας τάσης είναι : $v(t)=A \cdot \sin(\omega t)$, όπου το μέτρο του A παριστάνει το πλάτος της και το ω τη γωνιακή συχνότητά της. Στο *σχήμα 1.1* παρουσιάζονται οι κυματομορφές των βασικότερων ηλεκτρικών μορφών και οι πιο συνηθισμένες κυματομορφές ηλεκτρικών τάσεων.



Σχήμα 1.1: Κυματομορφές των βασικότερων ηλεκτρικών μορφών και οι πιο συνηθισμένες κυματομορφές ηλεκτρικών τάσεων.

1.3 ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΙΣΧΥΟΣ

Έστω έχουμε το κύκλωμα του *σχήματος 1.2*. Τη χρονική στιγμή που θα συνδεθεί ένας καταναλωτής στην έξοδο της πηγής, θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα το κύκλωμα. Η **στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς** ορίζεται ως ο ρυθμός παροχής ή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποια χρονική στιγμή από τον καταναλωτή και δίνεται από την εξίσωση :



Σχήμα 1.2: Στιγμιαία ροή ισχύος.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1.2)$$

Για τα μεταβαλλόμενα μεγέθη, όπως είναι και τα εναλλασσόμενα μεγέθη, η στιγμιαία ισχύς δεν έχει νόημα, γιατί καταρχάς δεν μπορεί να μετρηθεί με κάποιο όργανο και επίσης επειδή μεταβάλλεται συνεχώς δεν είναι ένα μέγεθος που μπορεί να μας βοηθήσει να βγάλουμε χρήσιμα ποιοτικά συμπεράσματα για το κύκλωμα μας και για τη μεταφορά ενέργειας μέσα από αυτό, αλλά ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαθηματικούς υπολογισμούς. Αν το ρεύμα (i) και η τάση (v) στο κύκλωμα μεταβάλλονται με το χρόνο, ενώ έχουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με περίοδο T , τότε ορίζεται η **μέση ροή ισχύος** ως εξής :

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) \cdot dt \quad (1.3)$$

Η μέση ροή ισχύος ονομάζεται και **ενεργός ισχύς** (P ή P_{ev}) και μετριέται σε *Watt*. Η φυσική έννοια της ενεργού ισχύος είναι ότι αποτελεί το μέρος της συνολικής ισχύος η οποία μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο είτε σε θερμότητα πάνω σε μία αντίσταση εξαιτίας

του φαινομένου Joule. Η ενεργός ισχύς είναι η μόνη ισχύς η οποία μπορεί να μετρηθεί άμεσα με ένα ηλεκτροδυναμικό βατόμετρο, ενώ όλα τα άλλα είδη ισχύος μετριοούνται έμμεσα από την ενεργό ισχύ και τη γνώση του συντελεστού ισχύος του κυκλώματος.

Αν από τη χρονική συνάρτηση της στιγμιαίας ισχύος αφαιρέσουμε την ενεργό ισχύ το αποτέλεσμα θα είναι μια περιοδική συνάρτηση του χρόνου που θα έχει μέση τιμή μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς που ορίζεται από αυτή τη συνάρτηση δεν είναι ικανή να παράγει έργο και αυτή την ισχύ την ονομάζουμε **άεργο ισχύ** (Q ή P_{aep}) και μετριέται σε VAR . Για την άεργο ισχύ δηλαδή έχουμε ότι :

$$Q(t) = |p(t) - P| \quad \text{και} \quad Q_{av} = 0 \quad \text{πάντα} \quad (1.4)$$

Η άεργος ισχύς λοιπόν, είναι το μέτρο της εναλλασσόμενης συνιστώσας της στιγμιαίας ισχύος και σκοπός της είναι να δημιουργεί το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι αναγκαίο για την μεταφορά της ενεργού ισχύος από το δίκτυο στον καταναλωτή. Το μέτρο του ανυσματικού αθροίσματος της ενεργού και της άεργου ισχύος το ονομάζουμε **φαινόμενη ισχύ** (S ή $P_{\phi an}$) και μετριέται σε VA . Η άεργη και η φαινόμενη ισχύς δεν μπορούν να μετρηθούν με όργανα άμεσα αλλά υπολογίζονται. Στα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος δεν έχουμε άεργη ισχύ και επομένως η φαινόμενη είναι πάντα ίση με την ενεργό ισχύ. Από την άλλη πλευρά, στα κυκλώματα με εναλλασσόμενο ρεύμα τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Για τα κυκλώματα αυτά ισχύει ότι :

$$\overset{\circ}{S} = P \pm jQ \quad (1.5)$$

Σ' αυτή τη περίπτωση το $\overset{\circ}{S}$ ονομάζεται εκτός από φαινόμενη ισχύς και **μγαδική ισχύς**. Το πρόσημο "+" υπονοεί επαγωγική συμπεριφορά του καταναλωτή ενώ το "-" χωρητική του καταναλωτή, δηλαδή αν απορροφάει ή αν αποδίδει άεργο ισχύ ο καταναλωτής από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν το Q είναι μηδέν τότε έχουμε καθαρά ωμική συμπεριφορά του καταναλωτή και τότε η ενεργός και η φαινόμενη ισχύς ταυτίζονται.

1.4 ΜΕΓΙΣΤΗ, ΜΕΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΙΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Σε κάθε ηλεκτρικό μέγεθος ορίζονται μαθηματικά οι ακόλουθες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να κάνουμε όλους τους απαραίτητους μαθηματικούς υπολογισμούς για την ανάλυση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Μέγιστη τιμή ενός μεγέθους ορίζεται η κορυφαία τιμή που μπορεί να πάρει το μέγεθος αυτό κατά τη χρονική περίοδο που το εξετάζουμε. Δηλαδή ισχύει :

$$X_{peak} = X_{max} = X_0 \geq x(t) \quad \text{για κάθε } t \quad (1.6)$$

Μέση τιμή ενός μεγέθους ορίζεται ο μέσος όρος των τιμών που παίρνει το μέγεθος αυτό κατά το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει. Μέση τιμή ενός περιοδικού μεγέθους είναι ακριβώς το ίδιο πράγμα με τη διαφορά ότι το χρονικό διάστημα είναι ίσο με την περίοδο του μεγέθους. Η μέση τιμή ενός περιοδικού και συνεχώς ορισμένου μεγέθους δίνεται μαθηματικά από την εξίσωση :

$$X_{av} = \overline{X} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot dt \quad (1.7)$$

Από τον ορισμό της μέσης τιμής, είναι προφανές ότι, μαθηματικά η μέση τιμή είναι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της συνάρτησης προς την περίοδο, επομένως είναι το ύψος ενός ορθογωνίου που για πλάτος ίσο με την περίοδο έχει εμβαδό ίσο με το εμβαδό που ορίζει η συνάρτηση με τον άξονα του χρόνου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Ακόμα, από την εξίσωση 1.7 είναι προφανές ότι όλα τα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα εναλλασσόμενα μεγέθη έχουν μηδενική μέση τιμή.

Ενεργός τιμή ενός περιοδικού μεγέθους ορίζεται μια συνεχής και θετική τιμή του μεγέθους που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (1.8)$$

Η μαθηματική εξίσωση της ενεργού τιμής δικαιολογεί και τον όρο “τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου” που προέρχεται από τον αγγλικό όρο “root-mean-square-rms”. Φυσική σημασία της ενεργού τιμής για ένα ρεύμα που διαρρέει κάποιο κύκλωμα είναι η σταθερή τιμή του ρεύματος που επιφέρει στο κύκλωμα τα ίδια ενεργειακά αποτελέσματα με το ρεύμα που το διαρρέει. Επίσης, από τον ορισμό της ενεργού τιμής είναι σαφές ότι για συνεχή και σταθερά μεγέθη η μέση τιμή ταυτίζεται με την ενεργό τιμή αυτών των μεγεθών.

Απόλυτη μέση τιμή ή μέση τιμή του ανορθωμένου είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών που παίρνει ένα περιοδικό μέγεθος κατά την διάρκεια μιας περιόδου του και ορίζεται ως εξής :

$$X_{av,abs} = \overline{|x(t)|} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x(t)| \cdot dt \quad (1.9)$$

Από τον ορισμό της μέσης τιμής του ανορθωμένου είναι προφανές ότι όλα τα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα εναλλασσόμενα μεγέθη έχουν μη μηδενική απόλυτη μέση τιμή.

Επίσης, ορίζεται ως **συντελεστής κορυφής ή συντελεστής εύρους (crest factor)** ο λόγος :

$$\text{συντελεστής κορυφής} = m = \frac{X_{max}}{X_{rms}} = \frac{X_{peak}}{X_{rms}} \quad (1.10)$$

και ως **συντελεστής μορφής** ο λόγος :

$$\text{συντελεστής μορφής} = ff = g = \frac{X_{rms}}{X_{av,abs}} \quad (1.11)$$

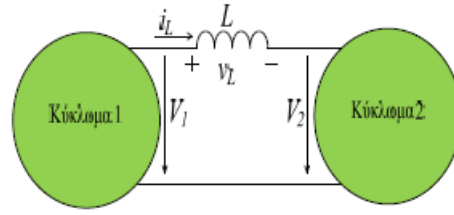
1.5 ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΜΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΔΙΑΡΡΕΙ ΕΝΑΝ ΠΥΚΝΩΤΗ ΣΕ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Σύμφωνα με τον ορισμό της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας εννοείται ότι οι κυματομορφές των ηλεκτρικών μεγεθών ενός κυκλώματος, δηλαδή των τάσεων και των ρευμάτων, επαναλαμβάνονται με περίοδο **T**, δηλαδή για ένα κύκλωμα ισχύει ότι :

$$v(t) = v(t + n \cdot T), \quad i(t) = i(t + n \cdot T), \quad \text{όπου } n : \text{ακέραιος} \quad (1.12)$$

Έστω το κύκλωμα του σχήματος 1.3, όπου δύο κυκλώματα, το 1 και το 2, συνδέονται μέσω μιας επαγωγής (**L**). Στην περίπτωση που η αυτεπαγωγή βρίσκεται σε

μόνιμη κατάσταση ισορροπίας το ρεύμα της κάποια χρονική στιγμή t_1 είναι ίσο με το ρεύμα τη χρονική στιγμή t_1+T . Επομένως, για να βρούμε τη μέση τιμή της τάσης στα άκρα της επαγωγής βάση ορισμού έχουμε ότι :



$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow v_L(t) \cdot dt = L \cdot di_L(t) \Rightarrow$ **Σχήμα 1.3:** Απόκριση μιας επαγωγής σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

$$\int_{t_1}^{t_1+T} v_L(t) \cdot dt = \int_{i_{L_1}}^{i_{L_1+T}} L \cdot di_L(t) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T} v_L(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{i_{L_1}}^{i_{L_1+T}} L \cdot di_L(t) \Rightarrow$$

$$V_L = \overline{V}_L = \frac{1}{T} \cdot L \cdot (i_{L_1+T} - i_{L_1})$$

και $i_{L_1+T} = i_{L_1}$, λόγω μόνιμης κατάστασης ισορροπίας, επομένως :

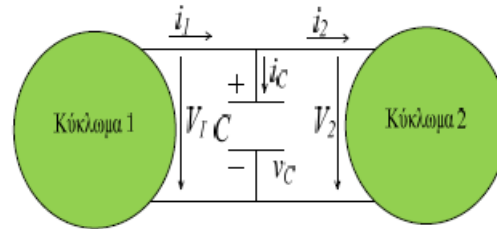
$$V_L = \overline{V}_L = \frac{1}{T} \cdot L \cdot (i_{L_1+T} - i_{L_1}) = 0$$

$$\text{άρα : } V_L = \overline{V}_L = 0 \quad (1.13)$$

και επομένως για το κύκλωμα θα ισχύει ότι : $V_1 = V_2$

Δηλαδή η μέση τιμή της τάσης στα άκρα μιας επαγωγής είναι πάντα ίση με μηδέν αν το κύκλωμα λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

Έστω τώρα, το κύκλωμα του σχήματος 1.4, όπου μεταξύ δύο κυκλωμάτων που μεταφέρεται ηλεκτρική ισχύς συνδέεται ένας πυκνωτής (C). Όπως και πριν, έτσι και εδώ, αν ο πυκνωτής βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η τάση στα άκρα του κάποια χρονική στιγμή t_1 είναι ίση με την τάση τη χρονική στιγμή t_1+T . Επομένως, για να βρούμε τη μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή βάση ορισμού έχουμε ότι :



Σχήμα 1.4: Απόκριση ενός πυκνωτή σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

$$i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} \Rightarrow i_C(t) \cdot dt = C \cdot dv_C(t) \Rightarrow \int_{t_1}^{t_1+T} i_C(t) \cdot dt = \int_{v_{C_1}}^{v_{C_1+T}} C \cdot dv_C(t) \Rightarrow$$

$$I_C = \overline{I}_C = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T} i_C(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{v_{C_1}}^{v_{C_1+T}} C \cdot dv_C(t) = \frac{1}{T} \cdot C \cdot (v_{C_1+T} - v_{C_1})$$

και $v_{C_1+T} = v_{C_1}$, λόγω μόνιμης κατάστασης ισορροπίας, επομένως :

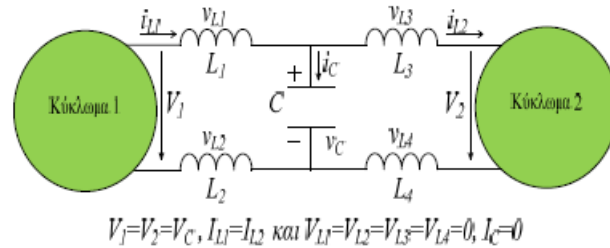
$$I_C = \overline{I}_C = \frac{1}{T} \cdot C \cdot (v_{C_1+T} - v_{C_1}) = 0$$

$$\text{άρα : } I_C = \overline{I}_C = 0 \quad (1.14)$$

και επομένως για το κύκλωμα θα ισχύει ότι : $I_1 = I_2$

Δηλαδή, η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει έναν πυκνωτή είναι πάντα ίση με μηδέν αν το κύκλωμα λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

Επομένως, αν έχουμε το κύκλωμα του σχήματος 1.5 η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του κυκλώματος 1 είναι ίση με τη μέση τιμή της τάσης στα άκρα του κυκλώματος 2, ενώ η μέση τιμή του ρεύματος i_{L1} είναι ίση με τη μέση τιμή του ρεύματος i_{L2} αν η διάταξη λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 1.5: Απόκριση επαγωγής και πυκνωτή σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

1.6 ΜΟΝΙΜΗ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Κρίνεται απαραίτητο να ασχοληθούμε και με τη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας, αφού είναι αυτή που συναντάμε πιο συχνά όταν αναφερόμαστε σε εναλλασσόμενα μεγέθη. Είναι σύνηθες όταν αναφερόμαστε σε τάσεις ή ρεύματα που έχουν ημιτονοειδή κυματομορφή να τα παρουσιάζουμε με έναν συγκεκριμένο τρόπο ώστε να αντιλαμβανόμαστε με την πρώτη ματιά την ενεργό τιμή του μεγέθους, τη φασική του απόκλιση από την κυματομορφή αναφοράς καθώς και τη γωνιακή συχνότητα του :

$$a(t) = \sqrt{2} \cdot A_{rms} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (1.15)$$

όπου : $a(t)$: η στιγμιαία τιμή, A_{rms} : η ενεργός τιμή,

$A_{max} = \sqrt{2} \cdot A_{rms}$: η μέγιστη τιμή, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$: η γωνιακή συχνότητα,

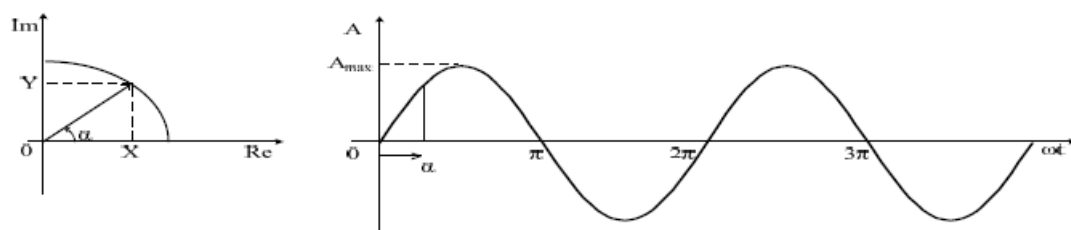
φ : η φασική απόκλιση, f : η συχνότητα

δηλαδή παραδείγματος χάρη για μια τάση που έχει ενεργό τιμή 230 volt και προηγείται της κυματομορφής αναφοράς κατά $\pi/6$, έχουμε:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{6})$$

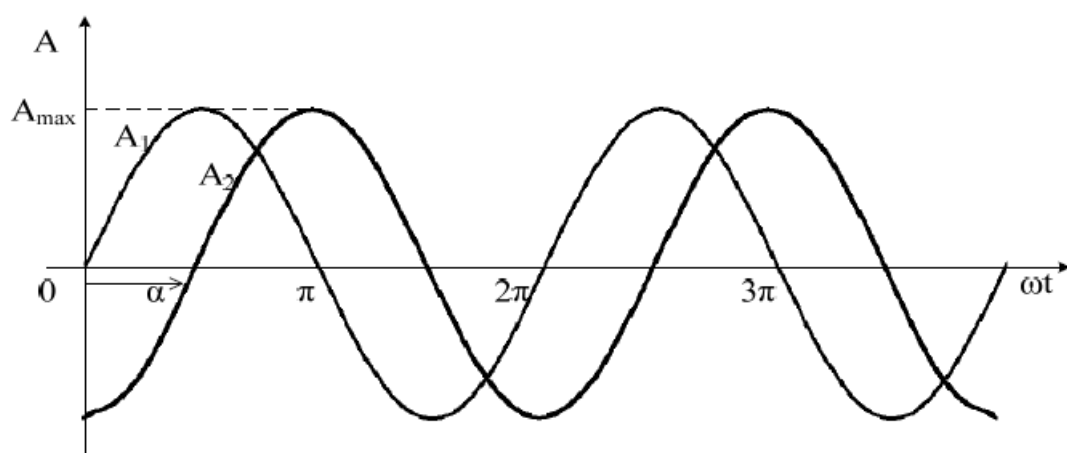
Παρόλο που έτσι περιγράφουμε άριστα την κυματομορφή που μας ενδιαφέρει πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να κάνουμε αριθμητικές πράξεις, οπότε, καταφεύγουμε στους μιγαδικούς αριθμούς που μας επιτρέπουν να κρατήσουμε και να χρησιμοποιήσουμε όλες τις πληροφορίες της κυματομορφής ενώ παράλληλα μας δίνουν τη δυνατότητα, με εύκολο σχετικό τρόπο, να εκτελούμε τις αναγκαίες αριθμητικές πράξεις. Η λογική είναι ότι έχουμε ένα στρεφόμενο διάνυσμα με μέτρο την μέγιστη τιμή της ημιτονοειδούς κυματομορφής που περιστρέφεται με την συχνότητα του ημιτόνου και είναι συγχρονισμένο με αυτό. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι αποθανατίζουμε ένα στιγμιότυπο του στρεφόμενου διανύσματος την στιγμή ακριβώς που έχει διαγράψει γωνία ίση με την φασική του απόκλιση σε σχέση με το διάνυσμα αναφοράς που συνήθως το επιλέγουμε να είναι στις 0° μοίρες. Παρακάτω, στο σχήμα 1.6 φαίνεται ο συσχετισμός του στρεφόμενου διανύσματος σε σχέση με την ημιτονοειδή κυματομορφή. Ουσιαστικά αναπαριστά ένα

στιγμιότυπο του στρεφόμενου διανύσματος την χρονική στιγμή “ α ” και λόγω της περιοδικότητας του ημιτόνου και κάθε χρονικής στιγμής “ $\omega \cdot t = n \cdot T + \alpha$ ”. Ο οριζόντιος άξονας συμβολίζει τον χρόνο και ο κάθετος την τιμή του μεγέθους όσο αναφορά την κυματομορφή. Για το στρεφόμενο διάνυσμα η προβολή του στον οριζόντιο άξονα είναι το πραγματικό του μέρος ενώ η προβολή του στον κατακόρυφο άξονα το φανταστικό του, όταν αυτό αναπαρίσταται ως μιγαδικός αριθμός σε καρτεσιανή μορφή.



Σχήμα 1.6: Στρεφόμενο διάνυσμα και κυματομορφή ημιτόνου

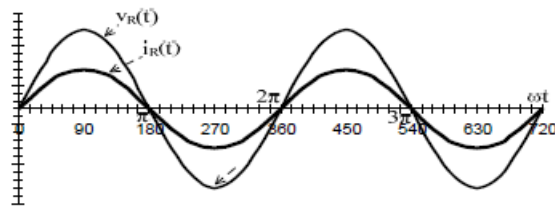
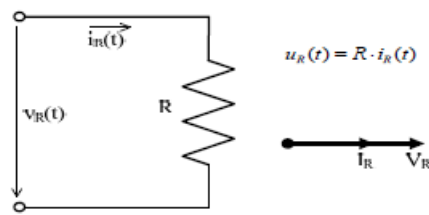
Διαφορά φάσης ανάμεσα σε δύο κυματομορφές που χαρακτηρίζονται από την ίδια συνάρτηση και έχουν την ίδια συχνότητα ορίζεται ο χρόνος που προηγείται ή καθυστερεί η μία έναντι της άλλης. Φυσικά η διαφορά φάσης μπορεί να μετρηθεί σε ακτίνια, σε μοίρες καθώς και σε χρόνο αν είναι γνωστή η συχνότητα των κυματομορφών, μια και η περίοδος αντιστοιχεί σε 360° μοίρες, είτε σε $2 \cdot \pi$ ακτίνια. Για να αντιληφθούμε καλύτερα την έννοια της διαφοράς φάσης χρηστό θα ήταν να επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία αλλά με δύο διανύσματα αυτή την φορά. Στο *σχήμα 1.7* φαίνεται το προηγούμενο διάνυσμα A_1 αλλά και ένα ακόμα διάνυσμα το A_2 , το οποίο καθυστερεί κατά “ α ” σε ακτίνια σε σχέση με το πρώτο διάνυσμα.



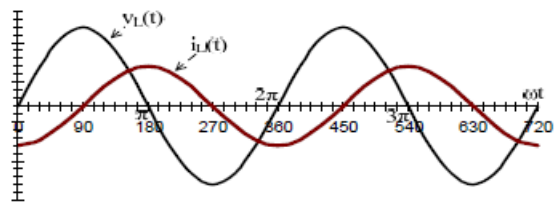
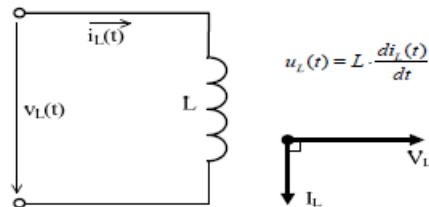
Σχήμα 1.7: Διαφορά φάσης μεταξύ δύο ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενων μεγεθών

Στο *σχήμα 1.8* βλέπουμε τα σύμβολα των τριών βασικών φορτίων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρολογία, αντίσταση, αυτεπαγωγή και πυκνωτής, καθώς και τις εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία τους, ενώ δίνεται και η απόκρισή τους τόσο με στρεφόμενα διανύσματα στο χρόνο όσο και σαν κυματομορφές στο χρόνο.

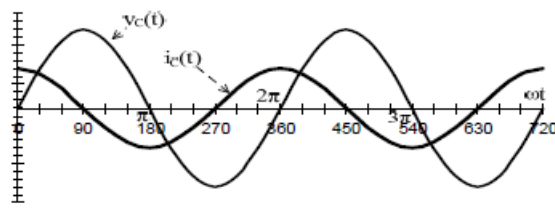
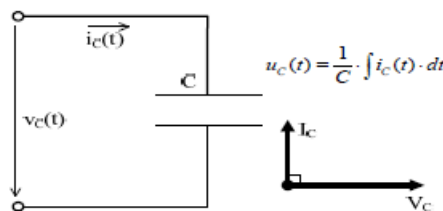
R η ωμική αντίσταση (Ω , V/A)



L ο συντελεστής αυτεπαγωγής (H, $1H=V \cdot s/A$)



C η χωρητικότητα (F, $1F=A \cdot s/V$)



Σχήμα 1.8: Σύμβολα βασικών φορτίων, εξισώσεις και η απόκρισή τους.

1.7 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ισχύος θα πρέπει εδώ να ορίσουμε την φασική απόκλιση της τάσεως και του ρεύματος σε ένα κύκλωμα ως τη γωνία φ , όπου $\varphi = \varphi_V - \varphi_I$ και φ_V η γωνία της τάσης ενώ φ_I η γωνία του ρεύματος. Η **μγαδική ισχύς** ορίζεται ως το γινόμενο :

$$S = V \cdot I^* = V e^{j\varphi_V} \cdot I e^{-j\varphi_I} = V \cdot I e^{j(\varphi_V - \varphi_I)} = S e^{j\varphi} \quad (1.16)$$

Επομένως, το πλάτος της μιγαδικής ισχύος που ονομάζεται και **φαινόμενη ισχύς** δίνεται από την εξίσωση :

$$|S| = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (1.17)$$

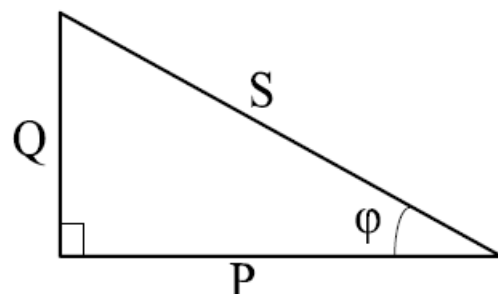
Το πραγματικό μέρος της μιγαδικής ισχύος είναι η **ενεργός** ή η **πραγματική ισχύς** δίνεται από την εξίσωση :

$$P = \text{Re}[S] = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \varphi \quad (1.18)$$

Ενώ, το φανταστικό μέρος της μιγαδικής ισχύος είναι η **άεργος ισχύς**, δηλαδή :

$$Q = \text{Im}[S] = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin \varphi \quad (1.19)$$

Τα τρία αυτά είδη ισχύος δημιουργούν ένα ορθογώνιο τρίγωνο το λεγόμενο **τρίγωνο ισχύος** (σχήμα 1.9) και μεταξύ τους ισχύει το πυθαγόρειο θεώρημα, δηλαδή :



Σχήμα 1.9: Τρίγωνο ισχύος

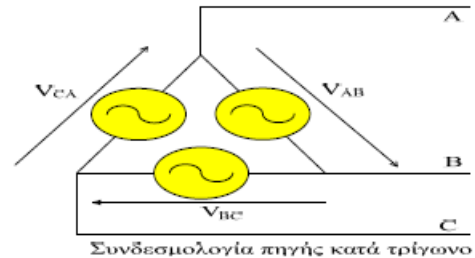
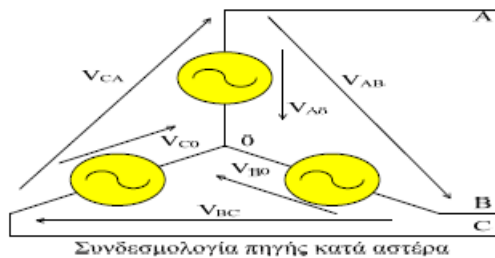
$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{και} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} = \text{συντελεστής ισχύος} \quad (1.20)$$

1.8 ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

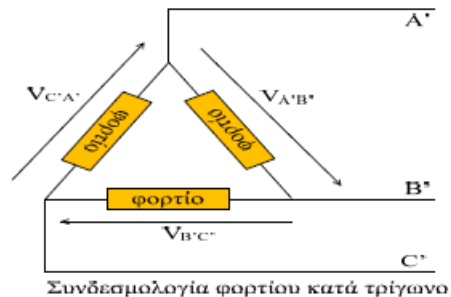
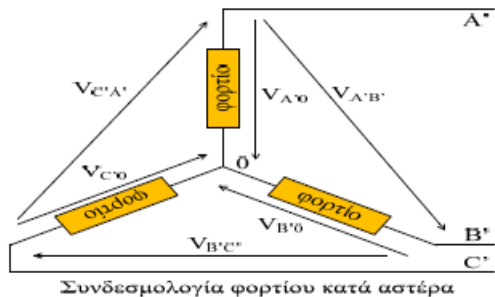
Τα τριφασικά συστήματα είναι πολύ διαδεδομένα στα δίκτυα ηλεκτρισμού και σε καταναλώσεις μεγάλης ισχύος. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι, με σωστό καταμερισμό του φορτίου (τρία όμοια φορτία με ίδια γωνία ισχύος) και όταν οι πηγές παράγουν τάσεις ίδιου μέτρου και με διαφορά φάσης μεταξύ τους εκατόν είκοσι μοίρες (δηλαδή όταν έχουμε τριφασικό συμμετρικό δίκτυο και φορτίο), εκμεταλλευόμενοι μια μαθηματική ταυτότητα $\{\sin(\omega t + a) + \sin(\omega t + a + \pi/3) + \sin(\omega t + a + 2\pi/3) = 0\}$, είναι δυνατό να αποφύγουμε τη χρήση του ουδέτερου αγωγού. Γεγονός εξαιρετικά συμφέρον από οικονομικής απόψεως καθώς και από πλευράς ενεργειακών απωλειών στις γραμμές μεταφοράς. Η ονομασία τους προέρχεται από το γεγονός ότι αποτελούνται από τρεις πηγές τάσης ίσου μέτρου αλλά που δίνουν τάση με διαφορά φάσης εκατόν είκοσι μοίρες η μία από την άλλη. Οι μαθηματικές εκφράσεις των τριών φασικών τάσεων ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος είναι οι ακόλουθες (V_S : η ενεργός τιμή της φασικής τάσης του συστήματος) :

$$\begin{aligned} v_A(t) &= \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \\ v_B(t) &= \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3}), \\ v_C(t) &= \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \end{aligned} \quad (1.21)$$

Για την κατανόηση των τριφασικών συστημάτων θα πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε τις συνδεσμολογίες αστέρα και τρίγωνο που μπορεί να αναφέρονται τόσο στην πηγή (σχήμα 1.10) όσο και στο φορτίο (σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.10: Συνδεσμολογία πηγής κατά αστέρα και τρίγωνο.



Σχήμα 1.11: Συνδεσμολογία φορτίου κατά αστέρα και τρίγωνο.

Ας ορίσουμε τώρα τα πολικά και τα φασικά μεγέθη σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενης τάσης. **Πολική τάση** ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο γραμμών-φάσεων, ενώ **φασική τάση** ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ μιας γραμμής-φάσης και ουδετέρου. Στο τρίγωνο για ένα συμμετρικό σύστημα η πολική και η φασική τάση ταυτίζονται κατά μέτρο και κατά γωνία ενώ στον αστέρα η πολική είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερη από τη φασική και προπορεύεται της φασικής κατά τριάντα μοίρες.

Αντίστοιχα, για τα ρεύματα στον αστέρα για ένα συμμετρικό σύστημα το πολικό ή ρεύμα γραμμής είναι ίσο με το φασικό κατά μέτρο και κατά γωνία, το ρεύμα δηλαδή που βγαίνει από κάθε πηγή ή μπαίνει σε κάθε ένα από τα τρία τμήματα του φορτίου. Στο τρίγωνο το πολικό ρεύμα είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο από το φασικό ενώ το πολικό προπορεύεται του φασικού κατά τριάντα μοίρες. Δηλαδή ανάλογα με τη συνδεσμολογία ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

ΤΡΙΓΩΝΟΥ

$$V_{\text{πολ},\text{rms}} = V_{\text{φασ},\text{rms}}$$

$$I_{\text{πολ},\text{rms}} = \sqrt{3} \times I_{\text{φασ},\text{rms}}$$

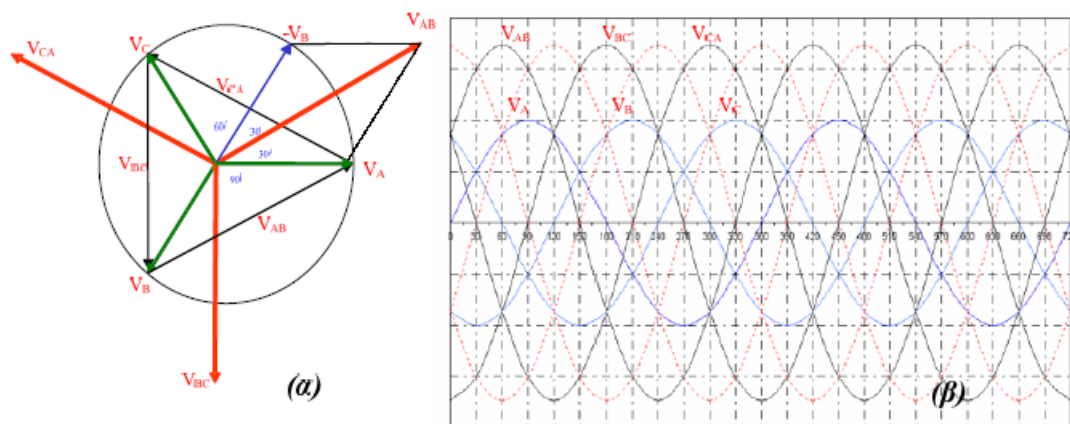
ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

ΑΣΤΕΡΑ

$$V_{\text{πολ},\text{rms}} = \sqrt{3} \times V_{\text{φασ},\text{rms}} \quad (1.22)$$

$$I_{\text{πολ},\text{rms}} = I_{\text{φασ},\text{rms}}$$

Στο *σχήμα 1.12.α* παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα όλων των φασικών και των πολικών τάσεων κατά τη συνδεσμολογία αστέρα, ενώ στο *σχήμα 1.12.β* οι κυματομορφές των αντίστοιχων τάσεων στο χρόνο.



Σχήμα 1.12: Διανυσματικό διάγραμμα (α) και κυματομορφές (β) των φασικών και πολικών τάσεων κατά τη συνδεσμολογία αστέρα.

1.9 ΙΣΧΥΣ ΣΤΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Αν αναλύσουμε το συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα σε τρία ξεχωριστά κυκλώματα με όμοια χαρακτηριστικά, παρατηρούμε πως τρεις όμοιες πηγές τροφοδοτούν τρία όμοια φορτία. Επομένως, η συνολική ισχύς των τριών φάσεων είναι ίση με την ισχύ της μιας φάσης πολλαπλασιασμένη επί τρία (ο αριθμός των φάσεων). Για τη κάθε φάση, είναι γνωστό ότι, η ενεργός ισχύς είναι ίση με το γινόμενο της ενεργού τιμής της τάσης στα άκρα του φορτίου (δηλαδή, τη φασική) επί το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο (το φασικό

δηλαδή) επί το συνημίτονο της διαφοράς φάσης τους, ανεξάρτητα από τη συνδεσμολογία. Επομένως, για τη συνολική ισχύ σε ένα τριφασικό κύκλωμα έχουμε ότι :

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot I_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot \cos \varphi \quad (1.23)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί πολύ εύκολα με πολικά μεγέθη, αρκεί να παρατηρήσουμε από την εξίσωση 1.20, ότι οι φασικές ενεργές τιμές του ρεύματος και της τάσης είναι μικρότερες από τις πολικές τους κατά $\sqrt{3}$ φορές για το ένα μέγεθος και ίσες για το άλλο, ανάλογα την συνδεσμολογία. Οπότε, ανεξαρτήτως συνδεσμολογίας, δηλαδή είτε αστέρα είτε τριγώνου, το γινόμενο των φασικών ενεργών τιμών είναι ίσο με το γινόμενο των πολικών ενεργών τιμών δια $\sqrt{3}$, έχουμε δηλαδή:

$$V_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot I_{\phi\alpha\sigma,rms} = \frac{V_{\text{πολ},rms} \cdot I_{\text{πολ},rms}}{\sqrt{3}} \quad (1.24)$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω εξίσωση που μας δίνει την **συνολική ενεργό ισχύ ενός τριφασικού κυκλώματος** :

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{πολ},rms} \cdot I_{\text{πολ},rms} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot V_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot I_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot \cos \varphi \quad (1.25)$$

Ομοίως, καταλήγουμε στις ακόλουθες εξισώσεις για τη **συνολική φαινόμενη και άεργη ισχύ ενός τριφασικού κυκλώματος** :

$$|S_{3\phi}| = \sqrt{3} \cdot V_{\text{πολ},rms} \cdot I_{\text{πολ},rms} = 3 \cdot V_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot I_{\phi\alpha\sigma,rms} \quad (1.26)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{πολ},rms} \cdot I_{\text{πολ},rms} \cdot \sin \varphi = 3 \cdot V_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot I_{\phi\alpha\sigma,rms} \cdot \sin \varphi \quad (1.27)$$

Ενώ, για τη μιγαδική ισχύ έχουμε:

$$S_{3\phi}^o = P_{3\phi} \pm jQ_{3\phi} \quad (1.28)$$

Όπου ξανά το πρόσημο “+” υπονοεί επαγωγική συμπεριφορά του καταναλωτή ενώ το “-” χωρητική και όταν το Q είναι μηδέν τότε έχουμε καθαρά ωμική συμπεριφορά και η ενεργός με την φαινόμενη ισχύ ταυτίζονται.

Ο όρος $\cos \varphi$ που χρησιμοποιούμε στην παραπάνω σχέση υποδηλώνει τι ποσοστό της φαινόμενης ισχύος μετατρέπεται σε έργο για αυτό το λόγο τον ονομάζουμε και **συντελεστή ισχύος (power factor, PF)**, είναι αδιάστατο μέγεθος και δίνεται από τον τύπο:

$$\cos \varphi = PF = \frac{P}{S} \quad (1.29)$$

Τα πράγματα γίνονται λίγο πιο περίπλοκα αν οι κυματομορφές των τάσεων ή/και των εντάσεων δεν είναι ημιτονοειδής, όπως έχουμε θεωρήσει σ’ αυτή την ανάλυση, αλλά εμπεριέχουν και αρμονικές άλλων συχνοτήτων. Γι’ αυτό όμως θα αναφερθούμε αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

(Δείτε Μάθημα 3 - Ανάλυση Fourier και αρμονικές).

Μετατροπείς με Ηλεκτρονικά Ισχύος

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την ευρεία έννοια του όρου σκοπός της επιστήμης των ηλεκτρονικών ισχύος (Power Electronics) είναι η μετατροπή και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας από μια μορφή σε μία άλλη, με ηλεκτρονικές διατάξεις (τους στατικούς ηλεκτρονικούς μετατροπείς) που βασίζονται στη χρήση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.

Η ιστορία των ηλεκτρονικών ισχύος ξεκινάει από τις αρχές του αιώνα μας με την ανακάλυψη του ανορθωτή υδραργύρου, αφού τα προηγούμενα χρόνια, η μετατροπή της ενέργειας επιτυγχανόταν μέσω περιστρεφόμενων μετατροπέων τους λεγόμενους και **ηλεκτρομηχανικούς μετατροπείς ισχύος** (δηλαδή, με τη βοήθεια ηλεκτρικών μηχανών π.χ. σύστημα Ward-Leonard). Στη συνέχεια, ήρθε η εποχή των **μαγνητικών ενισχυτών** (τη δεκαετία του 1940), αλλά η πραγματική επανάσταση στα ηλεκτρονικά ισχύος πραγματοποιήθηκε με την ανακάλυψη (1956 στα εργαστήρια της Bell Laboratories) του ελεγχόμενου **ανορθωτή πυριτίου (silicon-controlled rectifier)** ή **θυρίστορ (Thyristor)**, το οποίο διέθεσε πρώτη στο εμπόριο η General electric Company (USA, 1958).

Από τότε μέχρι σήμερα η εξέλιξη στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος υπήρξε σημαντική και ραγδαία. Η ανακάλυψη νέων ημιαγωγικών στοιχείων, υλικών, κυκλωμάτων, διατάξεων και συστημάτων ελέγχου, η τεχνολογική βελτίωση των ήδη υπάρχοντων καθώς και η επινόηση νέων συστημάτων, συντέλεσαν ώστε η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος να προβάλλει ως μία από τις βασικότερες τεχνολογικές επιστήμες της εποχής μας [1-15].

Πριν όμως αρχίσουμε την διεξοδική ανάλυσή μας στην επιστήμη και την τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Ισχύος θεωρούμε σκόπιμο να διευκρινιστούν ορισμένες θεμελιακές έννοιες. Γενικά με τον όρο «ηλεκτρονικά» εννοούμε τα ηλεκτρονικά δομικά στοιχεία και τις συσκευές που στηρίζονται στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών, τα οποία, από την άποψη των δυνατοτήτων δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος, βρίσκονται μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και των μονωτικών υλικών. Οι ημιαγωγοί διακρίνονται από τα αγωγά μέταλλα ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία είναι πολύ μικρότερη εκείνης των μετάλλων, καθώς και ως προς τη χαρακτηριστική ιδιότητα ότι διαθέτουν φορείς θετικού και αρνητικού φορτίου, αλλά και τη δυνατότητα επηρεασμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η τιμή της αγωγιμότητας μπορεί να μεταβάλλεται εντός μιας ευρείας περιοχής. Με βάση αυτή τη δυνατότητα επιτυγχάνεται ο μηδενισμός του ρεύματος που ρέει μέσα στα ημιαγωγικά στοιχεία καθώς και η επιλογή ρεύματος μιας επιθυμητής τιμής, φτάνοντας μέχρι μία ανώτατη επιτρεπτή τιμή. Η δυνατότητα ελέγχου της ροής του ρεύματος με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια αποτέλεσε την βασικότερη ιδιότητα για την «επανάσταση» στην ηλεκτρονική τεχνολογία των τελευταίων δεκαετιών.

Η συνολική περιοχή των ηλεκτρονικών μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθεση δύο μεγάλων υποπεριοχών, δηλ. της περιοχής των ηλεκτρονικών για την επεξεργασία πληροφοριών, όπου κυριαρχεί η απαίτηση να μην υπάρχουν απώλειες πληροφοριών, και της περιοχής των ηλεκτρονικών ισχύος για το μετασχηματισμό και τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη δεύτερη περιοχή, κυρίαρχη απαίτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας και έτσι η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, παρέχοντας με αξιοπιστία την εκάστοτε επιθυμητή ποσότητα ενέργειας. Η κατάσταση αυτή φαίνεται παραστατικά στο διάγραμμα του σχήματος 2.1, όπου διακρίνονται οι κατηγορίες των ιδιαίτερων γνωστικών περιοχών και αντικειμένων έρευνας και ανάπτυξης, που σχετίζονται με τα ηλεκτρονικά ισχύος.



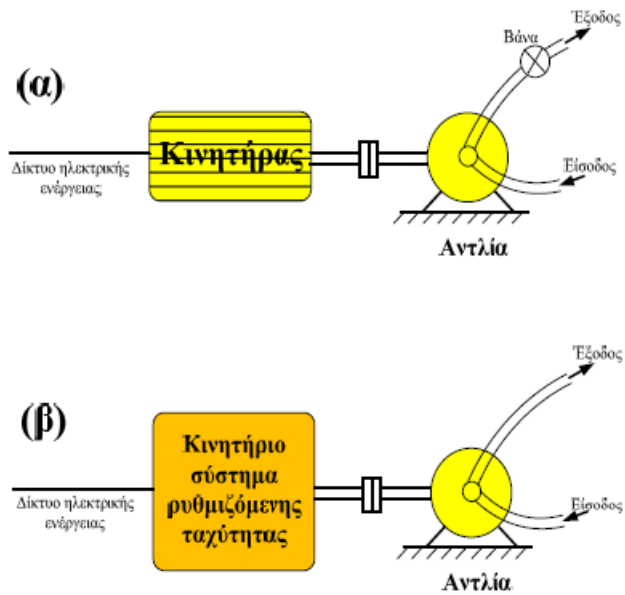
Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση των περιοχών επιστήμης και τεχνολογίας των Ηλεκτρονικών [10].

2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

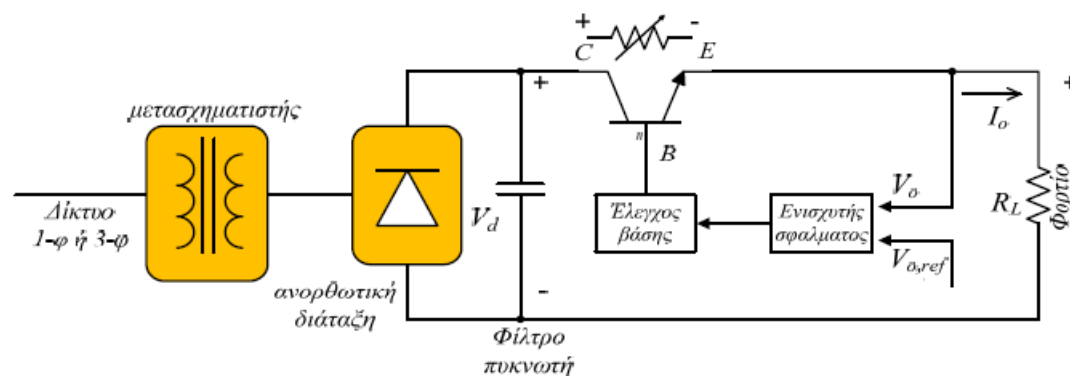
Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, σκοπός των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο μετασχηματισμός των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ή αντίστροφα η μετατροπή της συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή αυτής. Μέσω αυτών των μετατροπέων επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων π.χ. μηχανών συνεχούς ρεύματος, μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος κ.λ.π., όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες είναι αρκετά πολύπλοκες. Επιπλέον, οι διαδικασίες μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών με ταυτόχρονη μετατροπή της ενέργειας, π.χ. ηλεκτρική σε μηχανική, πρέπει να διεκπεραιώνεται γρήγορα, αξιόπιστα, με υψηλές τιμές της απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, καθώς και με μικρό κόστος. Στις εφαρμογές τα συστήματα με ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος εκτείνονται από την περιοχή των μικρών μεγεθών ισχύος (mW) μέχρι πολύ μεγάλες τιμές (τάξεως εκατοντάδων MW).

Σε κάθε διαδικασία μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος, όπως έχουμε προαναφέρει, οι απώλειες πρέπει να είναι μικρές και η απόδοση μεγάλη. Αυτό είναι σημαντικό, λόγω του κόστους της ενέργειας και της δυσκολίας απαγωγής της θερμότητας που παράγεται από την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, σημαντικοί παράγοντες είναι η ελάττωση του όγκου, του βάρους και του κόστους. Στα περισσότερα συστήματα οι παραπάνω στόχοι δεν μπορούν να επιτευχθούν με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, στα οποία τα ημιαγωγικά στοιχεία λειτουργούν στην ενεργό (γραμμική) περιοχή λειτουργίας.

Για παράδειγμα, στο σχήμα 2.5, φαίνεται η δομή ενός γραμμικού τροφοδοτικού συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.4: Μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικό κινητήριο σύστημα (α) και με κινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας (β).

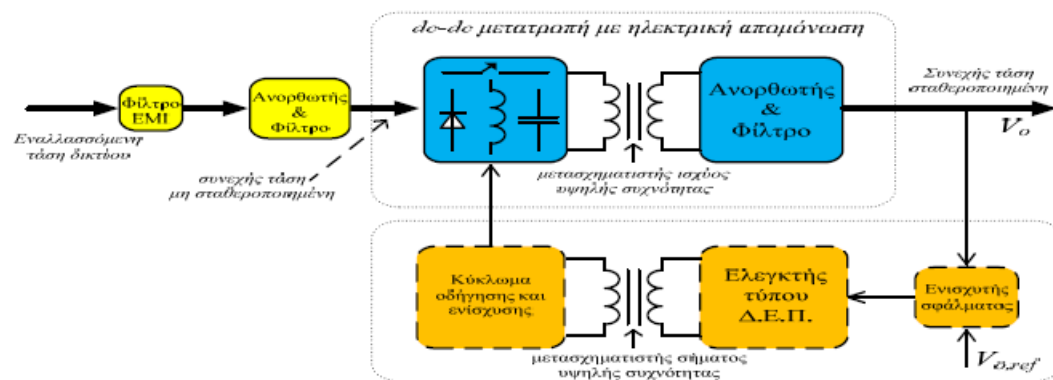


Σχήμα 2.5: Βασική δομή γραμμικού τροφοδοτικού συνεχούς ρεύματος.

Παρατηρούμε ότι, ανάμεσα σ' αυτό και το δίκτυο παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού για να υπάρχει ηλεκτρική απομόνωση καθώς και να παρέχει τάση κατάλληλης τιμής στην είσοδο του τροφοδοτικού. Στη συνέχεια, συνδέεται μία γέφυρα πλήρους ανόρθωσης και ένα φίλτρο αποτελούμενο από ένα πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας με σκοπό να δημιουργηθεί μια συνεχή τάση με μικρή κυμάτωση. Το ημιαγωγικό στοιχείο (συνήθως τύπου διπολικού τρανζίστορ, *BJT*) ελέγχεται, ώστε να απορροφά (δηλ. να εμφανίζεται στα άκρα του) τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της τάσης στα άκρα του πυκνωτή και της τάσης εξόδου και έτσι να προκαλεί σταθεροποίηση της τάσης εξόδου στην επιθυμητή τιμή. Ο έλεγχος γίνεται συγκρίνοντας την εκάστοτε στιγμή

την τάση εξόδου με την επιθυμητή τιμή και ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρεύμα βάσης του ημιαγωγικού στοιχείου. Το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και συμπεριφέρεται ως μεταβλητή αντίσταση. Σ' αυτή την περιοχή λειτουργίας το τρανζίστορ, άρα και το τροφοδοτικό, έχει μικρή απόδοση και πιθανόν να χρειάζεται και μέσα απαγωγής της θερμοκρασίας του. Επιπλέον, ο μετασχηματιστής, υπολογίζεται στα 50Hz ή 60Hz, άρα είναι σχετικά μεγάλος και βαρύς, ενώ μεγάλη είναι και η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή που απαιτείται.

Με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος η ίδια μετατροπή μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια τοπολογία ενός διακοπτικού τροφοδοτικού. Στο *σχήμα 2.6*, φαίνεται η βασική δομή ενός διακοπτικού τροφοδοτικού με ηλεκτρική απομόνωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ίδια εφαρμογή (μια πιθανή τοπολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αυτή του flyback). Το τρανζίστορ στη συγκεκριμένη τοπολογία λειτουργεί ως διακόπτης (με μικρές απώλειες) με υψηλή διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (γύρω στα 150kHz), γεγονός που επιτρέπει τη χρήση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας άρα και μικρότερου όγκου και βάρους. Τα συγκεκριμένα κυκλώματα, χρησιμοποιούνται σήμερα κατά κόρο, και θεωρούνται τα βέλτιστα όσον αφορά απόδοση, κόστος, όγκο, βάρος για συχνότητες λειτουργίας μέχρι τα 300kHz (εξαρτάται από την ισχύ εξόδου και τα χαρακτηριστικά εισόδου εξόδου).



Σχήμα 2.6: Βασική τοπολογία διακοπτικού τροφοδοτικού συνεχούς ρεύματος.

Τα βασικά **πλεονεκτήματα** των σύγχρονων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, σε σχέση με τις παλαιότερα χρησιμοποιούμενες ηλεκτρομηχανικές διατάξεις ή τις γραμμικά ελεγχόμενες ηλεκτρονικές διατάξεις, μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα :

- ❖ Μικρότερος όγκος και βάρος και μικρότερο κόστος αγοράς, για τις αντίστοιχες τιμές ισχύος.
- ❖ Λιγότερες απώλειες ισχύος, με συνέπεια υψηλό συντελεστή απόδοσης, που μπορεί να ξεπερνά το 90%. Το γεγονός αυτό συνεισφέρει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας.
- ❖ Λόγω έλλειψης κινητών μερών, όπως συμβαίνει στις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, οι στατικοί αυτοί μετατροπείς έχουν ελάχιστες ανάγκες συντήρησης, δεν απαιτούν ισχυρές βάσεις στήριξης και είναι σχεδόν αθόρυβοι στη λειτουργία τους.
- ❖ Λόγω του ηλεκτρονικού ελέγχου προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου (τάση, ρεύμα, ροπή, στροφές, κ.λ.π.)

- ❖ Βασικό **μειονέκτημα** των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος είναι η δημιουργία ανώτερων αρμονικών, τόσο από την πλευρά της τροφοδοσίας τους (που μπορεί να είναι το δίκτυο), όσο και από την πλευρά του φορτίου. Οι αρμονικές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα είτε την παρενόχληση της λειτουργίας γειτονικών ηλεκτρικών συσκευών (*Electromagnetic Interference* ή *EMI*) και την αύξηση της άεργου ισχύος, είτε την αύξηση των απωλειών. Η μείωση των δημιουργούμενων ανώτερων αρμονικών, με στόχο την κατά το δυνατόν εξάλειψη των αρνητικών τους επιδράσεων, αλλά και η βελτίωση του συντελεστή ισχύος, αποτελεί θέμα εντατικής έρευνας τα τελευταία χρόνια.

Επίσης, πρέπει να επισημανθεί με ιδιαίτερη έμφαση, ότι οι διαδικασίες μετατροπών ενέργειας διεκπεραιώνονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος, κυρίως δε μέσω μικροεπεξεργαστών και γενικά της ψηφιακής τεχνολογίας. Αυτό είναι αναγκαίο, διότι τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος στην ουσία λειτουργούν ως διακοπτικές μονάδες, των οποίων η διακοπτική λειτουργία διεκπεραιώνεται με εντολές προερχόμενες από ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα κατάλληλα προγραμματισμένα σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των φορτίων. Συνεπώς, **η πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος καθορίζεται αφενός από τη δημιουργία νέων, βελτιωμένων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αφετέρου και από τις εξελίξεις στα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος, π.χ. στη μικροηλεκτρονική.**

Τα συστήματα που βασίζονται στα ηλεκτρονικά ισχύος, λοιπόν, παρέχουν τη δυνατότητα αφ' ενός της ευέλικτης ρύθμισης της ποσότητας της παρεχόμενης ισχύος, αφ' ετέρου της σημαντικής βελτίωσης του βαθμού απόδοσης. Σύμφωνα με επιστημονικές εκτιμήσεις, που είχαν γίνει ήδη προ εικοσιπενταετίας [16], η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται περί το 40% της συνολικής ενέργειας, που καταναλώνεται σε ολόκληρο το πλανήτη και συνεπώς είναι εύλογος ο ισχυρισμός, ότι ο βαθμός απόδοσης των διατάξεων μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι όσο το δυνατό υψηλότερος, όπως βεβαίως το ίδιο πρέπει να συμβαίνει με κάθε διάταξη μετατροπής οποιασδήποτε μορφής ενέργειας. Κατά τις ίδιες εκτιμήσεις, ένα ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας, που υπερβαίνει το 50%, φθάνει στους καταναλωτές αφού διέλθει μέσω διατάξεων και συστημάτων μετατροπής αποτελούμενων από ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτή η ανάπτυξη αναμένεται να μεγαλύτερη τα επόμενα χρόνια και το ποσοστό να αυξηθεί λαμβάνοντας υπόψη μας το ενεργειακό πρόβλημα που υπάρχει σε συνδυασμό με την οικολογική ευαισθητοποίηση των πολιτών και το συνεχώς αυξανόμενο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, όπως το μηχανικό έργο, η θερμότητα, ο φωτισμός, κ.λ.π.. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πιο γνωστές και αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις χρήσεως [2, 18-22, 45].

- ❖ *Οικιακές εφαρμογές* (ψύξη και κατάψυξη, θέρμανση χώρων, κλιματισμός, μαγείρεμα, φωτισμός, ψυχαγωγικός εξοπλισμός και εξοπλισμός γραφείου, κ.α.)
- ❖ *Εμπορικές εφαρμογές* (θέρμανση-εξαερισμός-κλιματισμός, κεντρική ψύξη, φωτισμός, υπολογιστές και εξοπλισμός γραφείου, συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας UPS, ανελκυστήρες, κ.α.)
- ❖ *Βιομηχανικές εφαρμογές* (αντλίες, συμπιεστές, στροβιλοσυμπιεστές και εξαεριστήρες, εργαλειομηχανές, φούρνοι τόξου και επαγωγικοί φούρνοι, φωτισμός, βιομηχανικά laser, επαγωγική θέρμανση, συγκολλήσεις, κ.α.)
- ❖ *Εφαρμογές Μεταφορών* (ηλεκτροκίνητα οχήματα, φορτιστές μπαταριών, σιδηρόδρομοι υπέργειοι και υπόγειοι, τραμ και τρόλεϊ, αυτοκίνητα, κ.α.)
- ❖ *Κοινωφελή συστήματα* (μεταφορά υψηλής dc τάσης, διόρθωση συντελεστή ισχύος, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, υδραγωγεία, κ.α.)
- ❖ *Διαστημικές εφαρμογές* (τροφοδοσία συστημάτων τηλεπικοινωνίας, συστήματα τροφοδοσίας δορυφόρων, συστήματα τροφοδοσίας αεροσκαφών, κ.α.)
- ❖ *Εφαρμογές Τηλεπικοινωνιών* (φορτιστές μπαταριών, διακοπτικά τροφοδοτικά, συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας, κ.α.)

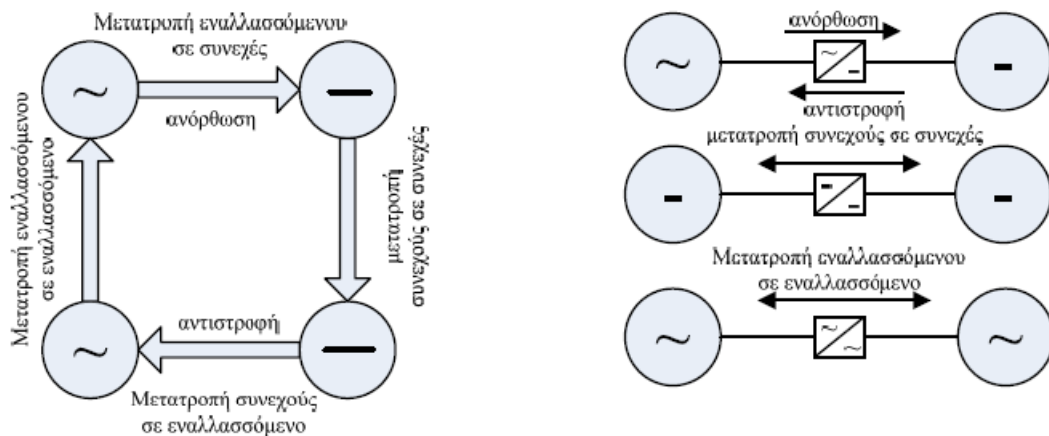
2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Κριτήρια κατηγοριοποίησης μπορούν να είναι η μορφή της μετατρεπόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η ισχύς του μετατροπέα, ο τύπος των χρησιμοποιούμενων ημιαγωγικών στοιχείων, ο τρόπος μετάβασης του ημιαγωγικού στοιχείου, η λειτουργία του μετατροπέα, η ροή ισχύος (μονόδρομη ή αμφίδρομη), κ.λ.π.. Συχνά τα ηλεκτρονικά συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν δύο βαθμίδες, δηλαδή αποτελούνται από δύο μετατροπείς, ο δεύτερος εκ των οποίων τροφοδοτείται από τον πρώτο μέσω μιας ζεύξης συνεχούς τάσης. Οποιοδήποτε όμως κριτήριο και να χρησιμοποιηθεί, δεν υπάρχει δυνατότητα σαφούς και ευκρινούς κατηγοριοποίησης των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και πάντα θα υπάρχουν εξαιρέσεις.

Μια ταξινόμηση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος μπορεί να γίνει με βάση τη μορφή της μετατρεπόμενης και ανταλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (ταξινόμηση σύμφωνα με την εξωτερική συμπεριφορά μεμονωμένων διατάξεων), μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες τέσσερις βασικές κατηγορίες (σχήμα 2.7) :

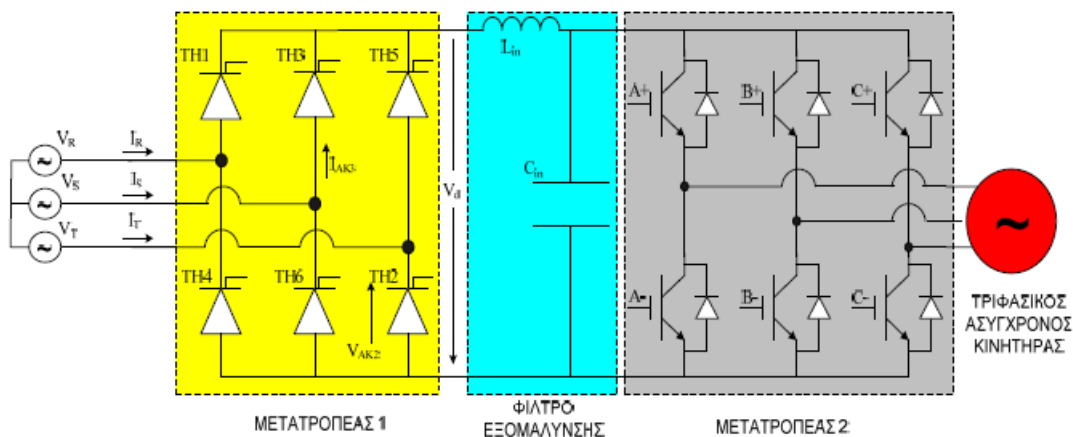
- 1) Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (AC-AC Converters): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση, μιας ορισμένης ενεργού τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη τάση άλλης ενεργού τιμής, της ίδιας ή άλλης συχνότητας και ενίοτε άλλου αριθμού φάσεων. Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το ένα σύστημα εναλλασσόμενου στο άλλο, το οποίο έχει διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

- 2) Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση ή Ανορθωτικές διατάξεις (AC-DC Converters or Rectifiers): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση, μιας ορισμένης ενεργού τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε συνεχή τάση συγκεκριμένης μέσης τιμής και πολικότητας. Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα εναλλασσόμενου σε ένα σύστημα συνεχούς τάσης.
- 3) Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC Converters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση συγκεκριμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και ενίοτε και άλλης πολικότητας. Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το ένα σύστημα συνεχούς τάσης στο άλλο, το οποίο έχει διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.
- 4) Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση ή Αντιστροφείς (DC-AC Converters or Inverters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση συγκεκριμένης ενεργού τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων. Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα από ένα σύστημα συνεχούς τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης.



Σχήμα 2.7: Ταξινόμηση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος μπορεί να γίνει με βάση τη μορφή της μετατρεπόμενης και ανταλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

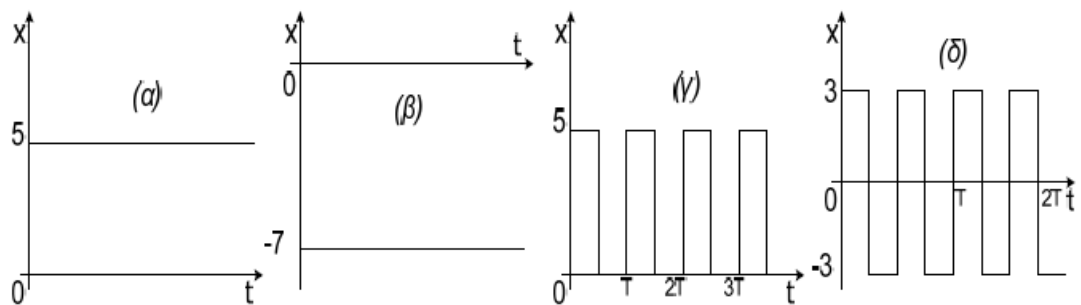
Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, ένας ολοκληρωμένος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αποτελείται από το συνδυασμό μεμονωμένων διατάξεων, οι οποίες ανήκουν σε μία ή περισσότερες από τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Παραδείγματος χάριν, ένα σύστημα ελέγχου των στροφών ενός κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, που τροφοδοτείται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελείται από ένα μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση, ελεγχόμενο ή μη, ένα ενδιάμεσο στάδιο εξομάλυνσης και ένα μετατροπέα συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση, μεταβλητής ενεργού τιμής και συχνότητας (σχήμα 2.8).



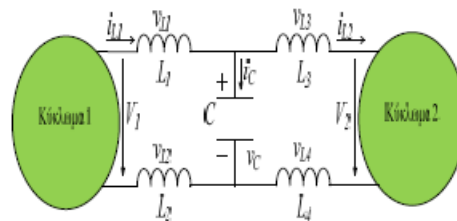
ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

- 1) Αναφέρατε ποια είναι η μέση, η ενεργός και η μέγιστη τιμή της φασικής τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Επίσης, αναφέρατε τη τιμή της συχνότητας αυτής της τάσης.
- 2) Αναφέρατε ποια είναι η μέση, η ενεργός και η μέγιστη τιμή της πολικής τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας Ελλάδα. Επίσης, αναφέρατε τη τιμή της περιόδου αυτής της τάσης.
- 6) Να υπολογιστεί η μέση, η ενεργός και η μέγιστη τιμή των ακόλουθων κυματομορφών :



- 7) Αν οι φασικές τάσεις ενός τριφασικού συμμετρικού συστήματος δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις : $v_R(t) = \sqrt{2} \cdot V_\phi \cdot \sin(\omega t)$ Volt, $v_S(t) = \sqrt{2} \cdot V_\phi \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$ Volt, $v_T(t) = \sqrt{2} \cdot V_\phi \cdot \sin(\omega t + 240^\circ)$ Volt, και $V_\phi = 230$ Volt να γράψετε τις πλήρεις μαθηματικές εξισώσεις, που δίνουν τις ακόλουθες πολικές τάσεις του συστήματος : $v_{RS}(t)$, $v_{ST}(t)$, $v_{TR}(t)$, $v_{SR}(t)$, $v_{TS}(t)$ και $v_{RT}(t)$.
- 8) Για το τριφασικό σύστημα του προηγούμενου ερωτήματος, αν τη χρονική στιγμή t_1 η στιγμιαία τιμή της $v_R(t_1)$ είναι ίση με 230 Volt, να υπολογίσετε τη στιγμιαία τιμή όλων των τάσεων του κυκλώματος (φασικών και πολικών) τη χρονική στιγμή t_1 .
- 10) Ένα φορτίο καταναλώνει ενεργό ισχύ 1000 Watt με συντελεστή ισχύος 0,86. Να υπολογιστούν η άεργος και η φαινόμενη ισχύς που απαιτεί το φορτίο από την πηγή.
- 11) Για το κύκλωμα του διπλανού σχήματος να υπολογιστεί η μέση τιμή της τάσης V_2 και της τάσης V_C , αν :
 - α) $v_1(t) = 10 + 100 \cdot \sin(\omega \cdot t)$
 - β) $v_1(t) = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t) + \sqrt{2} \cdot 200 \cdot \sin(\omega \cdot t)$
 Επίσης, να υπολογιστεί η μέση τιμή του ρεύματος I_{L2} και I_C αν $i_{L1}(t) = 3 + 10 \cdot \sin(\omega \cdot t)$.



ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

- 5) Να αναφέρετε βασικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος που γνωρίζετε.
- 6) Στην καθημερινότητά σας, χρησιμοποιείτε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος; Αν ναι να αναφέρετε κάποια παραδείγματα.
- 8) Με βάση την κατηγοριοποίηση των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος ανάλογα με τη μορφή της μετατρεπόμενης και ανταλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ποιες κατηγορίες μετατροπών γνωρίζετε;
- 12) Να περιγράψετε τη δομή ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος για τον έλεγχο των στροφών ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Από πόσους και ποιους μετατροπείς αποτελείται το πλήρες σύστημα;