



# Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 7. Εισαγωγή στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

**Βασίλης Νικολαΐδης**  
Επίκουρος Καθηγητής

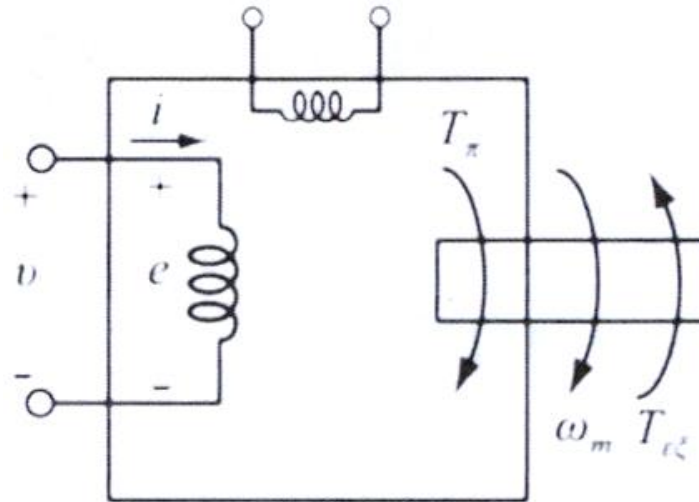
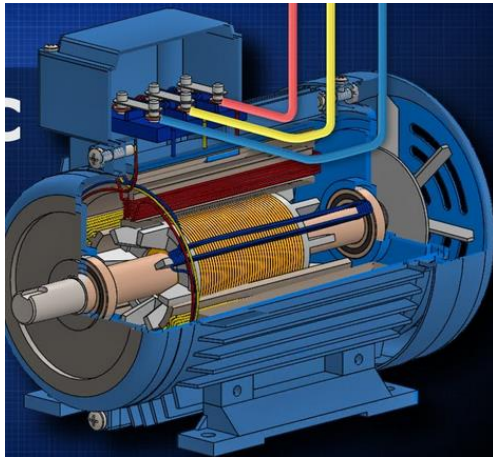


# Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

- ❑ 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

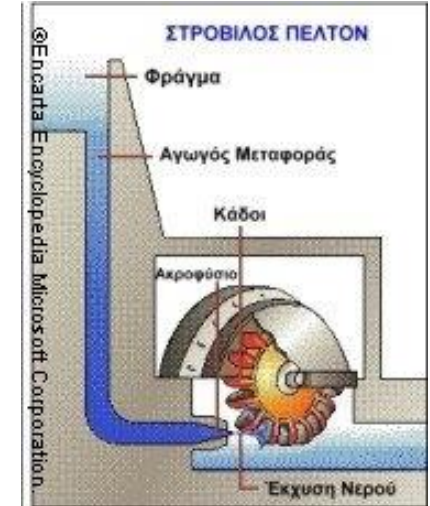
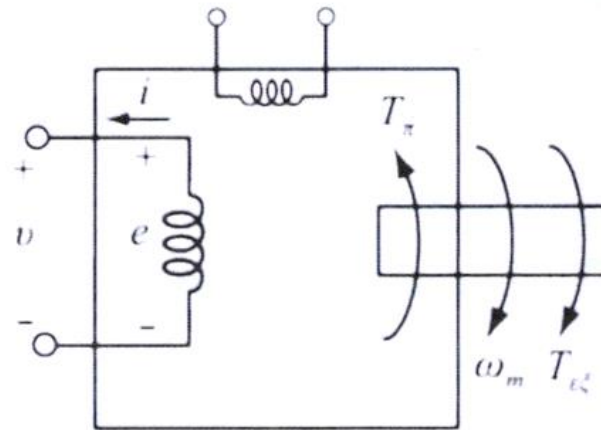
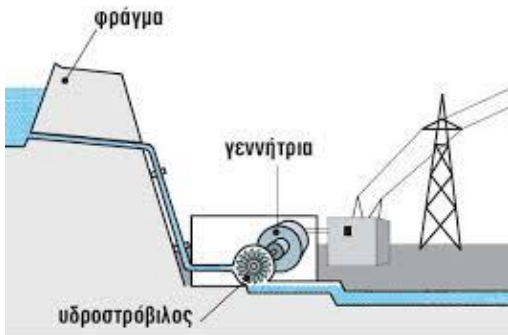


Ηλεκτρική  
ενέργεια  
στο τύλιγμα  
τυμπάνου

Ροή ενέργειας

Μηχανική  
ενέργεια στο  
στρεφόμενο  
δρομέα

# Λειτουργία γεννήτριας



Ηλεκτρική  
 ενέργεια  
 στο τύλιγμα  
 τυμπάνου

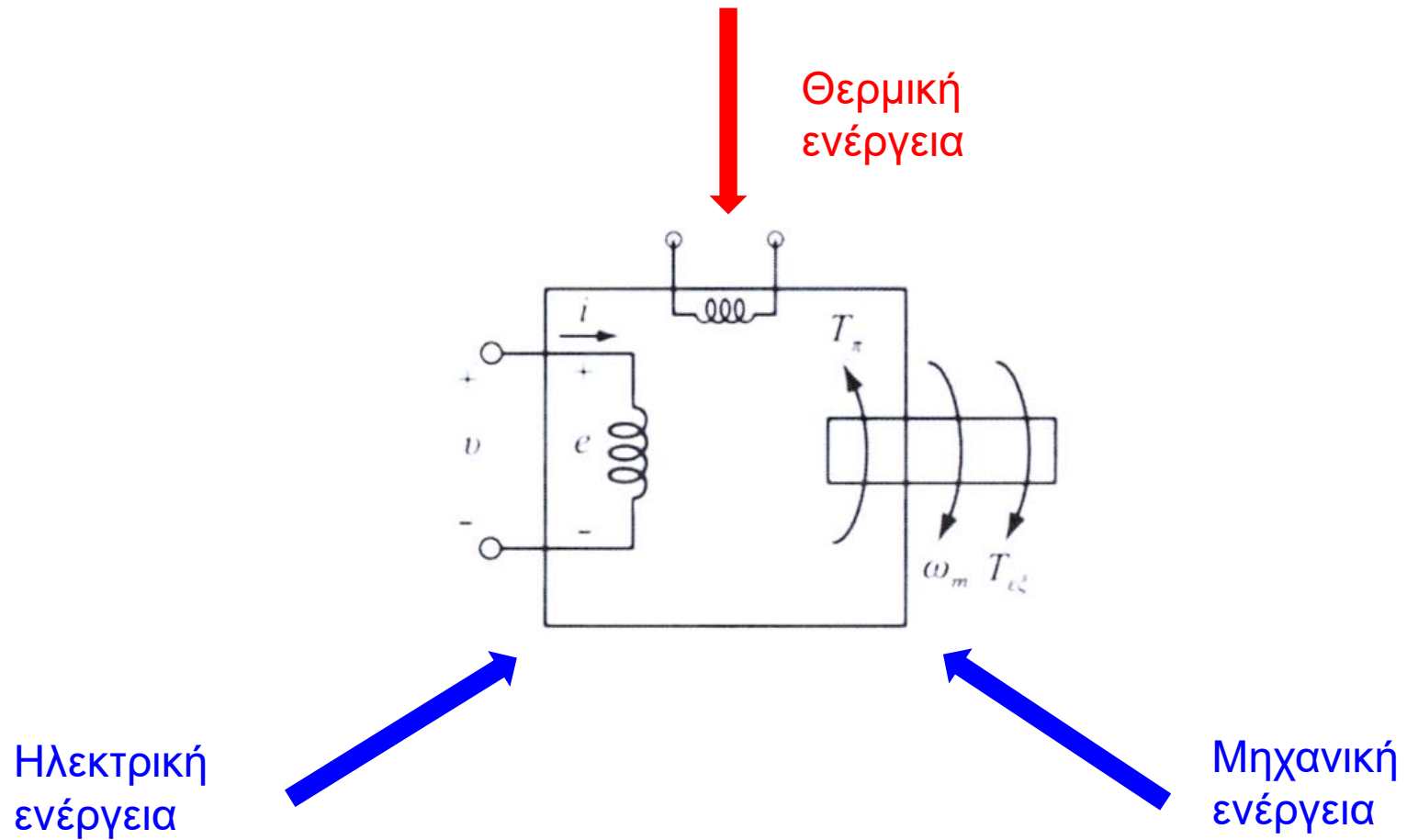


Ροή ενέργειας

Μηχανική  
 ενέργεια στο  
 στρεφόμενο  
 δρομέα

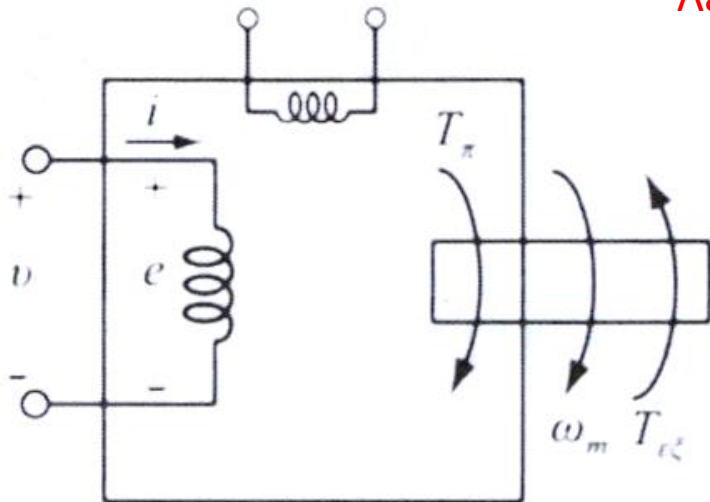


## Λειτουργία πέδης



# Χαρακτηριστικά λειτουργικά μεγέθη

## Λειτουργία κινητήρα



$$v = ir + e \quad (\text{Εφαρμοζόμενη τάση})$$

$$p_e = ei \quad (\text{Απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς})$$

$$P_{εσ} = T_{\pi} \omega_m \quad (\text{Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς})$$

$$P_{εξ} = T_{εξ} \omega_m \quad (\text{Εξωτερικά αποδιδόμενη μηχανική ισχύς})$$



## Εξίσωση επιτάχυνσης

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

(λειτουργία κινητήρα)

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

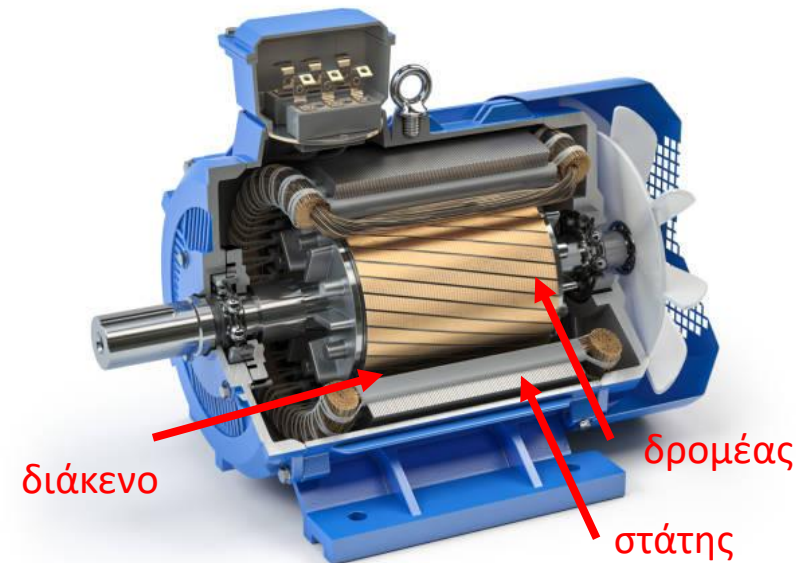
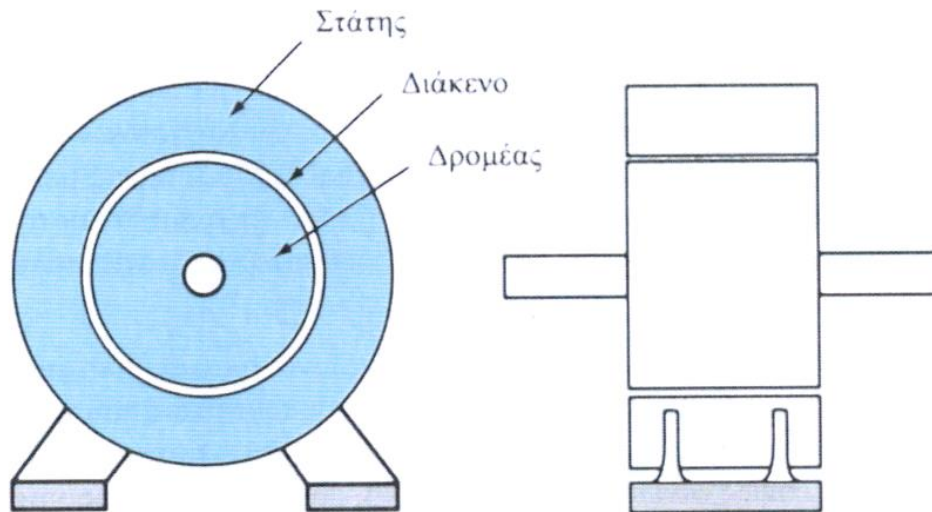
(λειτουργία γεννήτριας)

όπου  $J = J_{\delta\rho\rho\mu\epsilon\alpha} + J_{\phi\omicron\rho\rho\rho\iota\upsilon}$  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



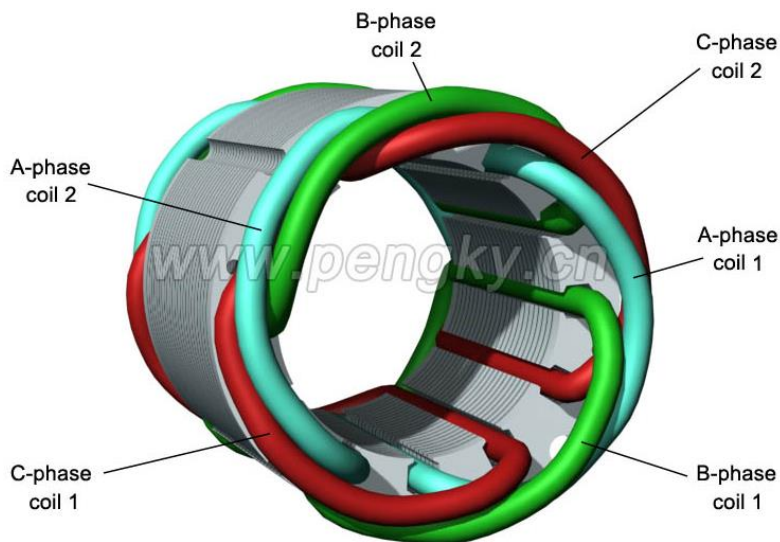
- ❑ **Στάτης:** κοίλος κύλινδρος, ακίνητος, από σιδηρομαγνητικό υλικό
- ❑ **Δρομέας:** συμπαγές σώμα από σιδηρομαγνητικό υλικό, στρεφόμενο εντός του στάτη
  - Κυλινδρικού σχήματος ή Έκτυπων πόλων
- ❑ **Διάκενο αέρα:** κενό λίγων mm μεταξύ στάτη και δρομέα





# Στάτης

## Οριζόντιου προσανατολισμού



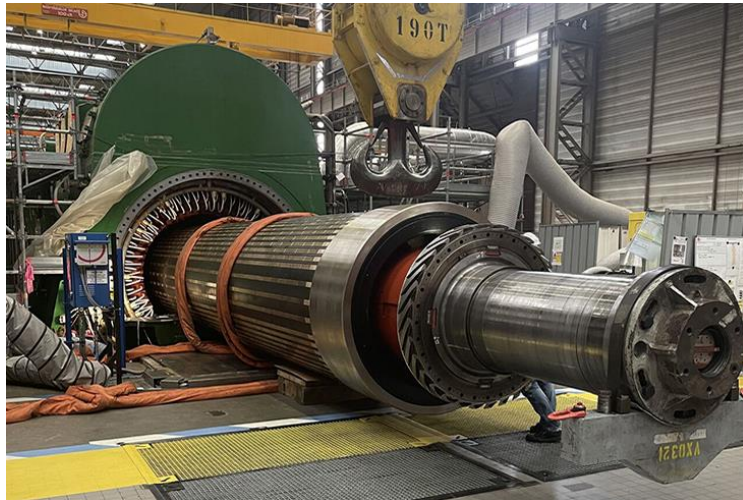
## Κατακόρυφου προσανατολισμού





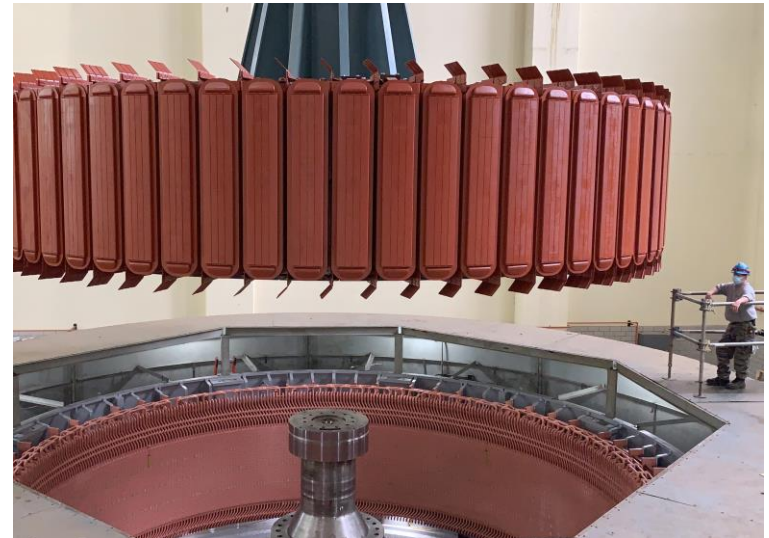
# Δρομέας

## Κυλινδρικός



Υψηλές ΣΑΛ (ΘΗΣ)

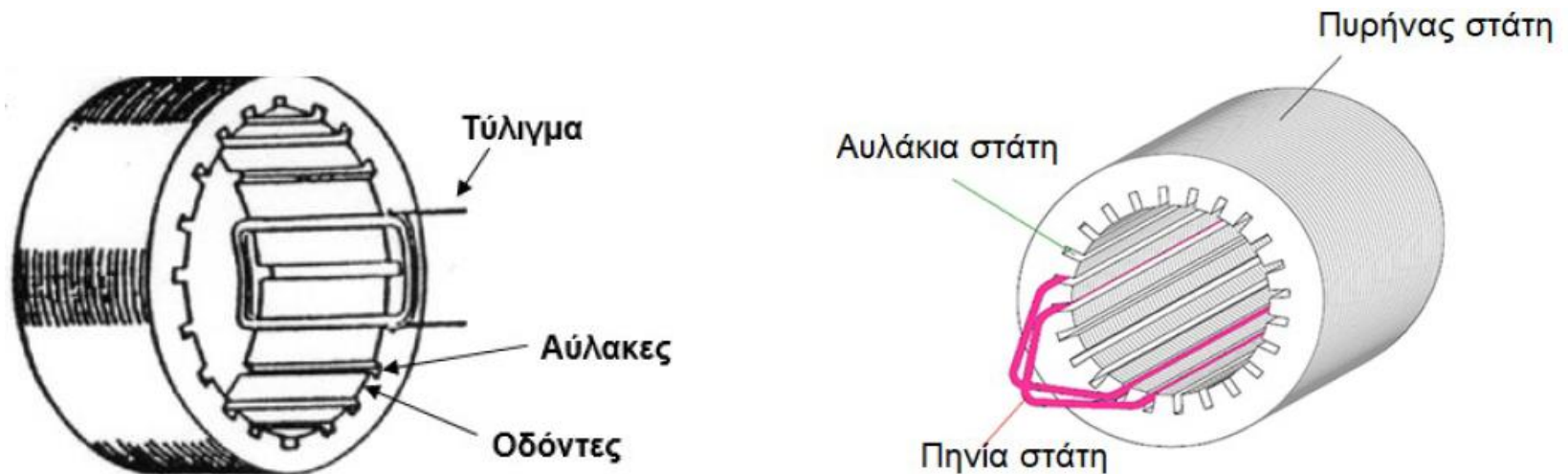
## Έκτυπων πόλων



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

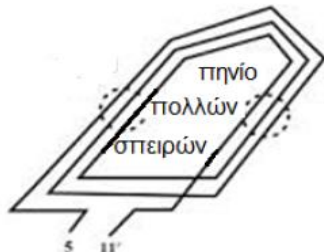


## Τύλιγμα τυμπάνου (2)

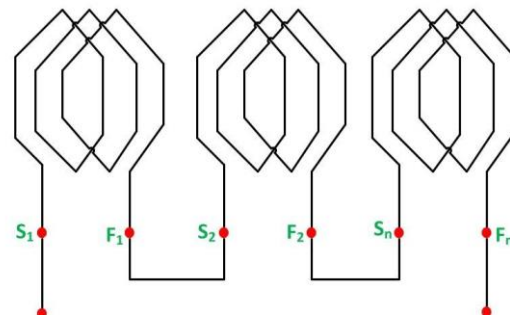
- ❑ Πηνία πολλαπλών σπειρών που συνδέονται σε ομάδες
  - Παράλληλα ή σε σειρά
- ❑ Κατ' αστέρα ή τρίγωνο σε τριφασικές μηχανές
- ❑ Διπλού στρώματος



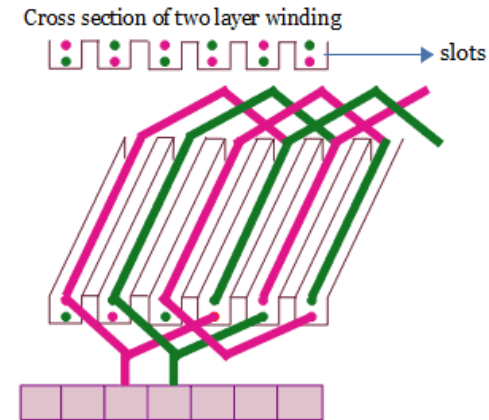
Σπείρα



Πηνίο

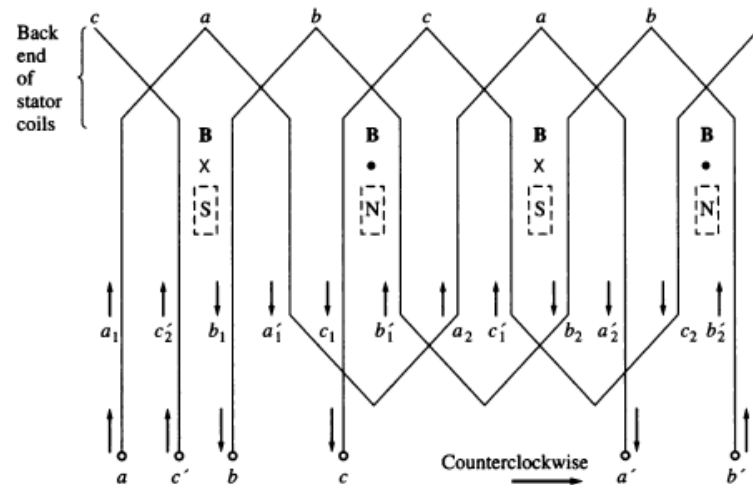
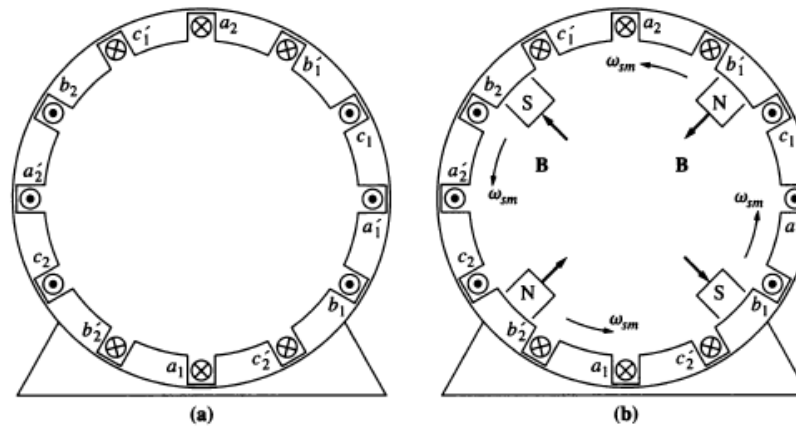


Τύλιγμα απλού στρώματος



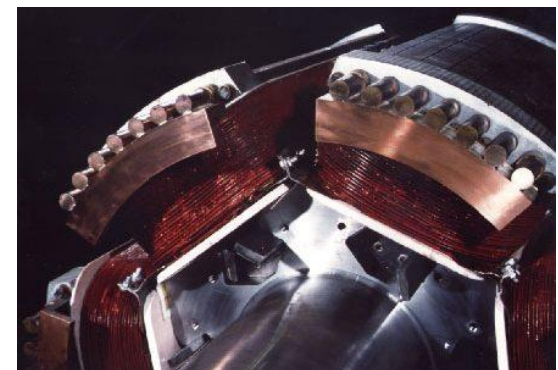
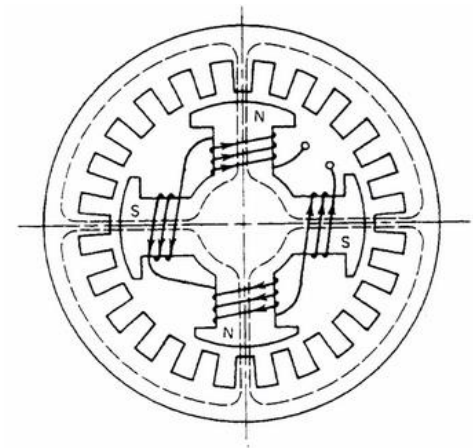
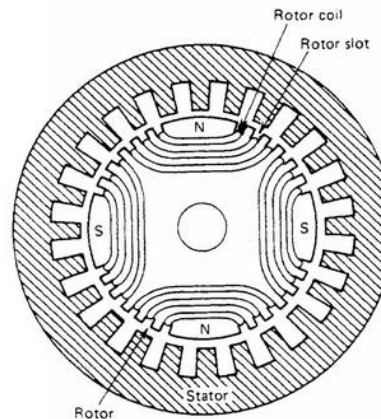
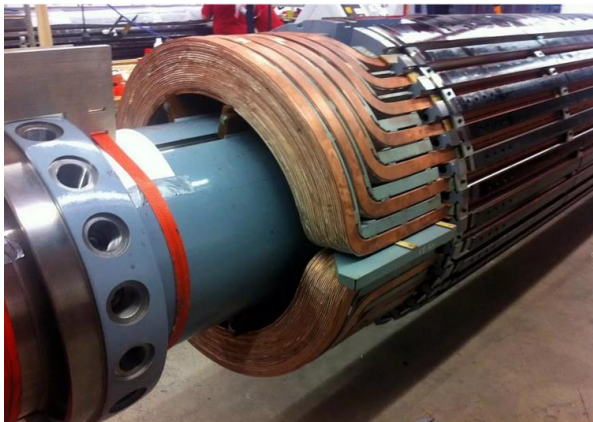
Τύλιγμα διπλού στρώματος

## Τύλιγμα τυμπάνου (3)



# Τύλιγμα πεδίου ή διέγερσης

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



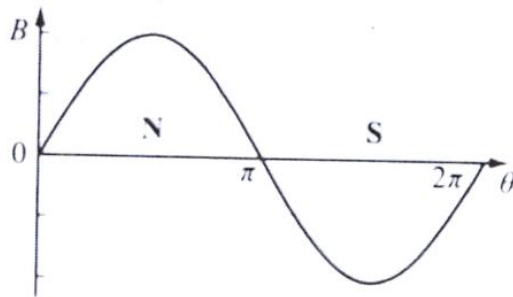


# Μαγνητικοί πόλοι

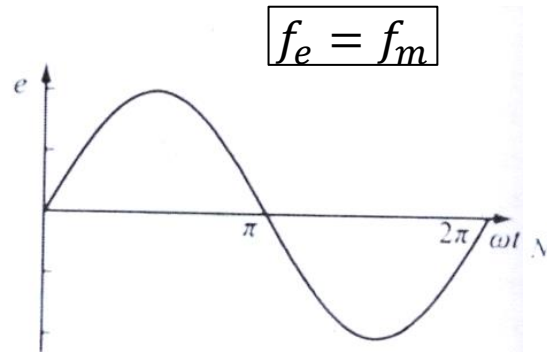
- ❑ Οι στρεφόμενες μηχανές μπορεί να έχουν οποιοδήποτε **άρτιο** αριθμό πόλων.
- ❑ Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα δίνουν σε διαδοχικούς πόλους εναλλακτικά βόρεια και νότια πολικότητα.

# Στοιχειώδης μονοφασική διπολική σύγχρονη μηχανή

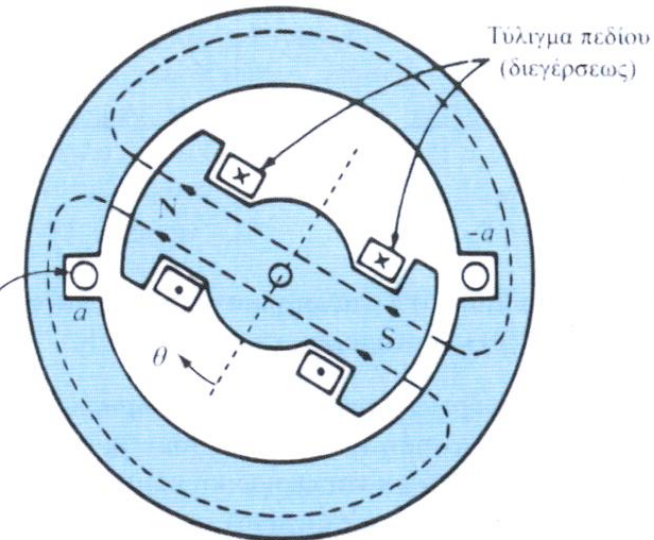
- ❑ Τύλιγμα τυμπάνου συγκεντρωμένο στα δυο σημεία  $\alpha$  και  $-\alpha$  με  $N$  ελίγματα
- ❑ Συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης (δρομέα)
- ❑ Ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega_m$
- ❑ Βόρειος (N) και νότιος (S) μαγνητικός πόλος. Πολικό βήμα =  $360/P = 180^\circ$  μηχ.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



Ημιτονοειδής χωρική κατανομή



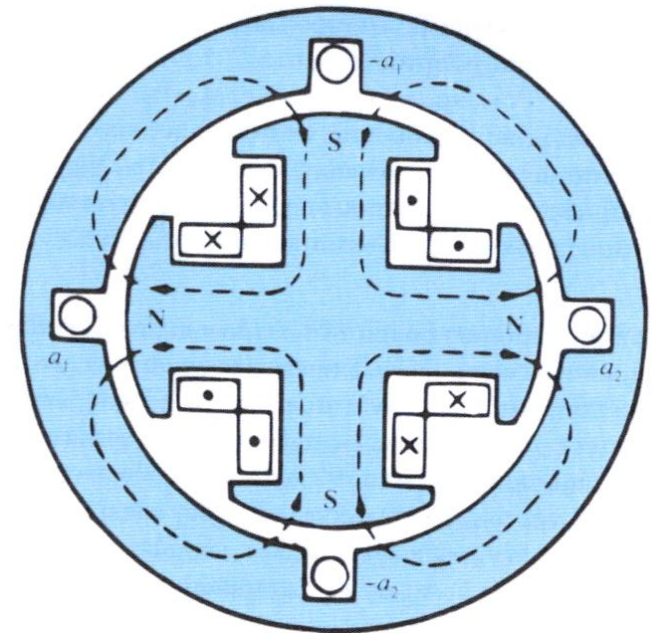
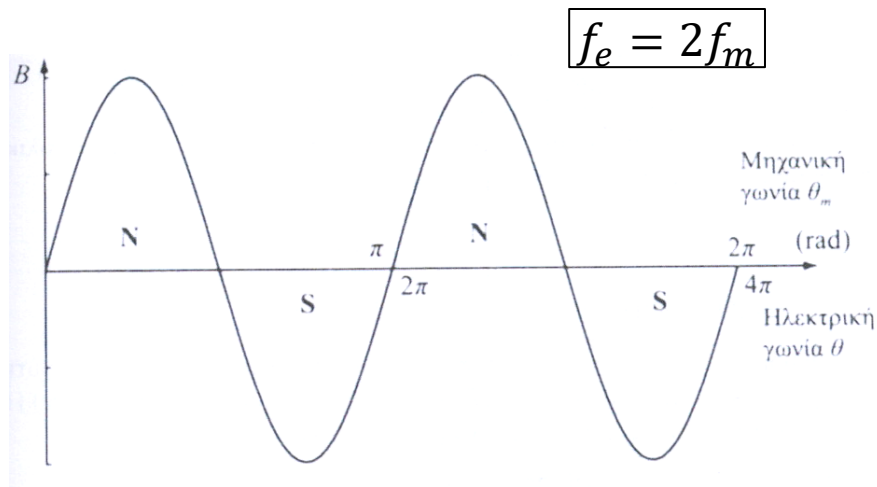
Ημιτονοειδής χρονική μεταβολή





# 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)  $\theta$
- ❑ Μηχανική γωνία περιστροφής  $\theta_m$

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

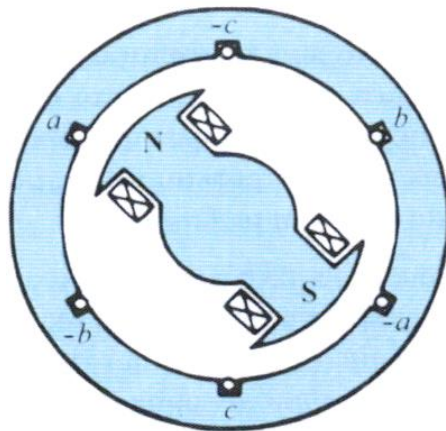
- ❑ Κυκλική συχνότητα  $\omega$  (rad/s)
- ❑ Μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $\omega_m$  (rad/s)

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

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

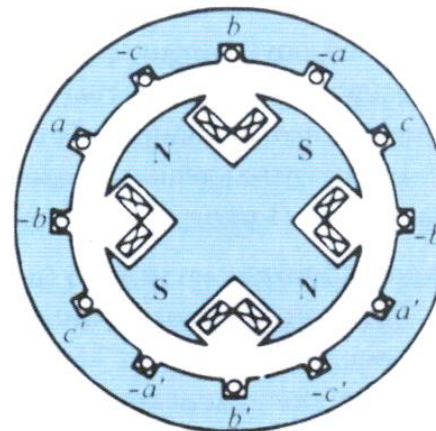
# Στοιχειώδης τριφασική μηχανή

Διπολική

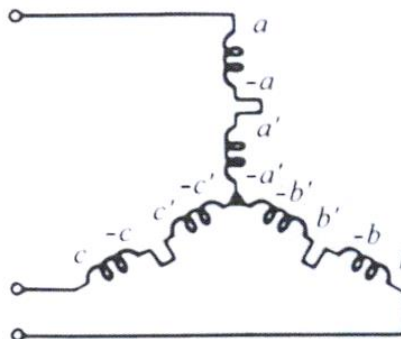


(α)

Τετραπολική



(β)

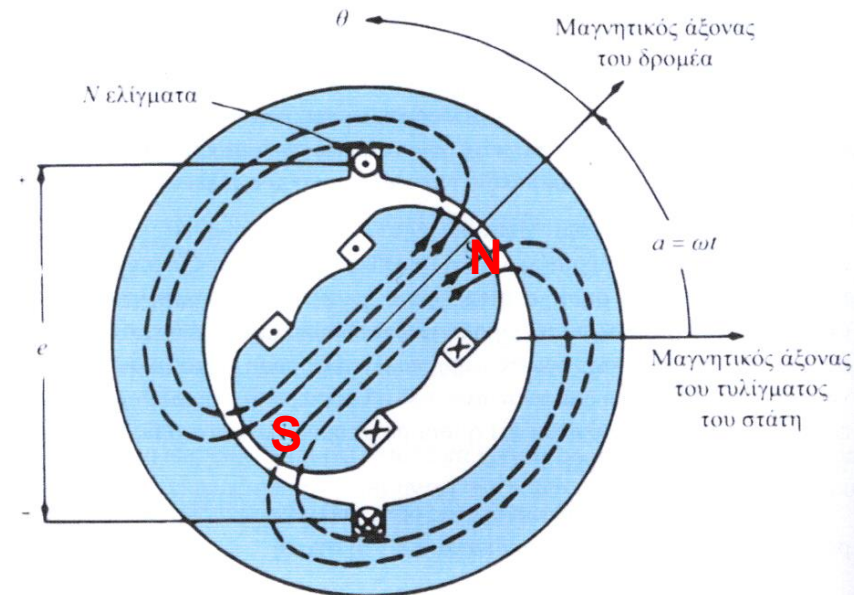


(γ)

Συνδεσμολογία  $\Upsilon$   
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

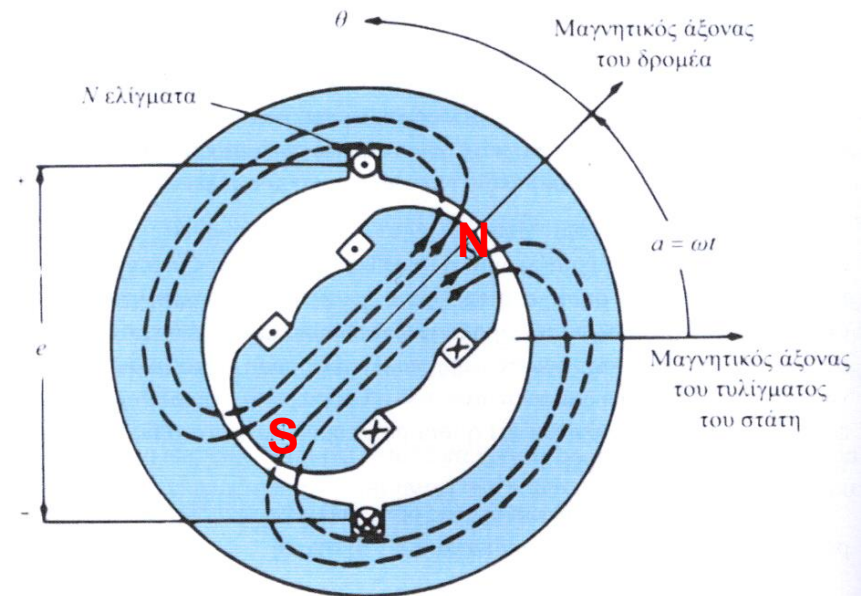
- Πεπλεγμένη ροή με το τύλιγμα στάτη:

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

- ΗΕΔ επαγόμενη στο στάτη :

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

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





## 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:

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

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

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** ελίγματα
- ❑ Πολικό βήμα =  $360/P = 180^\circ$
- ❑ Νόμος διαρρεύματος:

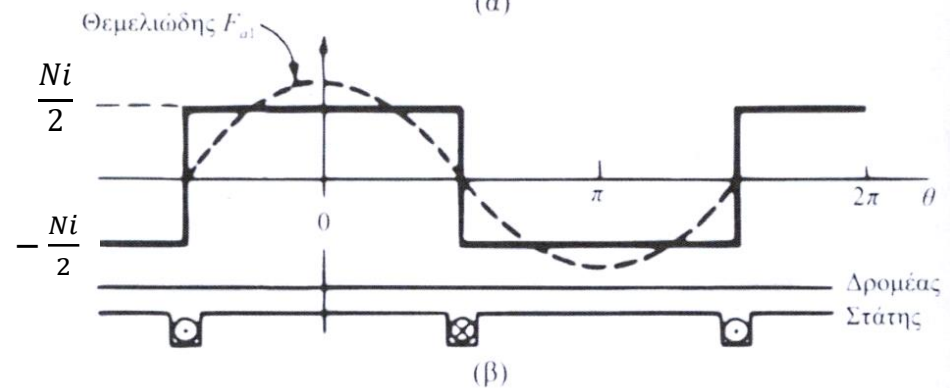
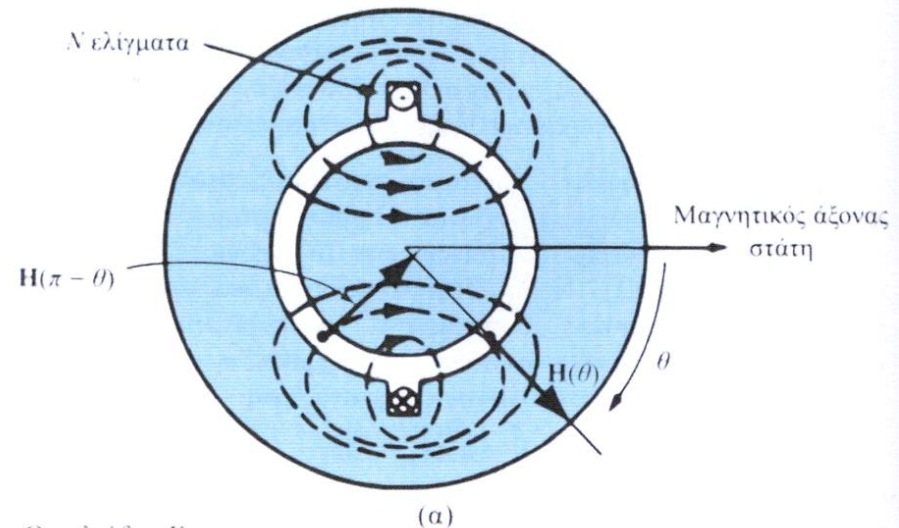
$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad \longrightarrow$$

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

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

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

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





## Μαγνητεγερτική δύναμη συγκεντρωμένου τυλίγματος (2)

- Ένταση μαγνητικού πεδίου στη θέση  $\theta$

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

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

$$\mathcal{F}(\theta) = F_{a1} \cos\theta + F_{a3} \cos 3\theta + F_{a5} \cos 5\theta + \dots$$

- 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:

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

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

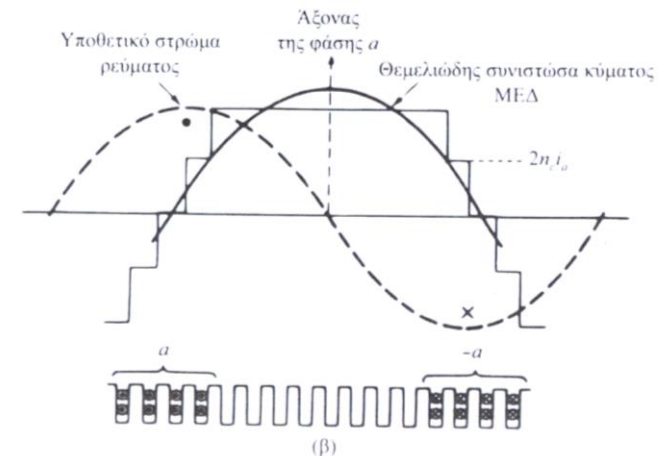
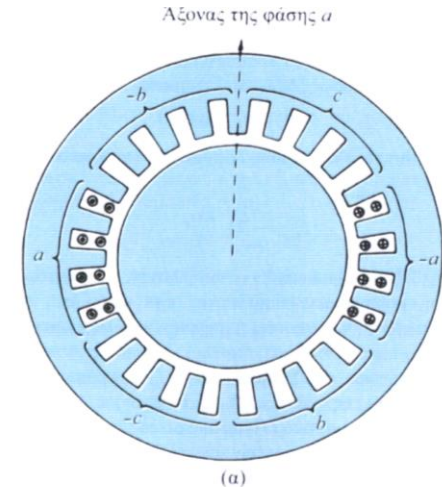
$$\mathcal{F}(\theta, t) = F_m \cos\omega t \cos\theta$$

- Στάσιμο κύμα:

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

- ❑ 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):

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

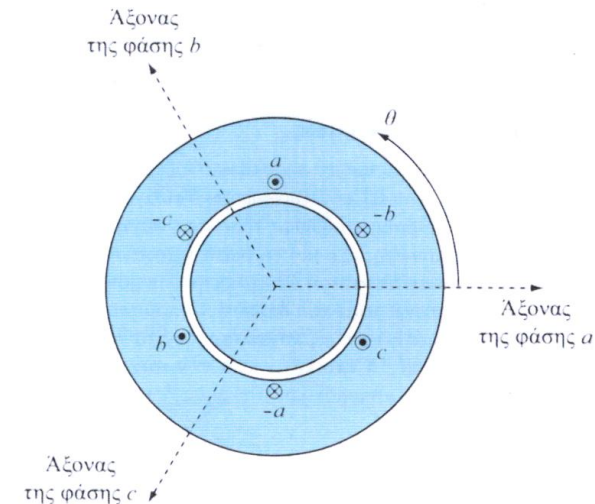
$$i_b(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

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

- Συνολική ΜΕΔ:

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

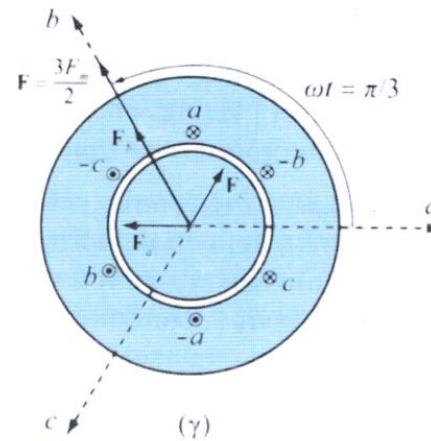
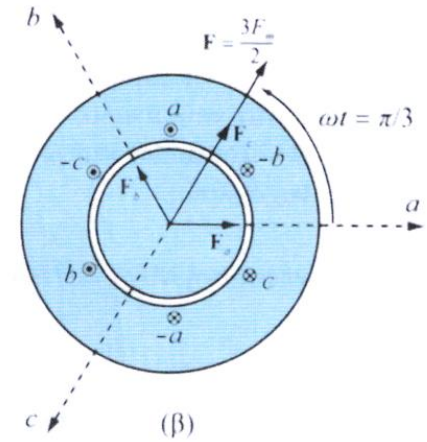
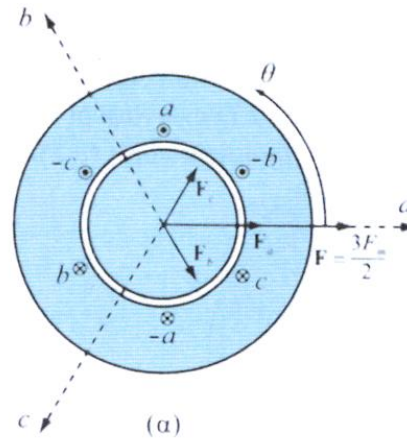
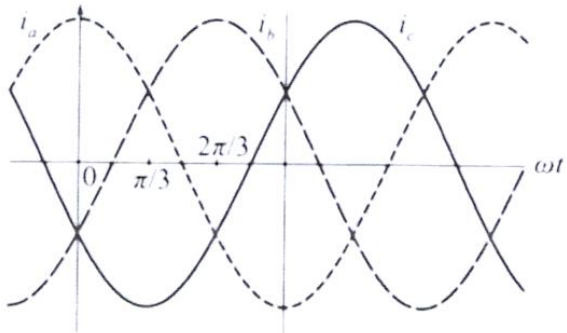
$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) = & \frac{1}{2} F_m \{ \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) \\ & + \cos(\omega t + \theta + 2\pi/3) + \cos(\omega t - \theta) \\ & + \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3) + \cos(\omega t - \theta) \} \end{aligned}$$



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:

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

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

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

