Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ

Βασίλης Ζαγκανάς, Δρ. ΤΗΜΜΥ ΑΠΘ
vaszagk@hotmail.com

Δομή μαθήματος

1. Εισαγωγή – Επανάληψη
2. Παραλληλισμός γεννητριών
3. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία
4. Σύγχρονοι κινητήρες
5. Ηλεκτροπρόωση
6. Υψηλές Τάσεις σε πλοία
7. Ασύγχρονοι κινητήρες

Δομή μαθήματος

1. **<u>Εισαγωγή – Επανάληψη</u>**

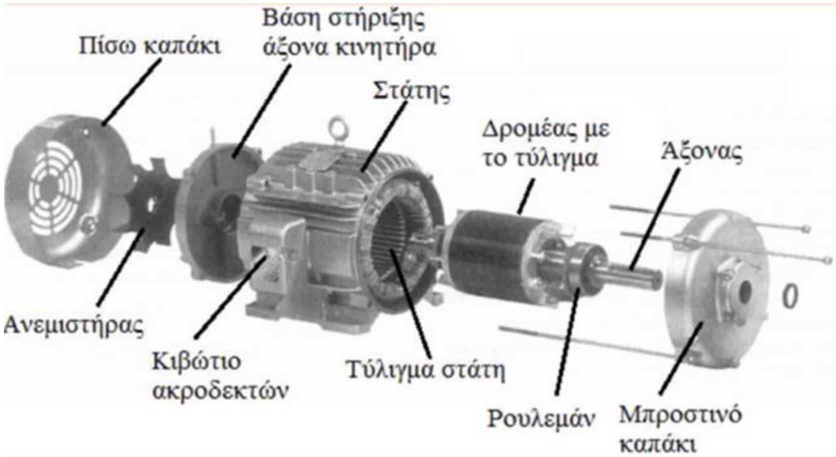
- Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές – αρχή λειτουργίας – κατασκευή
- Τριφασικά συστήματα αστέρας – τρίγωνο. Βασικές σχέσεις τάσεων και ρευμάτων
- Τριφασικά συστήματα - Ισχύς
- Μιγαδική αναπαράσταση διανυσματικών μεγεθών σε τριφασικά συστήματα
- Τριγωνομετρικοί αριθμοί και πράξεις
- Νόμος του Ohm – Νόμοι του Kirchhoff

Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

- Γεννήτρια και κινητήρας είναι πρακτικά η ίδια ηλεκτρική μηχανή, με <u>αντίθετη πορεία μετατροπής ενέργειας</u>.

Γεννήτρια	Κινητήρας
Μηχανική ενέργεια (περιστρεφόμενος δρομέας)	**Ηλεκτρική ενέργεια** (στα τυλίγματα του στάτη)
↓	↓
Ο **δρομέας** δημιουργεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο	Ο **στάτης** δημιουργεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο
↓	↓
Ηλεκτρική ενέργεια (στα τυλίγματα του στάτη)	**Μηχανική ενέργεια** (περιστρεφόμενος δρομέας)

Σύγχρονη γεννήτρια

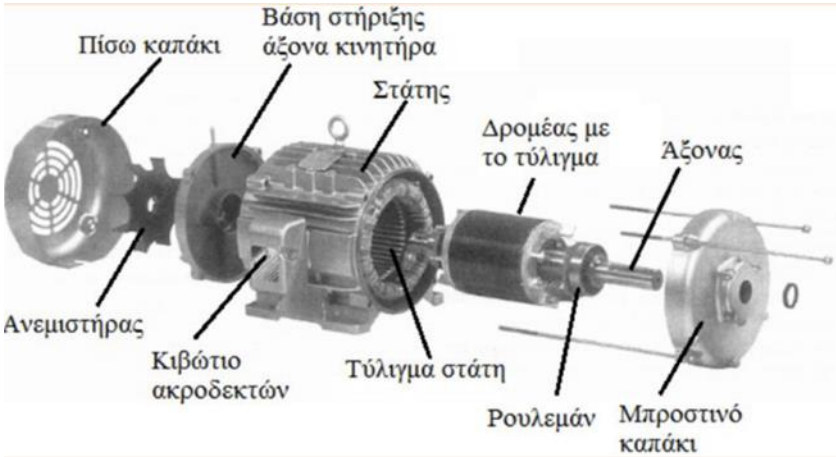


- Λέγεται και εναλλακτήρας
- Είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται το τύλιγμα του δρομέα με συνεχές ρεύμα (ή μπορεί να είναι μαγνήτης)
- Έτσι ο δρομέας είναι πρακτικά ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης, ο οποίος καθώς περιστρέφεται λόγω κάποιας κινητήρια μηχανής, μαζί του περιστρέφεται και το μαγνητικό του πεδίο, «στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο», Rotating Magnetic Field (RMF).

Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

video

Σύγχρονη γεννήτρια



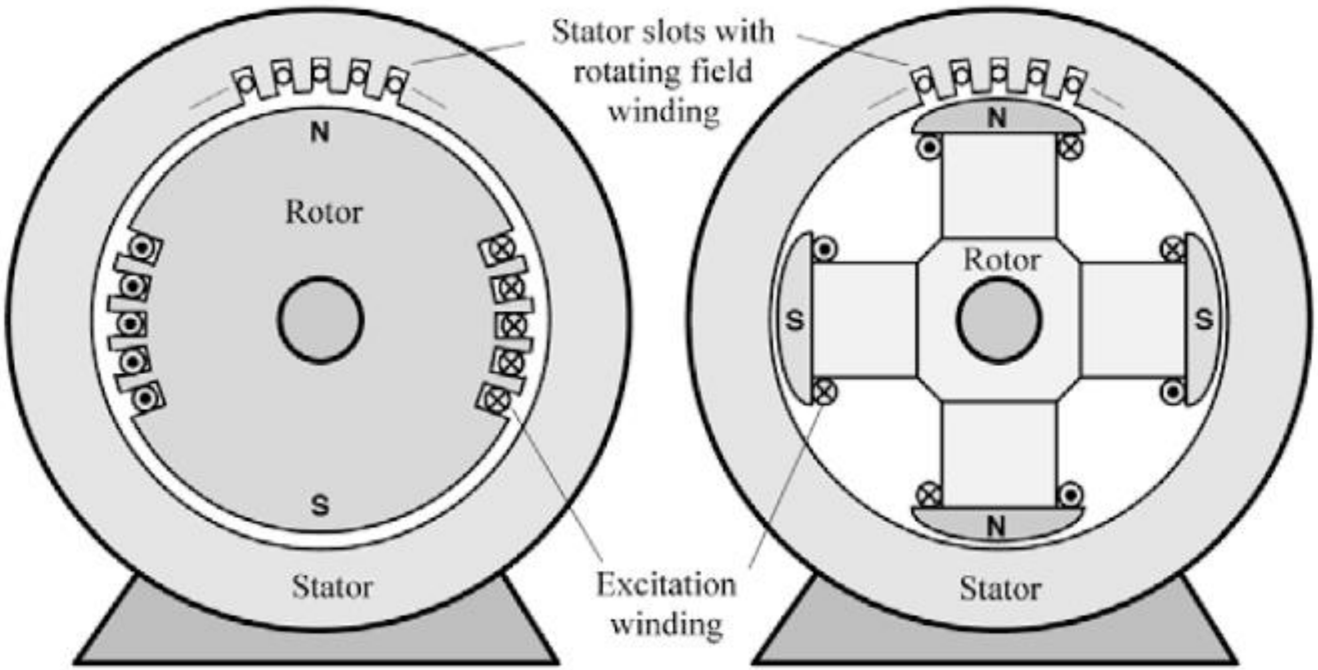
- Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα προκαλεί μέσω επαγωγής διαφορά δυναμικού (**επαγόμενη τάση**) στα τυλίγματα του στάτη.
- Έτσι η **μηχανική ενέργεια** της περιστροφής του δρομέα **μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια** στο στάτη.

Σύγχρονη γεννήτρια

- Ο δρομέας (ή ρότορας) κατασκευάζεται από **δυναμοελάσματα** για τον περιορισμό των απωλειών λόγω δινορρευμάτων.
- Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε **κυλινδρικός** (cylindrical rotor), όπου τα τυλίγματα τοποθετούνται σε αυλακώσεις στην επιφάνεια του δρομέα, είτε **έκτυπων πόλων** (salient pole rotor), όπου οι πόλοι προεξέχουν από την επιφάνεια του δρομέα.
- **Σε γεννήτριες έως 4 πόλων συνήθως χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί δρομείς**, ενώ για περισσότερους πόλους προτιμώνται δρομείς έκτυπων πόλων.

Σύγχρονη γεννήτρια

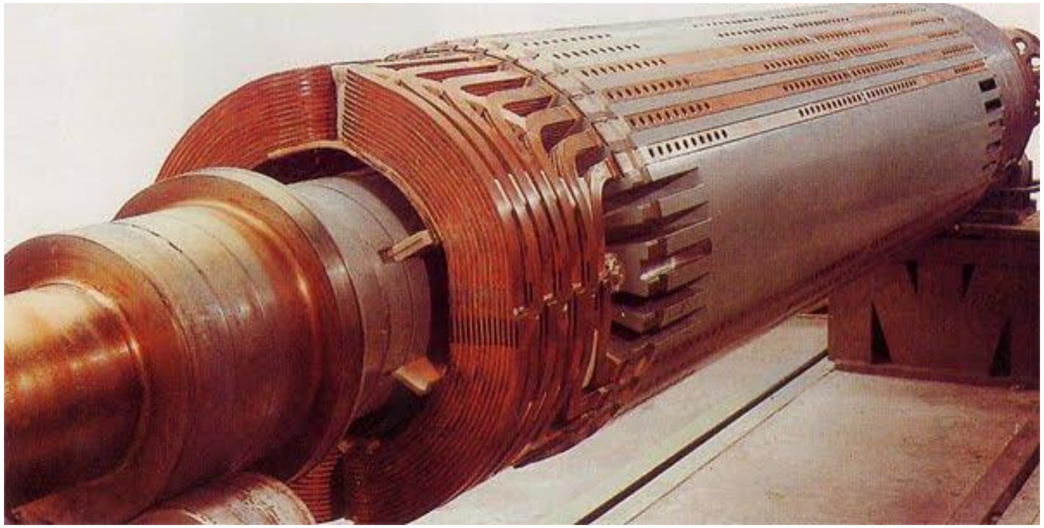
Κυλινδρικός δρομέας   Δρομέας έκτυπων πόλων



Cylindrical rotor   **Salient-pole rotor**

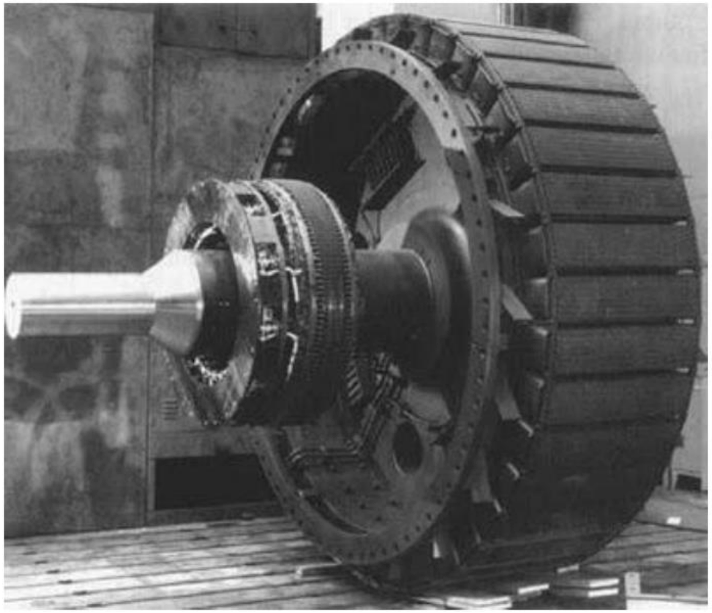
Σύγχρονη γεννήτρια

Κυλινδρικός δρομέας



- Μικρή διάμετρο – μεγάλο μήκος
- Υψηλές στροφές (1500 με 3600 rpm)*
- Συχνή χρήση σε θερμοηλεκτρικά και πυρηνικά εργοστάσια (στροβιλογεννήτριες).

Δρομέας έκτυπων πόλων



- Μεγάλη διάμετρος – μικρό μήκος
- Χαμηλές στροφές (κάτω από 1500 rpm)*
- Συχνή χρήση σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

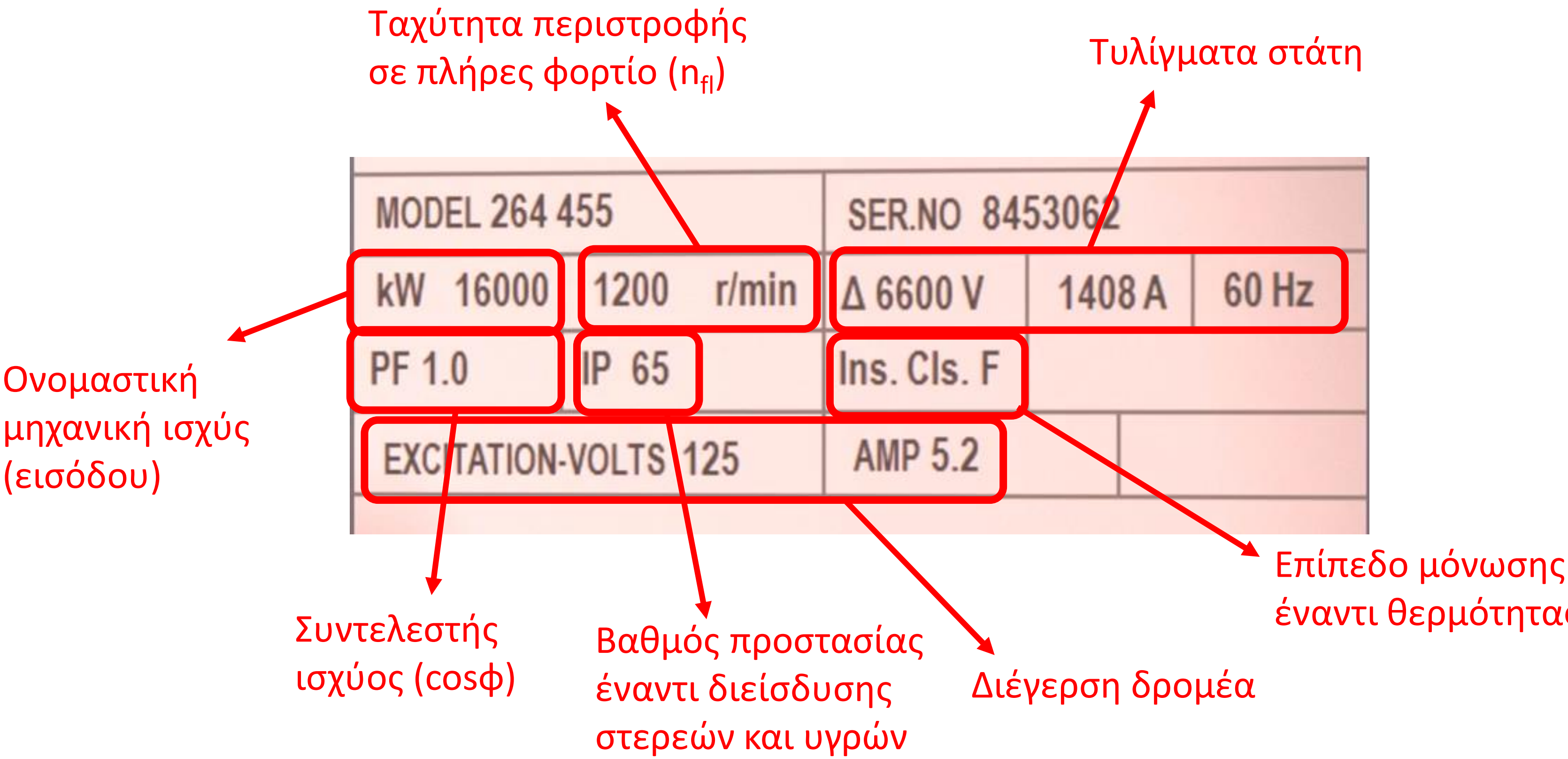
* θα δούμε λίγο παρακάτω γιατί….

Κατασκευή σύγχρονης γεννήτριας

video

Σύγχρονη γεννήτρια

- Τι σημαίνει καθετί στην πλακέτα μιας γεννήτριας:



Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

- **Σύγχρονη** γεννήτρια και **σύγχρονος** κινητήρας σημαίνει ότι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και ο δρομέας περιστρέφονται με την **ίδια ταχύτητα**.
- Αυτή η ταχύτητα περιστροφής είναι **σταθερή και ανεξάρτητη του φορτίου:**

$$n = \frac{120 \cdot f}{\text{Πόλοι}}$$

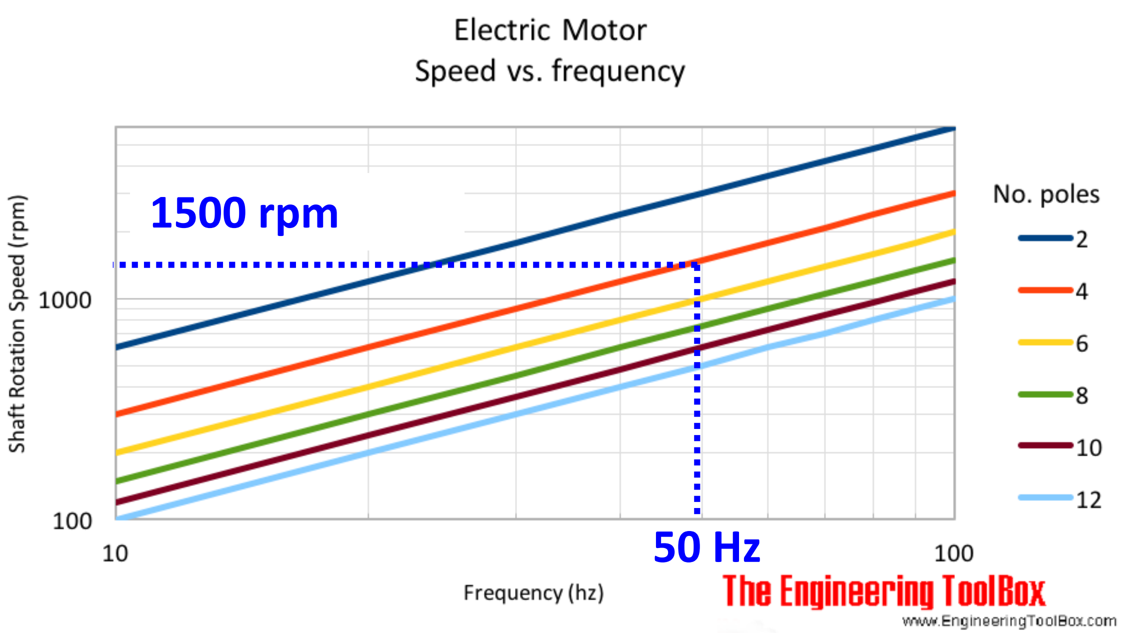
Ηλεκτρική συχνότητα (frequency), σε Hz

Γωνιακή ταχύτητα, σε στροφές ανά λεπτό (**r**ounds **p**er **m**inute, **rpm**)

Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

<u>Προσοχή:</u>
Οι άξονες είναι λογαριθμικοί!

$$n = \frac{120 \cdot f}{\Pi\acute{o}\lambda o\iota} \text{ (rpm)}$$



$$n = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

$$n = \frac{120 \cdot f}{\text{Πόλοι}} \text{ (rpm)}$$

- Αν θέλουμε να μετατρέψουμε την ταχύτητα περιστροφής **από rpm σε rad/s**:
  - 1 πλήρης περιστροφή αντιστοιχεί σε **2π rad**
  - 1 λεπτό έχει **60 δευτερόλεπτα**

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ (rad/s)}$$

Προσοχή:
Δεν έχει καμία σχέση με τα 60 Hz της συχνότητας!

Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

$$n = \frac{120 \cdot f}{\text{Πόλοι}} \text{ (rpm)}$$

Νωρίτερα είχαμε πει ότι:

- Σε γεννήτριες έως 4 πόλων συνήθως χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί δρομείς, ενώ για περισσότερους πόλους προτιμώνται δρομείς έκτυπων πόλων.
- Οι γεννήτριες με δρομέα έκτυπων πόλων χρησιμοποιούνται συνήθως όταν θέλουμε χαμηλές στροφές (κάτω από 1500 rpm).

- Γιατί συμβαίνει αυτό;

Με δεδομένη συχνότητα 50 Hz:

- Για 2 πόλους: $n = \frac{120 \cdot 50}{2}$ = **3000 rpm**

- Για 4 πόλους: $n = \frac{120 \cdot 50}{4}$ = **1500 rpm**

Κυλινδρικός δρομέας

- Για 8 πόλους: $n = \frac{120 \cdot 50}{8}$ = **750 rpm**

- Για 16 πόλους: $n = \frac{120 \cdot 50}{16}$ = **375 rpm**

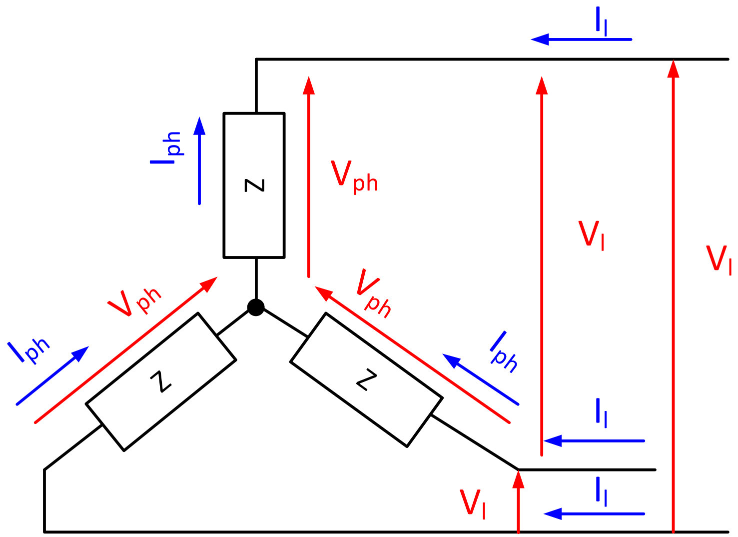
Δρομέας έκτυπων πόλων

Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

video

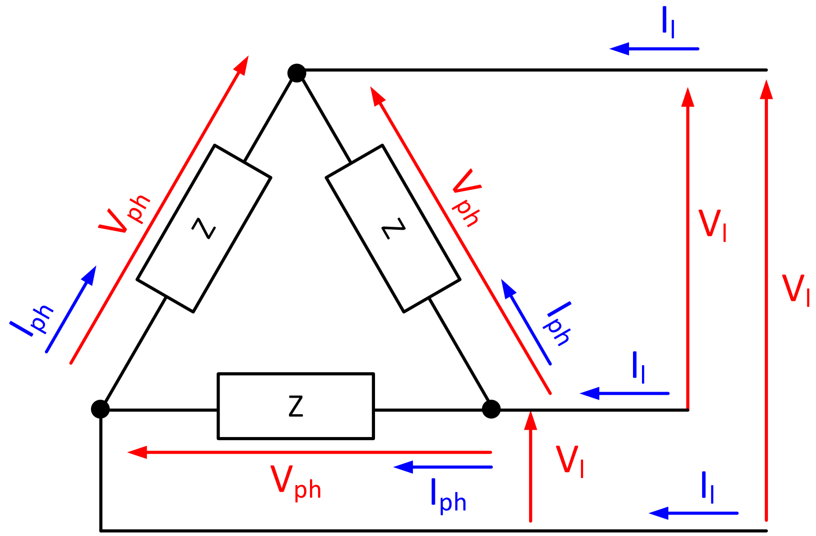
Τριφασικά συστήματα

Αστέρας (Star) - Y



$$\bar{V}_l = \sqrt{3}\bar{V}_{ph}$$
$$\bar{I}_l = \bar{I}_{ph}$$

Τρίγωνο (Delta) - Δ



$$\bar{V}_l = \bar{V}_{ph}$$
$$\bar{I}_l = \sqrt{3}\bar{I}_{ph}$$

Τριφασικά συστήματα

Ισχύς

Φαινόμενη Ισχύς: $\boxed{S = 3V_{ph}I_{ph} = \sqrt{3}V_l I_l}$ (VA)

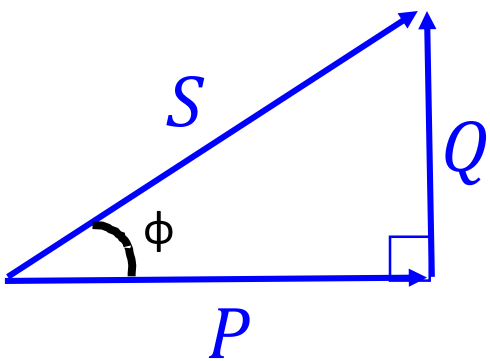
Προσοχή: Ισχύουν και οι δύο παραπάνω σχέσεις και σε αστέρα και σε τρίγωνο!

Ενεργός Ισχύς: $\boxed{P = S \cdot \cos\varphi}$ (Watt)

Άεργος Ισχύς: $\boxed{Q = S \cdot \sin\varphi}$ (VAR)

Τριφασικά συστήματα

Ισχύς



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

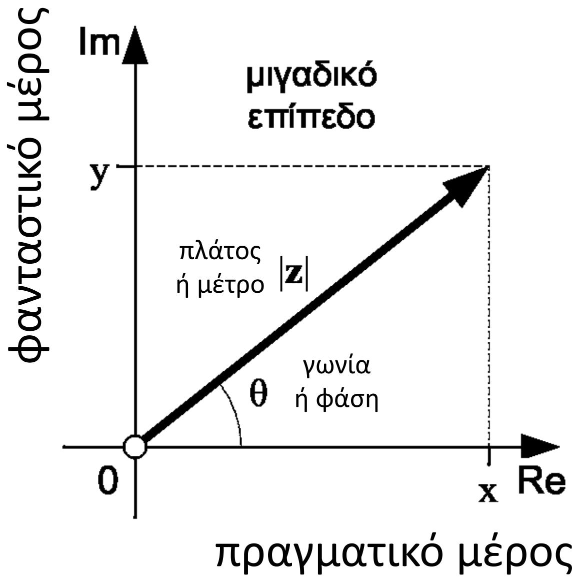
Αν αντικαταστήσουμε τις P και Q με τις σχέσεις της προηγούμενης σελίδας, προκύπτει:

$$S = \sqrt{(S\cos\varphi)^2 + (S\sin\varphi)^2}$$

$$= \sqrt{S^2[(\cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2]} \quad =1$$

$$= S$$

Μιγαδική αναπαράσταση διανυσματικών μεγεθών



Re[z]=x Im[z]=y

$$\bar{z} = \underbrace{x + jy}_{\text{ορθογωνική μορφή}} = \underbrace{|\bar{z}|\, e^{j\theta}}_{\text{πολική μορφή}}$$

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j \cdot \sin\theta$$ (τύπος του Euler)

Μετατροπή από ορθογωνική σε πολική μορφή

$$|\mathbf{z}| = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad \theta = \arctan\frac{y}{x}$$

Μετατροπή από πολική σε ορθογωνική μορφή

$$x = |\mathbf{z}|\cos\theta \qquad y = |\mathbf{z}|\sin\theta$$

- Για την **πρόσθεση και την αφαίρεση** βολεύει η **ορθογωνική** μορφή:

$$\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 = (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2)$$

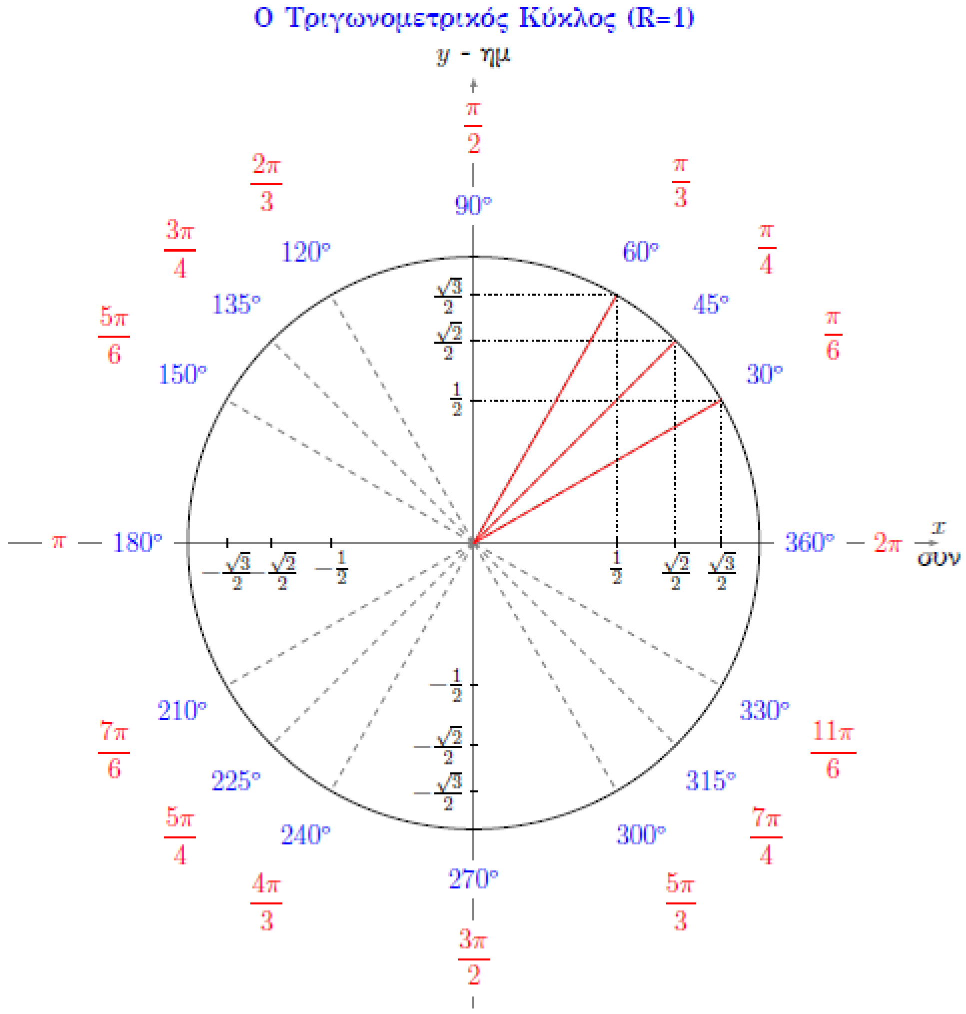
- Για τον **πολλαπλασιασμό και τη διαίρεση** βολεύει η **πολική** μορφή:

$$\mathbf{z}_1 \cdot \mathbf{z}_2 = |\mathbf{z}_1||\mathbf{z}_2|\, e^{j(\theta_1 + \theta_2)}$$

Τριγωνομετρικοί αριθμοί

Γωνία ω		Τριγωνομετρικοί αριθμοί			
σε μοίρες	σε rad	ημω	συνω	εφω	σφω
0°	0	0	1	0	Δεν ορίζεται
30°	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\sqrt{3}$
45°	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	1
60°	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
90°	$\frac{\pi}{2}$	1	0	Δεν ορίζεται	0

Τριγωνομετρικοί αριθμοί



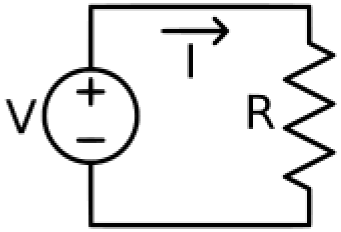
Τριγωνομετρικοί αριθμοί

Τριγωνομετρικοί αριθμοί αθροίσματος γωνιών
$\boxed{ημ(α+β)=ημα \cdot συνβ + συνα \cdot ημβ}$
$ημ(α-β)=ημα \cdot συνβ - συνα \cdot ημβ$
$\boxed{συν(α+β)=συνα \cdot συνβ - ημα \cdot ημβ}$
$συν(α-β)=συνα \cdot συνβ + ημα \cdot ημβ$
$εφ(α+β)=\dfrac{εφα + εφβ}{1-εφα \cdot εφβ}$
$εφ(α-β)=\dfrac{εφα - εφβ}{1-εφα \cdot εφβ}$
$σφ(α+β)=\dfrac{σφα \cdot σφβ - 1}{σφβ + σφα}$
$σφ(α-β)=\dfrac{σφα \cdot σφβ + 1}{σφβ - σφα}$

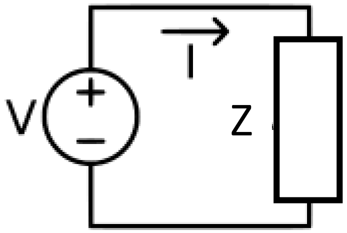
Τριγωνομετρικοί αριθμοί

Τριγωνομετρικές ταυτότητες	
$ημ^2x+συν^2x=1$	$συν^2x=\frac{1}{1+εφ^2x}$
$\mathbf{εφx}=\frac{ημx}{συνx}=\frac{1}{σφx}$	$ημ^2x=\frac{εφ^2x}{1+εφ^2x}$
$\mathbf{σφx}=\frac{συνx}{ημx}=\frac{1}{εφx}$	
$εφx \cdot σφx=1$	

Νόμος του Ohm



$$V = I \cdot R$$



$$V = I \cdot Z$$

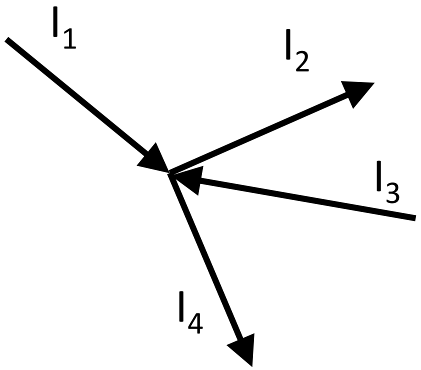
«Η πτώση τάσης κατά μήκος μιας σύνθετης αντίστασης είναι ίση με το γινόμενο της σύνθετης αντίστασης επί το ρεύμα που τη διαρρέει».

Νόμοι του Kirchhoff

1ος Νόμος του Kirchhoff

ή

Νόμος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος



«Το άθροισμα των ρευμάτων που φτάνουν σε έναν κόμβο είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που απομακρύνονται από τον κόμβο».

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

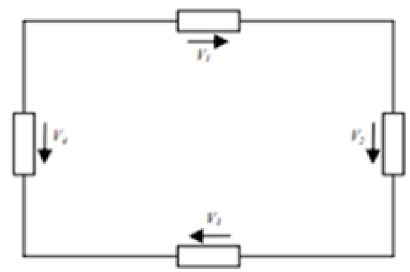
Νόμοι του Kirchhoff

2ος Νόμος του Kirchhoff

ή

Νόμος της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος

$$\sum V_{βρόχου} = 0$$



«Το άθροισμα των διαφορών δυναμικού (τάσεων) ενός κλειστού βρόχου είναι ίσο με μηδέν».

Ασκήσεις

Άσκηση 1.

Μια σύγχρονη γεννήτρια πρέπει να δουλεύει με ταχύτητα περιστροφής δρομέα 450 rpm και συχνότητα 60 Hz.

α) Ποια είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rad/s;

β) Πόσους πόλους πρέπει να έχει η γεννήτρια και γιατί;

γ) Θα επιλέγατε κυλινδρικό δρομέα ή δρομέα έκτυπων πόλων και γιατί;

Λύση

α) $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ (rad/s) $\Rightarrow$ $\omega = \frac{2\pi 450}{60} = 15\pi =$ **47.12** (rad/s)

β) $n = \frac{120 \cdot f}{\text{Πόλοι}}$ $\Rightarrow$ $\text{Πόλοι} = \frac{120 \cdot f}{n}$ $\Rightarrow$ $\text{Πόλοι} = \frac{120 \cdot 60}{450} =$ **16**

γ) Συνήθως για περισσότερους από 4 πόλους χρησιμοποιείται δρομέας έκτυπων πόλων. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση που έχουμε 16 πόλους θα χρησιμοποιήσουμε **δρομέα έκτυπων πόλων**.

Ασκήσεις

Άσκηση 2.

Να αποδειχθεί ότι ισοδυναμία της σχέσης της φαινόμενης ισχύος:

$$S = 3V_{ph}I_{ph} = \sqrt{3}V_l I_l$$

ισχύει τόσο σε συνδεσμολογία αστέρα όσο και σε συνδεσμολογία τριγώνου.

Λύση

Αστέρας

$$\bar{V}_l = \sqrt{3}\bar{V}_{ph}$$
$$\bar{I}_l = \bar{I}_{ph}$$

$$\Rightarrow \quad S = \sqrt{3}V_l I_l = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3}V_{ph}I_{ph} = 3\,V_{ph}I_{ph}$$

Τρίγωνο

$$\bar{V}_l = \bar{V}_{ph}$$
$$\bar{I}_l = \sqrt{3}\bar{I}_{ph}$$

$$\Rightarrow \quad S = \sqrt{3}V_l I_l = \sqrt{3}V_{ph} \cdot \sqrt{3}\,I_{ph} = 3\,V_{ph}I_{ph}$$