



Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

7. Εισαγωγή στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

Βασίλης Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής

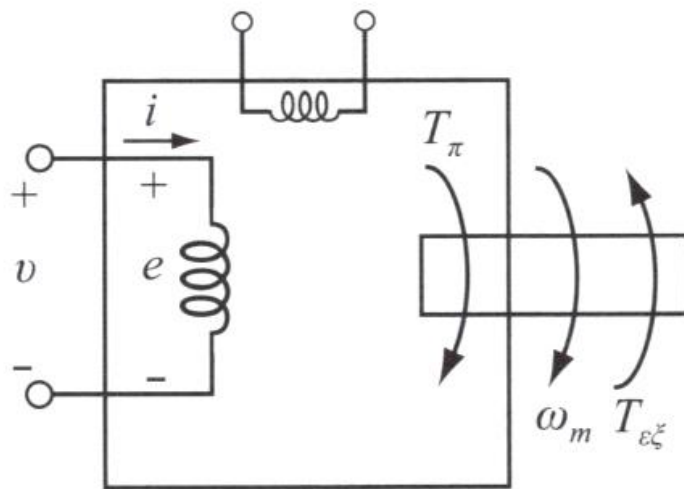
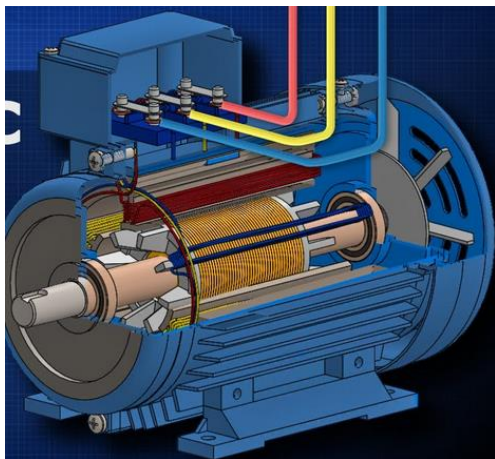


Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

- ❑ Σύγχρονες μηχανές
- ❑ Μηχανές επαγωγής (ασύγχρονες μηχανές)
 - Ποικίλλουν σε μέγεθος (ονομαστική ισχύος από λίγα W ως εκατοντάδες MW)
 - Μονοφασικές vs. Τριφασικές
 - Μπορούν να λειτουργήσουν είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας



Λειτουργία κινητήρα

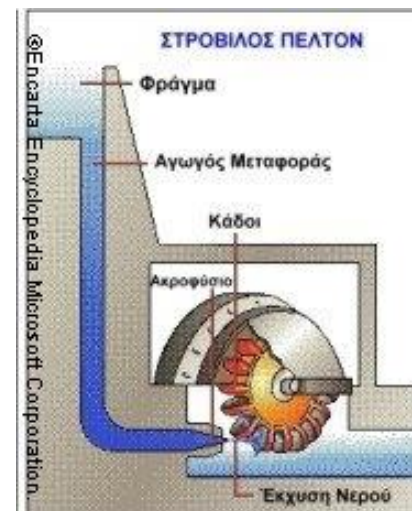
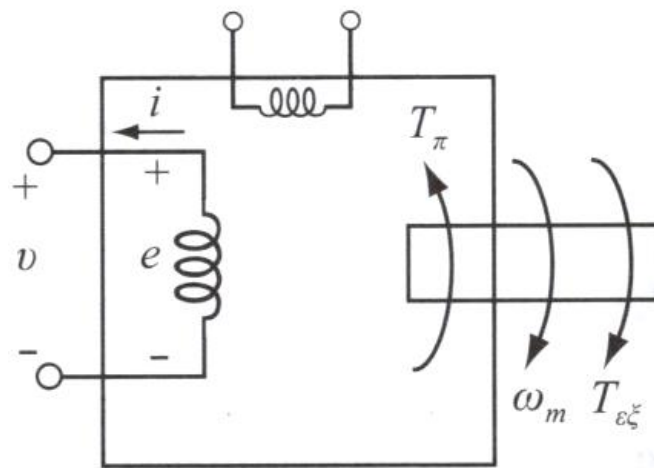
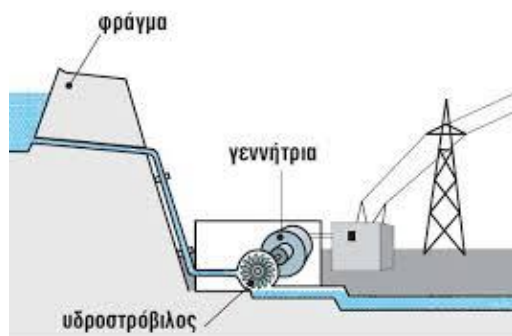


Ηλεκτρική
ενέργεια
στο τύλιγμα
τυμπάνου

Ροή ενέργειας

Μηχανική
ενέργεια στο
στρεφόμενο
δρομέα

Λειτουργία γεννήτριας



Ηλεκτρική
ενέργεια
στο τύλιγμα
τυμπάνου

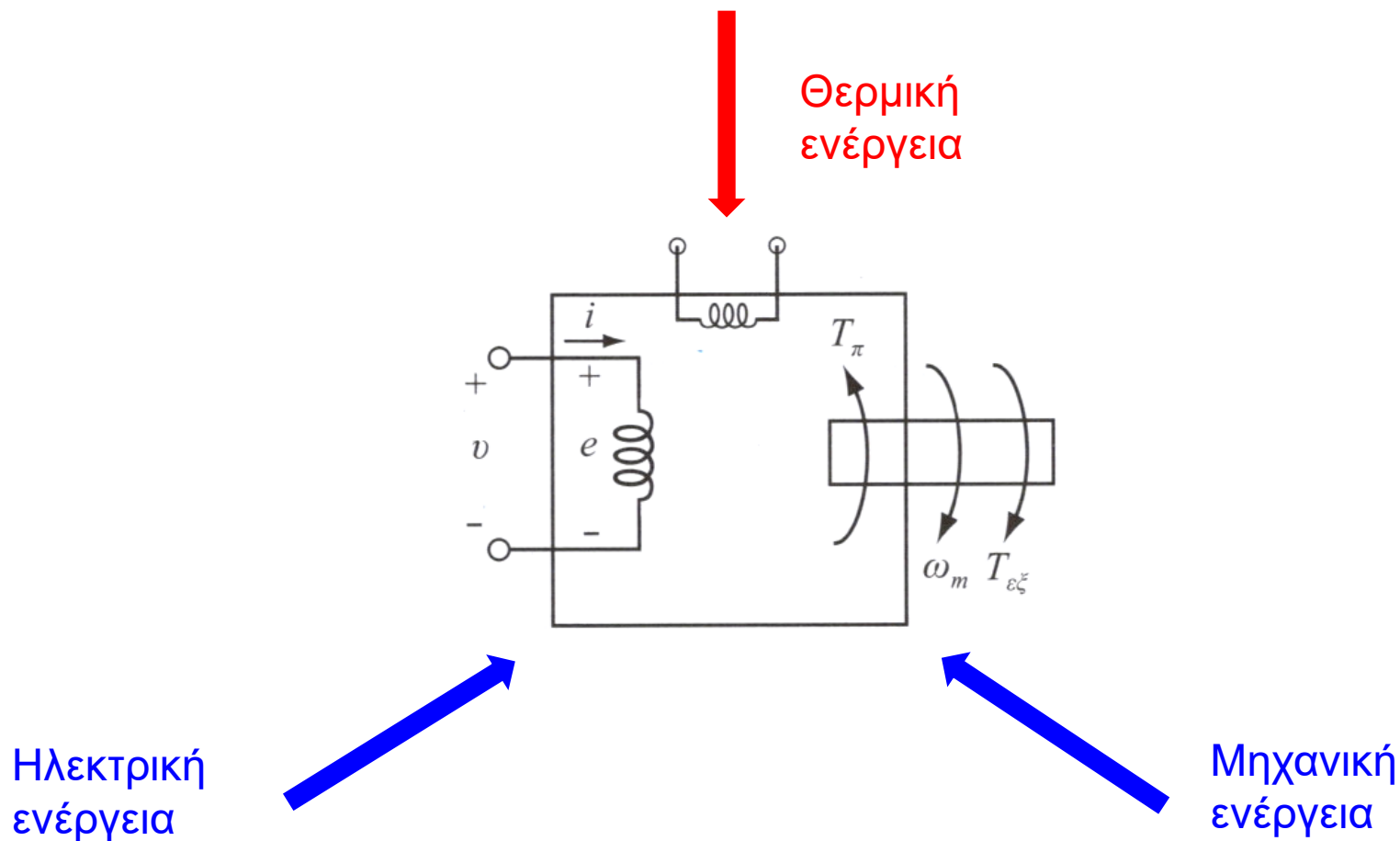


Ροή ενέργειας

Μηχανική
ενέργεια στο
στρεφόμενο
δρομέα

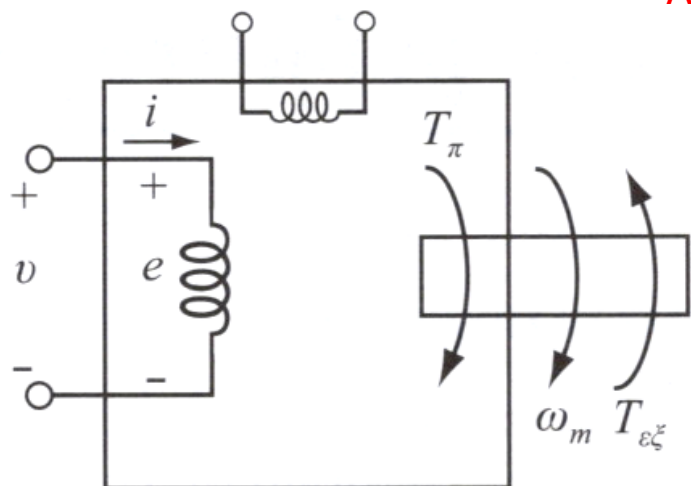


Λειτουργία πέδης



Χαρακτηριστικά λειτουργικά μεγέθη

Λειτουργία κινητήρα



$$v = ir + e$$

(Εφαρμοζόμενη τάση)

$$p_e = ei$$

(Απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς)

$$P_{\varepsilon\sigma} = T_{\pi}\omega_m$$

(Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς)

$$P_{\varepsilon\xi} = T_{\varepsilon\xi}\omega_m$$

(Εξωτερικά αποδιδόμενη μηχανική ισχύς)



Εξίσωση επιτάχυνσης

$$T_{\pi} - T_{\varepsilon\xi} = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

(λειτουργία κινητήρα)

$$T_{\varepsilon\xi} - T_{\pi} = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

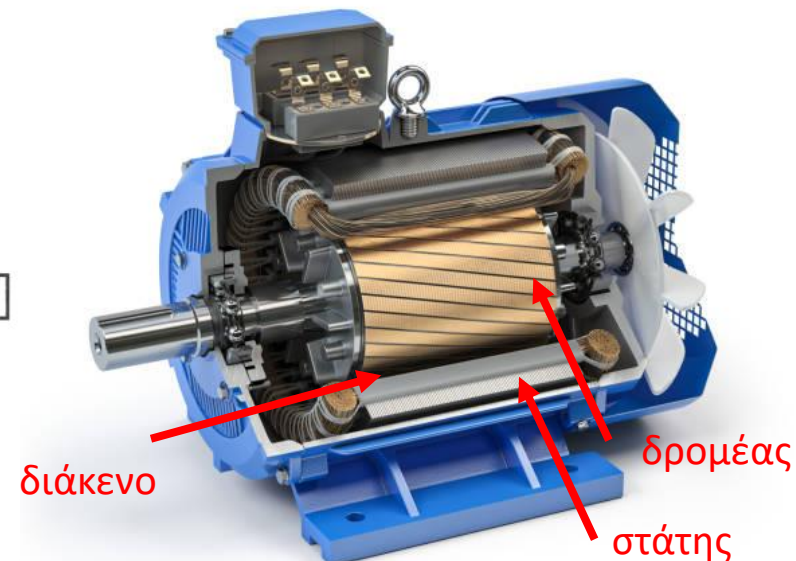
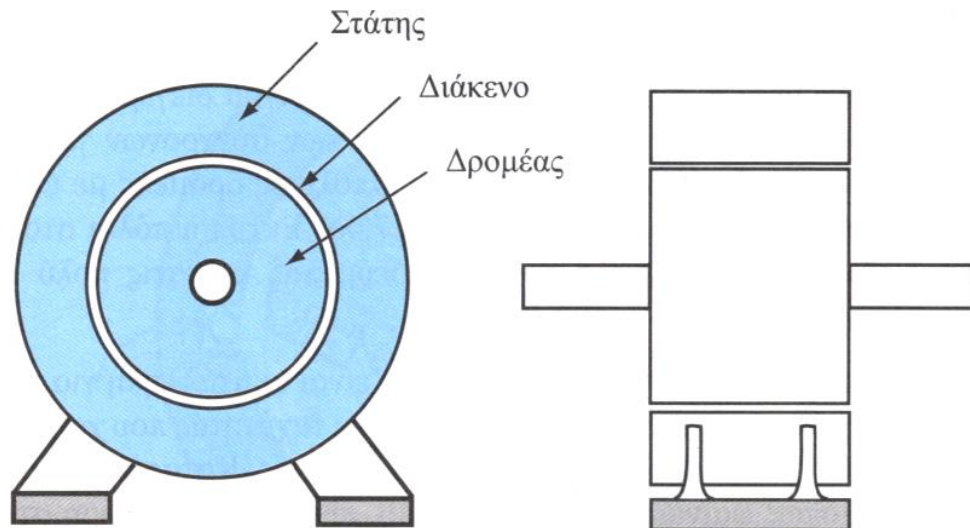
(λειτουργία γεννήτριας)

όπου $J = J_{\delta\rho\omicron\mu\epsilon\alpha} + J_{\phi\omicron\rho\rho\tau\iota\omicron\upsilon}$ η ροπή αδράνειας,
ενώ αμελήθηκαν οι απώλειες.

Συνθήκη ισορροπίας:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad \xrightarrow{\omega_m = \text{σταθερή}} \quad T_{\pi} = T_{\varepsilon\xi}$$

Δομή στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

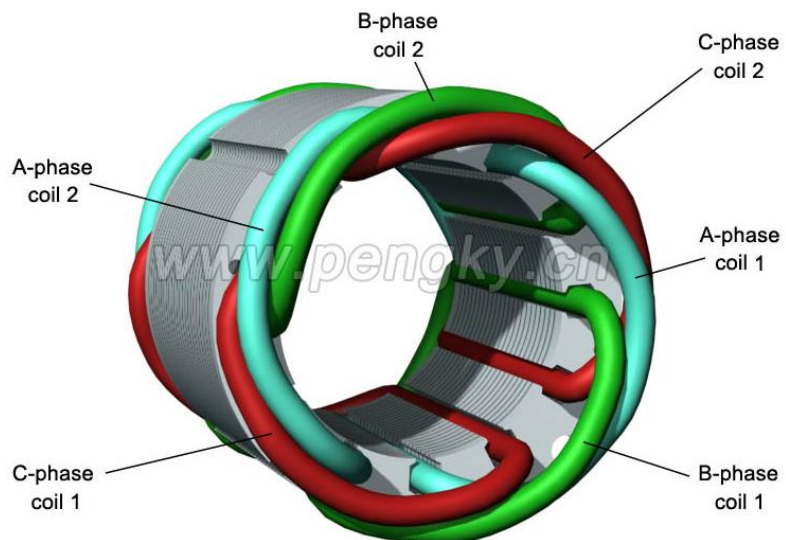


- ❑ **Στάτης:** κοίλος κύλινδρος, ακίνητος, από σιδηρομαγνητικό υλικό
- ❑ **Δρομέας:** συμπαγές σώμα από σιδηρομαγνητικό υλικό, στρεφόμενο εντός του στάτη
 - Κυλινδρικού σχήματος ή Έκτυπων πόλων
- ❑ **Διάκενο αέρα:** κενό λίγων mm μεταξύ στάτη και δρομέα



Στάτης

Οριζόντιου προσανατολισμού



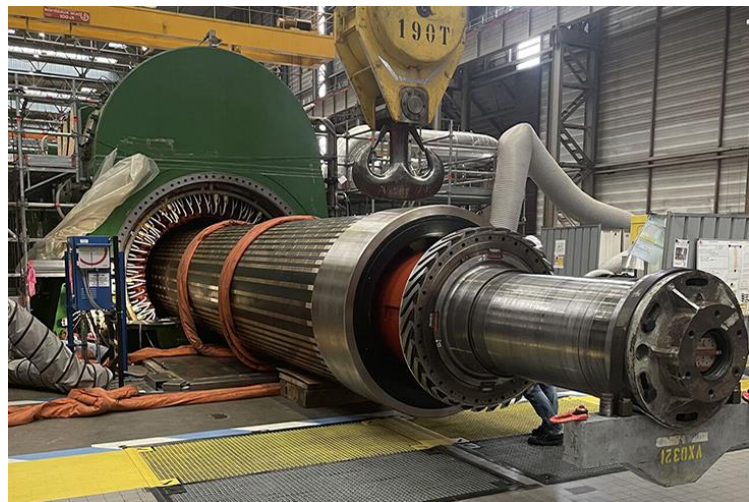
Κατακόρυφου προσανατολισμού





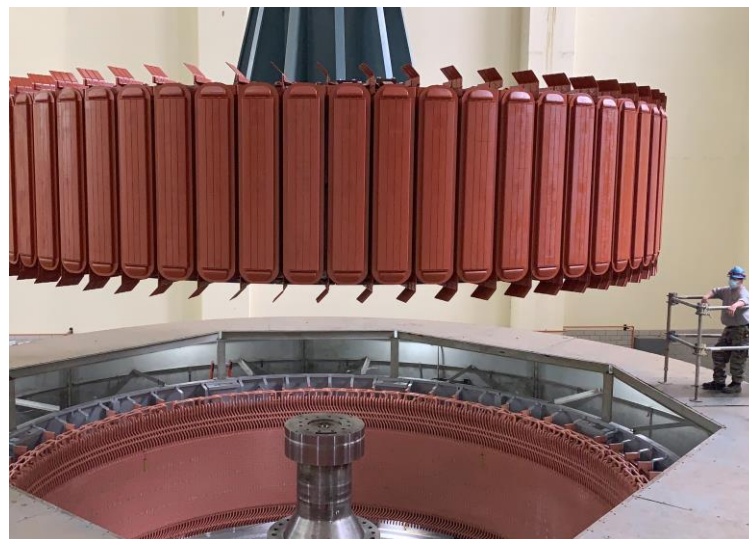
Δρομέας

Κυλινδρικός



Υψηλές ΣΑΛ (ΘΗΣ)

Έκτυπων πόλων



Χαμηλές ΣΑΛ (ΥΗΣ)

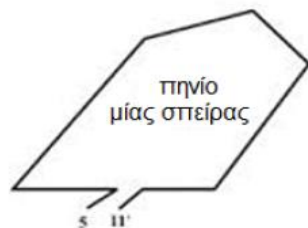
Τύλιγμα τυμπάνου (1)

- ❑ Κύριο τύλιγμα μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ανταλλαγή ενέργειας
- ❑ Μπορεί να βρίσκεται στο στάτη ή στο δρομέα (συνήθως στο στάτη)
- ❑ Τοποθετείται σε αύλακες
- ❑ Αποτελείται από όμοια πηνία σε αντικριστούς αύλακες

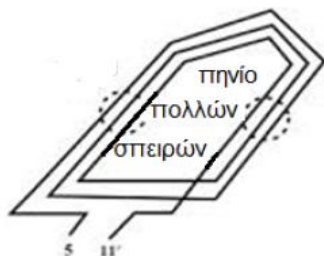


Τύλιγμα τυμπάνου (2)

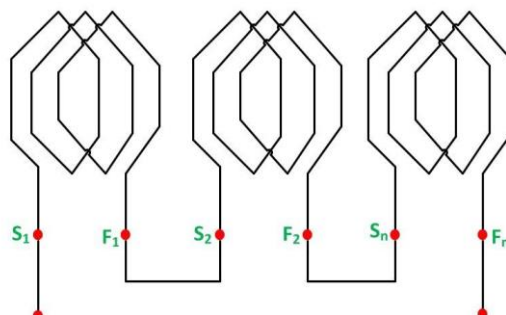
- ❑ Πηνία πολλαπλών σπειρών που συνδέονται σε ομάδες
 - Παράλληλα ή σε σειρά
- ❑ Κατ' αστέρα ή τρίγωνο σε τριφασικές μηχανές
- ❑ Διπλού στρώματος



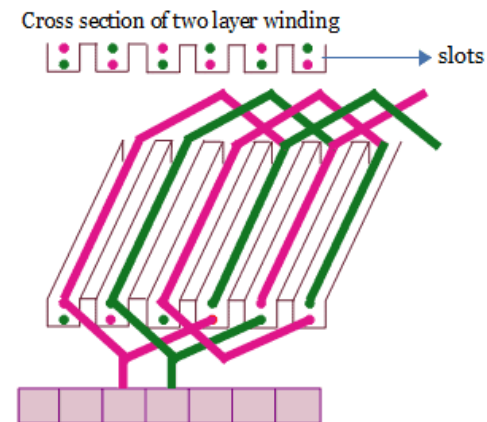
Σπείρα



Πηνίο

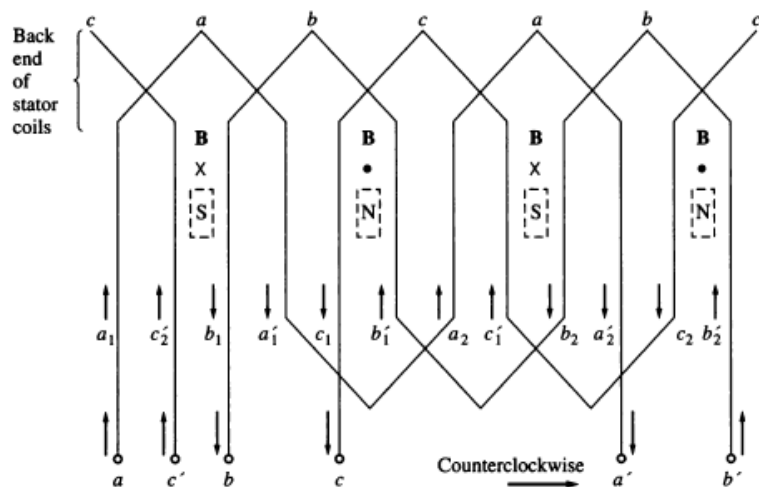
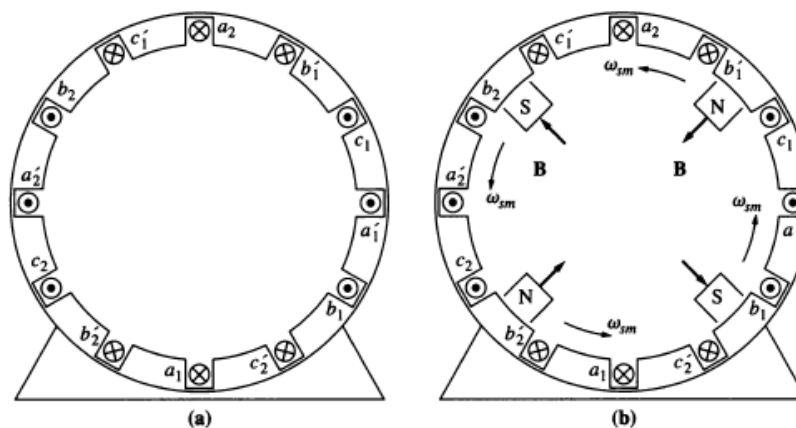


Τύλιγμα απλού στρώματος



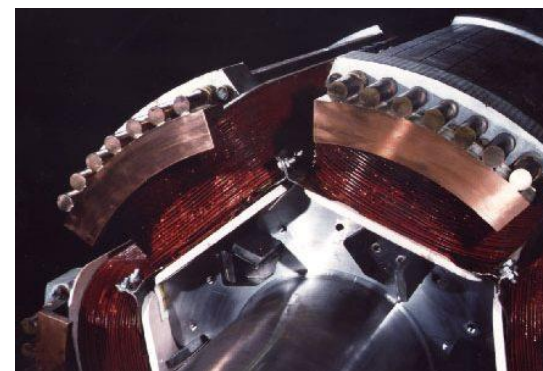
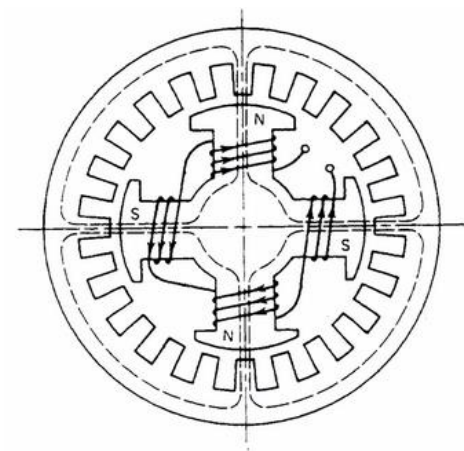
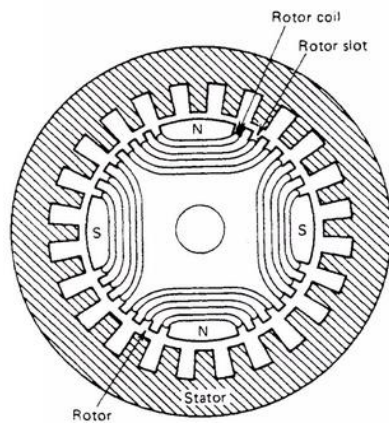
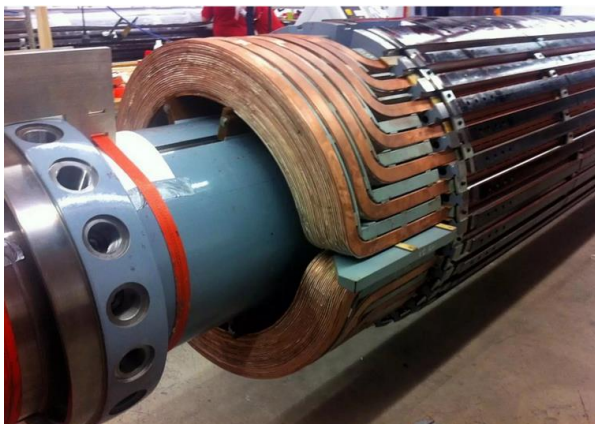
Τύλιγμα διπλού στρώματος

Τύλιγμα τυμπάνου (3)



Τύλιγμα πεδίου ή διέγερσης

- ❑ Σε δρομέα έκτυπων πόλων
 - Συγκεντρωμένα πηνία τυλιγμένα στους έκτυπους πόλους
- ❑ Σε κυλινδρικό δρομέα
 - Διανεμημένα πηνία



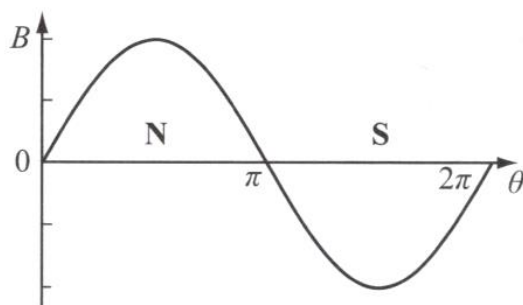


Μαγνητικοί πόλοι

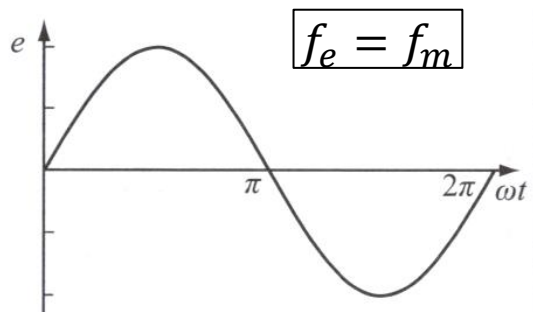
- ❑ Οι στρεφόμενες μηχανές μπορεί να έχουν οποιοδήποτε **άρτιο** αριθμό πόλων.
- ❑ Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα δίνουν σε διαδοχικούς πόλους εναλλακτικά βόρεια και νότια πολικότητα.

Στοιχειώδης μονοφασική διπολική σύγχρονη μηχανή

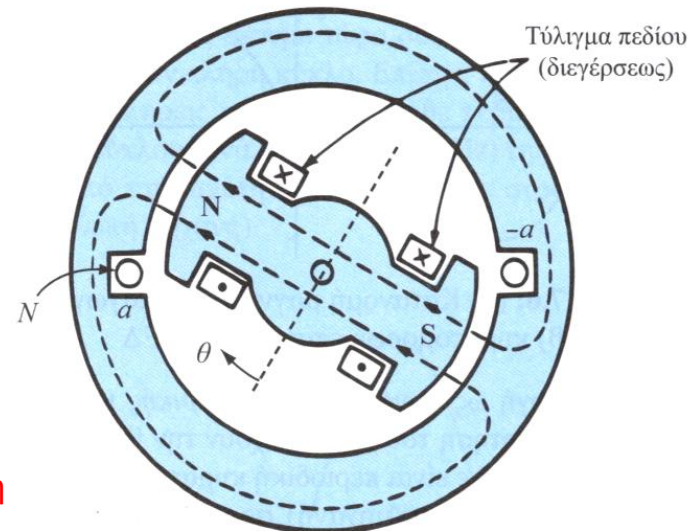
- ❑ Τύλιγμα τυμπάνου συγκεντρωμένο στα δυο σημεία α και $-\alpha$ με N ελίγματα
- ❑ Συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης (δρομέα)
- ❑ Ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω_m
- ❑ Βόρειος (N) και νότιος (S) μαγνητικός πόλος. Πολικό βήμα = $360/P = 180^\circ$ μηχ.
- ❑ Μαγνητική επαγωγή και επαγόμενη ΗΕΔ ($I_{\text{τυμπάνου}} = 0$):



Ημιτονοειδής χωρική κατανομή

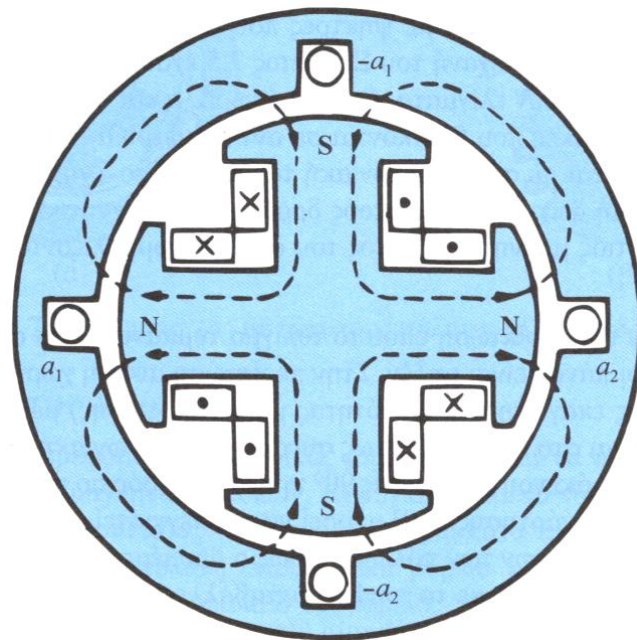
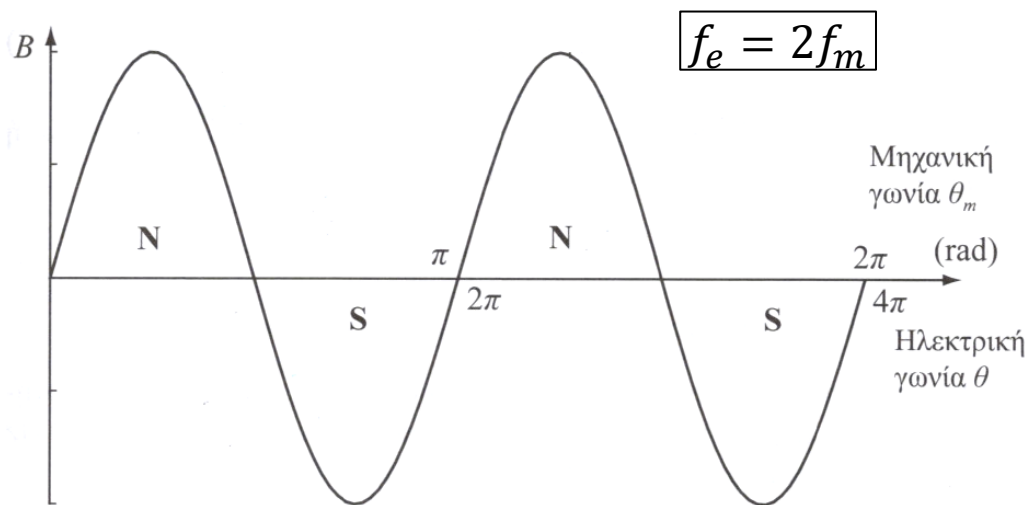


Ημιτονοειδής χρονική μεταβολή



Στοιχειώδης μονοφασική τετραπολική σύγχρονη μηχανή

- ❑ Δύο πηνία στο τύλιγμα τυμπάνου (στάτη)
 - $\alpha_1, -\alpha_1$ και $\alpha_2, -\alpha_2$
 - Συνδέονται σε σειρά
- ❑ Μαγνητικοί πόλοι. Πολικό βήμα = $360/P = 90^\circ$ μηχανικές





Σχέση μηχανικών – ηλεκτρικών μεγεθών σε μηχανή **P** πόλων

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m$$

- ❑ Ηλεκτρική γωνία (φάση) θ
- ❑ Μηχανική γωνία περιστροφής θ_m

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m$$

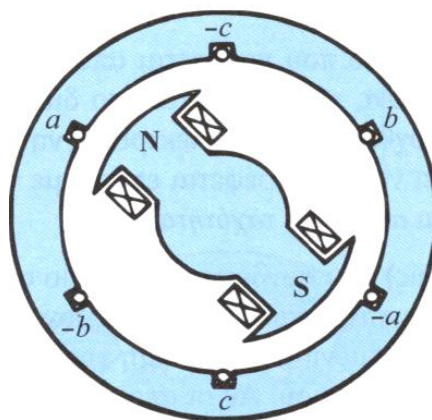
- ❑ Κυκλική συχνότητα ω (rad/s)
- ❑ Μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω_m (rad/s)

$$n = \frac{120f}{P}$$

- ❑ Μηχανική ταχύτητα περιστροφής n (ΣΑΛ)
- ❑ Ηλεκτρική συχνότητα f (Hz)

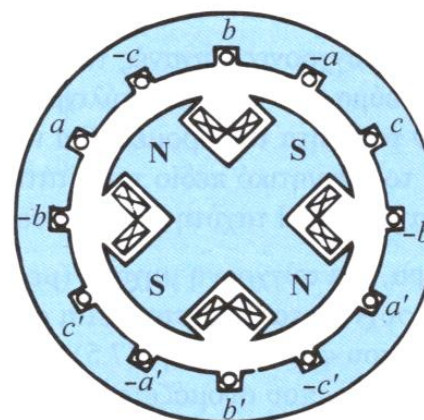
Στοιχειώδης τριφασική μηχανή

Διπολική

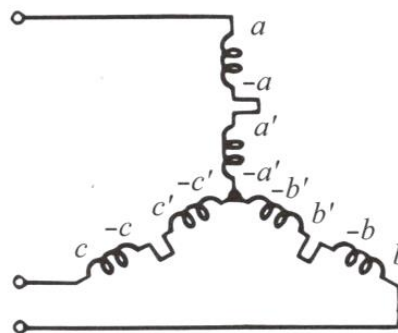


(α)

Τετραπολική



(β)



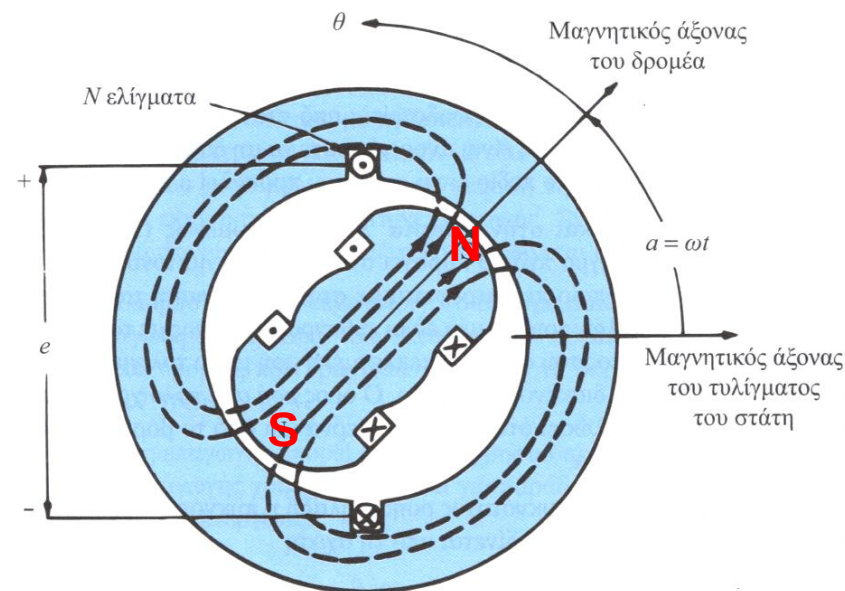
(γ)

Συνδεσμολογία Υ
τετραπολικής μηχανής

Ανάπτυξη τάσης σε ηλεκτρικές μηχανές με συγκεντρωμένα τυλίγματα

- ❑ Τύλιγμα τυμπάνου συγκεντρωμένο σε δυο σημεία με **N** ελίγματα
- ❑ Συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης (δρομέας έκτυπων πόλων)
- ❑ Διπολική μηχανή
- ❑ Τύλιγμα στάτη ανοικτό $I_{\text{τυμπάνου}} = 0$
- ❑ Μαγνητική επαγωγή:

$$B(\theta) = B_m \cos \theta$$
- ❑ Μαγνητική ροή ανά πόλο (πολυπολική μηχανή):



$$\Phi = \int_S B dS = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (B_m \cos \theta) l r d\theta_m = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (B_m \cos \theta) l r \frac{2d\theta}{p} = \frac{4}{p} B_m l r$$



Ανάπτυξη τάσης σε ηλεκτρικές μηχανές με συγκεντρωμένα τυλίγματα

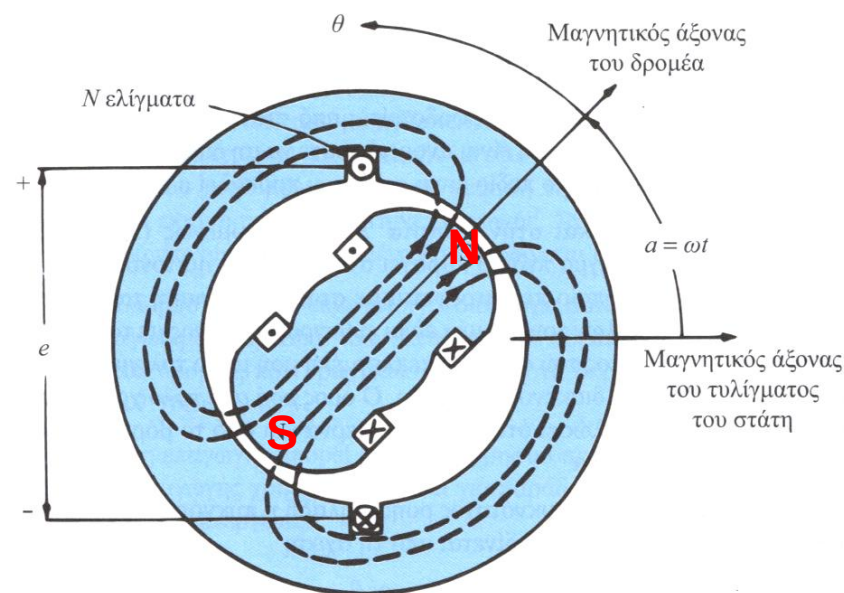
- Πεπλεγμένη ροή με το τύλιγμα στάτη:

$$\lambda = N\Phi \cos \omega t$$

- ΗΕΔ επαγόμενη στο στάτη :

$$e = -\omega N\Phi \sin \omega t = \omega N\Phi \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$E = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\Phi = 4,44 f N\Phi \quad (\text{rms})$$





Ανάπτυξη τάσης σε ηλεκτρικές μηχανές με διανεμημένα τυλίγματα

- ❑ Πεπλεγμένη ροή με το τύλιγμα στάτη:

$$\lambda = k_w N \Phi \cos \omega t$$

- ❑ ΗΕΔ επαγόμενη στο στάτη:

$$e = -k_w \omega N \Phi \sin \omega t = k_w \omega N \Phi \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$E = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} k_w N \Phi = 4,44 k_w f N \Phi \quad (\text{rms})$$

όπου $k_w < 1$ (0,80÷0,95) είναι ο συντελεστής τυλίγματος.

Μαγνητεγερτική δύναμη συγκεντρωμένου τυλίγματος (1)

- ❑ Τύλιγμα στάτη συγκεντρωμένο σε δυο σημεία με **N** ελίσματα
- ❑ Πολικό βήμα = $360/P = 180^\circ$
- ❑ Νόμος διαρρεύματος:

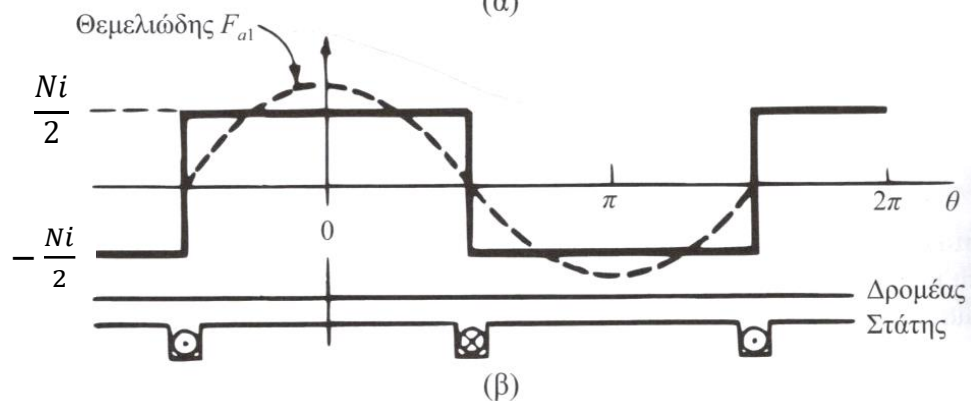
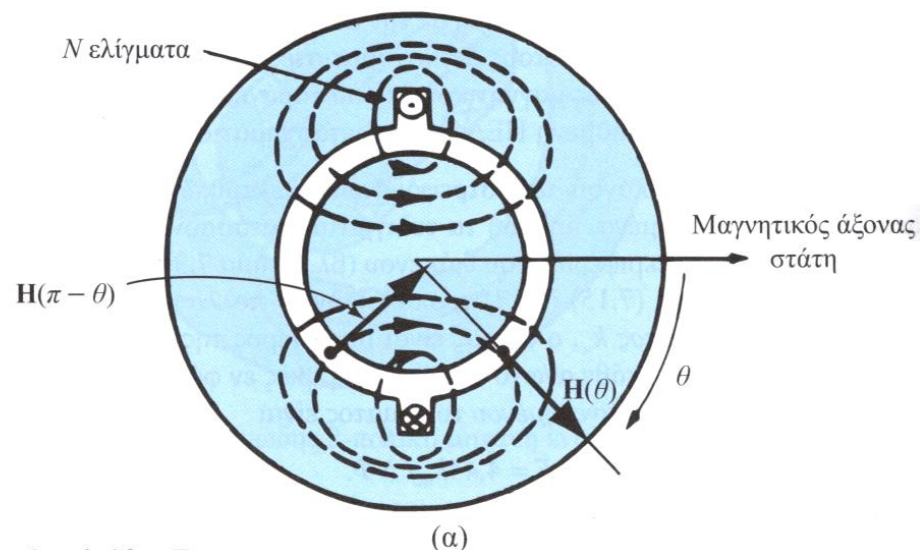
$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad \longrightarrow$$

$$2gH(\theta) = Ni \quad \longrightarrow$$

$$H(\theta) = \frac{Ni}{2g} \quad \frac{\pi}{2} < \theta < -\frac{\pi}{2}$$

$$\mathcal{F}(\theta) = \frac{Ni}{2} \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$\mathcal{F}(\theta) = -\frac{Ni}{2} \quad \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}$$





Μαγνητεγερτική δύναμη συγκεντρωμένου τυλίγματος (2)

- Ένταση μαγνητικού πεδίου στη θέση θ

$$H(\theta) = \frac{\mathcal{F}(\theta)}{g}$$

- Ανάλυση τετραγωνικής $\mathcal{F}(\theta)$:

$$\mathcal{F}(\theta) = F_{a1}\cos\theta + F_{a3}\cos3\theta + F_{a5}\cos5\theta + \dots$$

- Μέγιστη τιμή θεμελιώδους αρμονικής:

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2}$$

Μαγνητεγερτική δύναμη διανεμημένου τυλίγματος

- Τύλιγμα διπλού στρώματος διανεμημένο σε 4 αύλακες ανά πόλο.

- Μέγιστη τιμή θεμελιώδους αρμονικής:

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N i_a}{P}$$

- Για ημιτονοειδές ρεύμα: $i_a(t) = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t)$

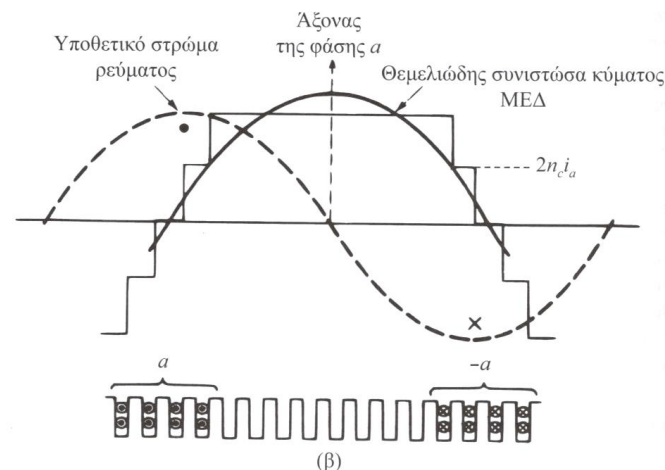
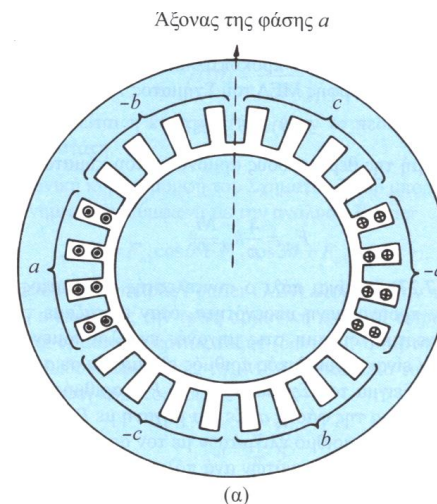
$$\mathcal{F}(\theta, t) = F_m \cos \omega t \cos \theta$$

- Στάσιμο κύμα:

- Κόμβοι για $\cos \theta = 0$, δηλ. για $\theta = \pi/2$ και $3\pi/2$
- Κοιλίες για $\theta = 0$ και π

- Μέγιστη τιμή θεμελιώδους αρμονικής:

$$F_m = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N}{P} \sqrt{2} I_a$$



ΜΕΔ τριφασικού τυλίγματος

- Ημιτονοειδές ρεύμα σε κάθε φάση (σε συμμετρικές συνθήκες):

$$i_a(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t)$$

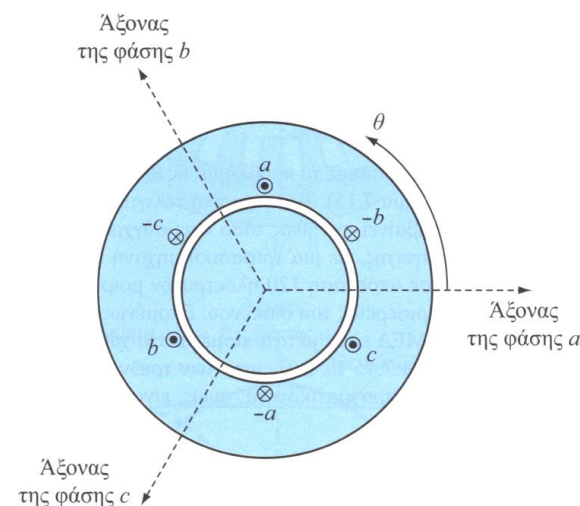
$$i_b(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

- Συνολική ΜΕΔ:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) = & F_m \cos \omega t \cos \theta \\ & + F_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \cos(\theta - 2\pi/3) \\ & + F_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \cos(\theta + 2\pi/3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) = & \frac{1}{2} F_m \{ \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) \\ & + \cos(\omega t + \theta + 2\pi/3) + \cos(\omega t - \theta) \\ & + \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3) + \cos(\omega t - \theta) \} \end{aligned}$$

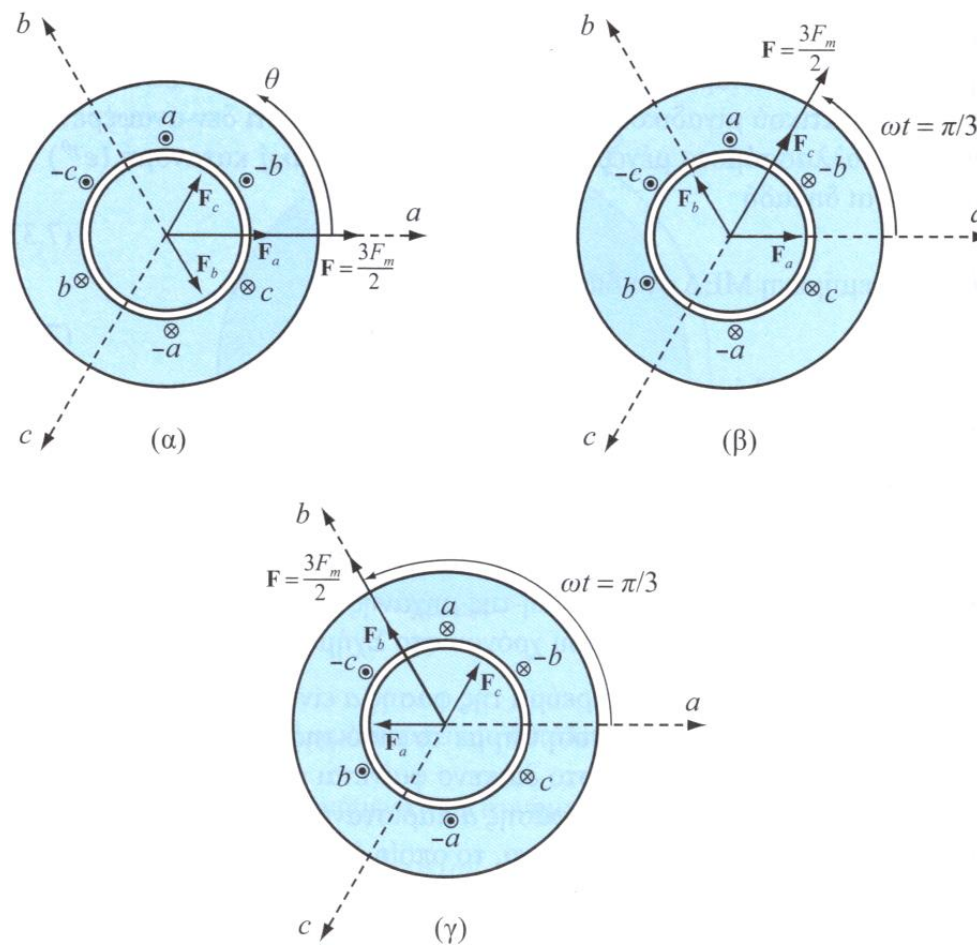
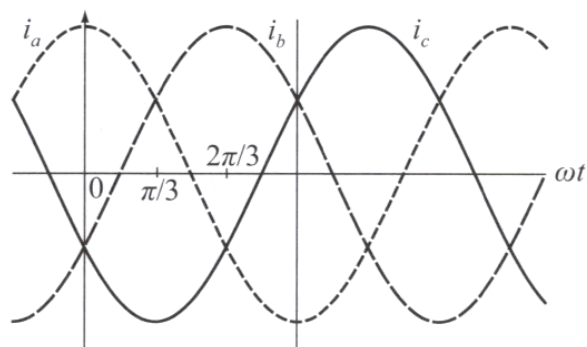


Οδεύον κύμα

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta)$$



Παραστατικά διανύσματα χώρου



Ανάπτυξη ροπής

- ❑ F_s : Διάνυσμα χώρου ΜΕΔ στάτη
- ❑ F_r : Διάνυσμα χώρου ΜΕΔ δρομέα
- ❑ $F_{sr} = F_s + F_r$: Συνιστάμενο διάνυσμα ΜΕΔ
 - Όταν το F_s προηγείται του $F_r \rightarrow \delta_{sr} < 0 \rightarrow$ Λειτουργία κινητήρα $\rightarrow T_\pi > 0$ (επιταχύνουσα)
 - Όταν το F_r προηγείται του $F_s \rightarrow \delta_{sr} > 0 \rightarrow$ Λειτουργία γεννήτριας $\rightarrow T_\pi < 0$ (επιβραδύνουσα)
- ❑ Ροπή:

$$T_\pi = -\frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi r l}{g} F_s F_r \sin \delta_{sr}$$

$$T_\pi = -\frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi r l}{g} F_{sr} F_r \sin \delta_r$$

$$T_\pi = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin \delta_r$$

