



ΕΜΠ

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Μηχανές Εναλλασσομένου Ρεύματος

Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Καθ. ΕΜΠ



Βασική Δομή

- **Στάτης:**
 - Ακίνητος
 - Σχήμα «κούφιου» κυλίνδρου από σιδηρομαγνητικό υλικό
 - Συνήθως περιλαμβάνει το **τύλιγμα τυμπάνου**: Κύριο τύλιγμα μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ανταλλαγή ενέργειας
- **Δρομέας:**
 - Κινητό μέρος (άξονας προσαρτημένος σε αυτόν)
 - Συχνά κυλινδρικός (αλλά και έκτυπων πόλων)
 - Διαθέτει τύλιγμα όπου επιβάλλεται εξωτερική διέγερση (**τύλιγμα διέγερσης**) ή βραχυκυκλώνεται



Βασική Δομή

- **Διάκενο:**
 - Αέρας
 - Μικρού μήκους - απόσταση στάτη-δρομέα λίγων mm
 - Εκεί λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση μαγνητικών πεδίων στάτη-δρομέα για παραγωγή ροπής. Στον πυρήνα πεδίο αμελητέο.
- **Τύλιγμα τυμπάνου:**
 - Αρχή: πηνίο σε «απέναντι» αύλακες → ροή ακτινική
 - Τύλιγμα διανέμεται σε περισσότερες αύλακες
 - Σχηματίζονται ομάδες πηνίων/φάση: σύνδεση σε σειρά ή/και παράλληλα
 - 1Φ ή 3Φ τύλιγμα (Δ ή Υ)
 - Τύλιγμα διπλού στρώματος



Τύλιγμα τυμπάνου

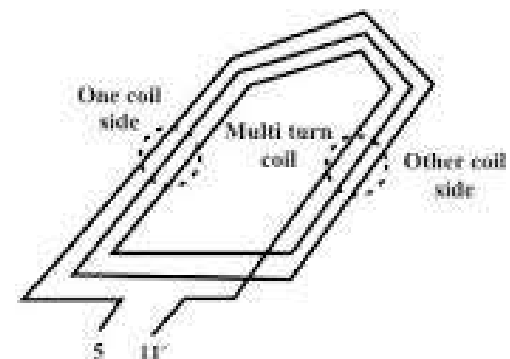
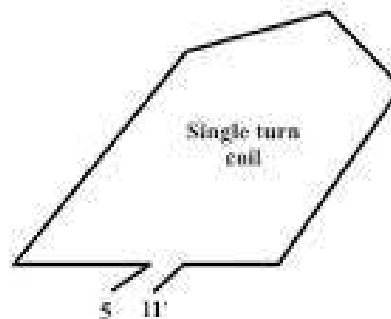
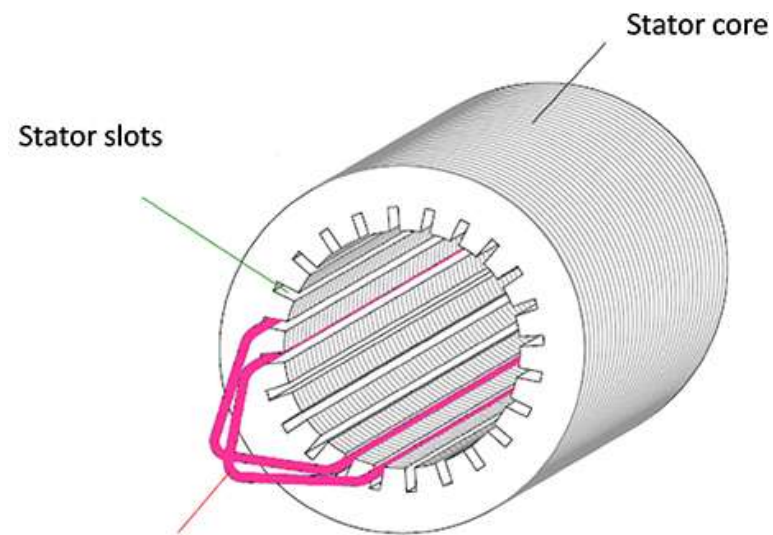
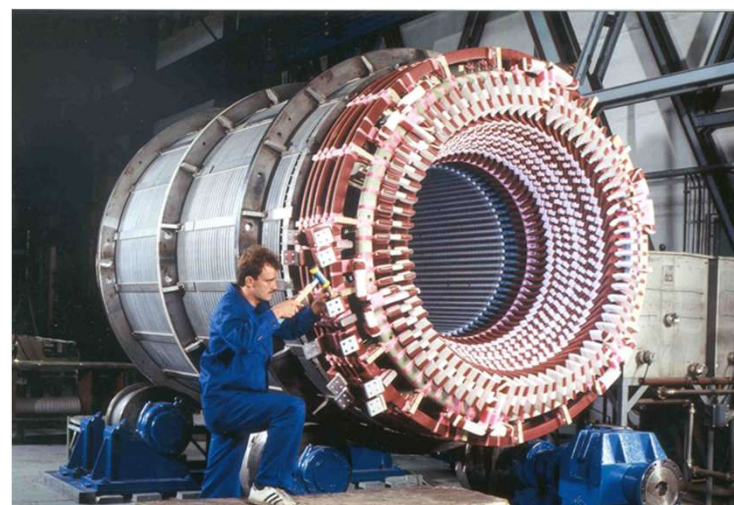
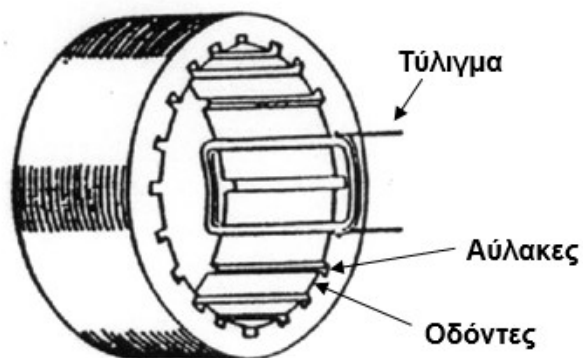


Figure 35.8: Single turn & Multi turn coil

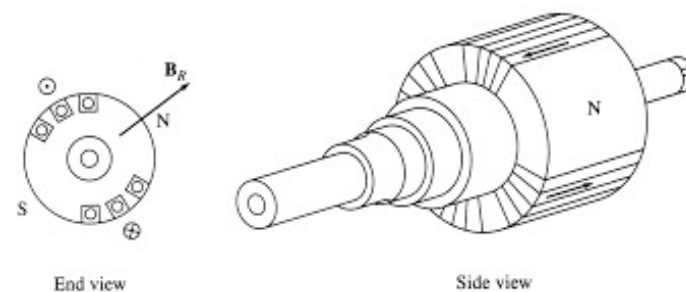
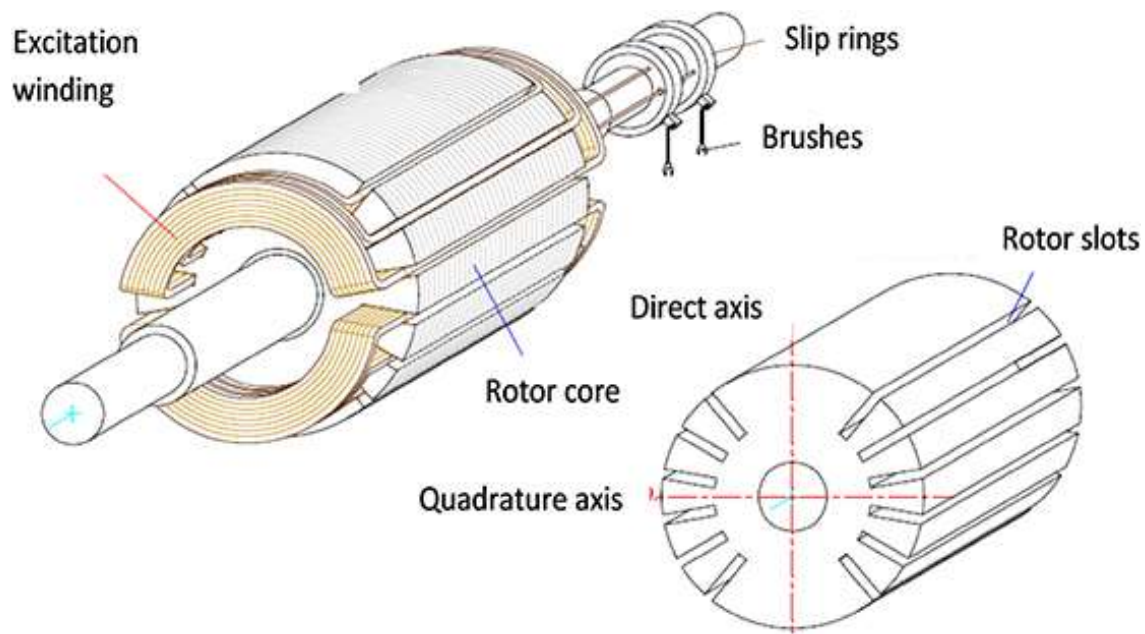
Stator coils





Είδη δρομέων

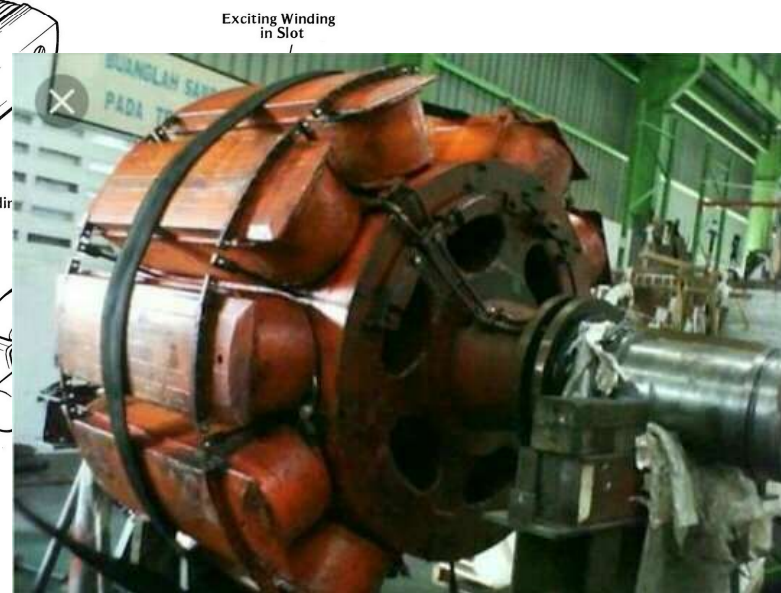
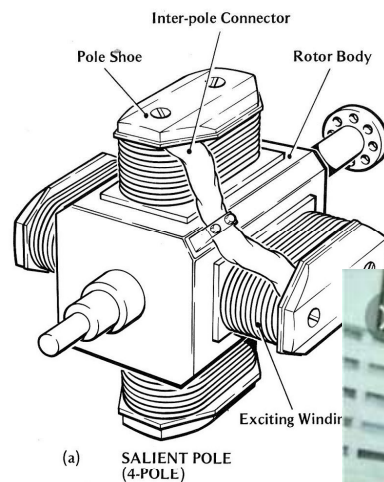
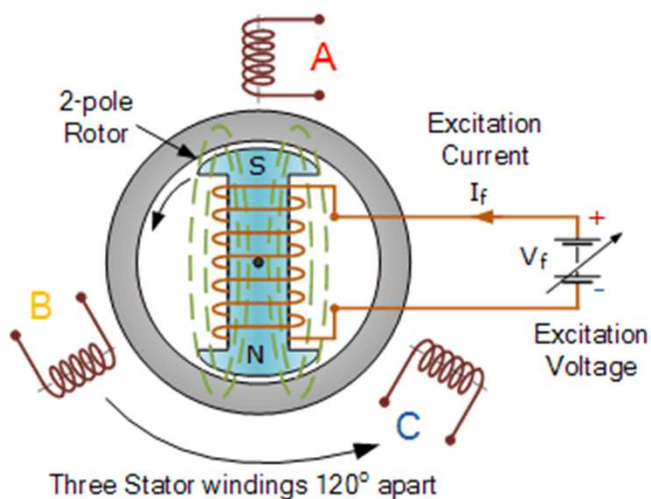
Κυλινδρικός δρομέας: Μηχανές λίγων πόλων → υψηλής ταχύτητας (π.χ. στροβιλογεννήτριες)





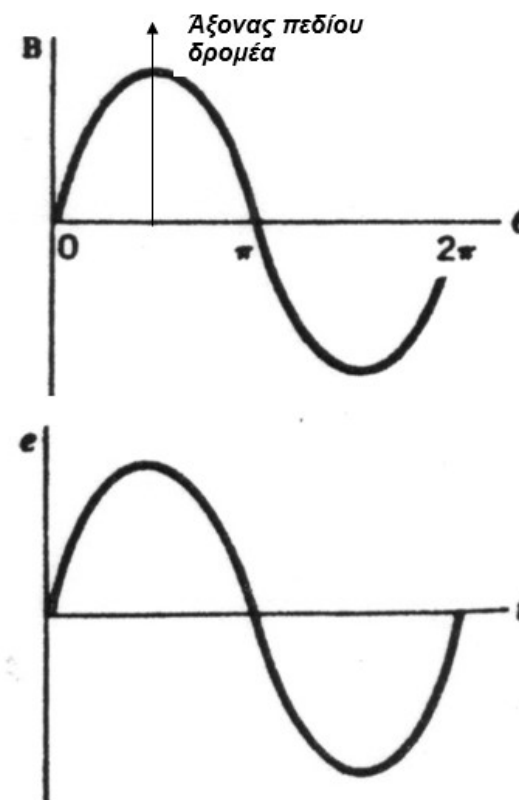
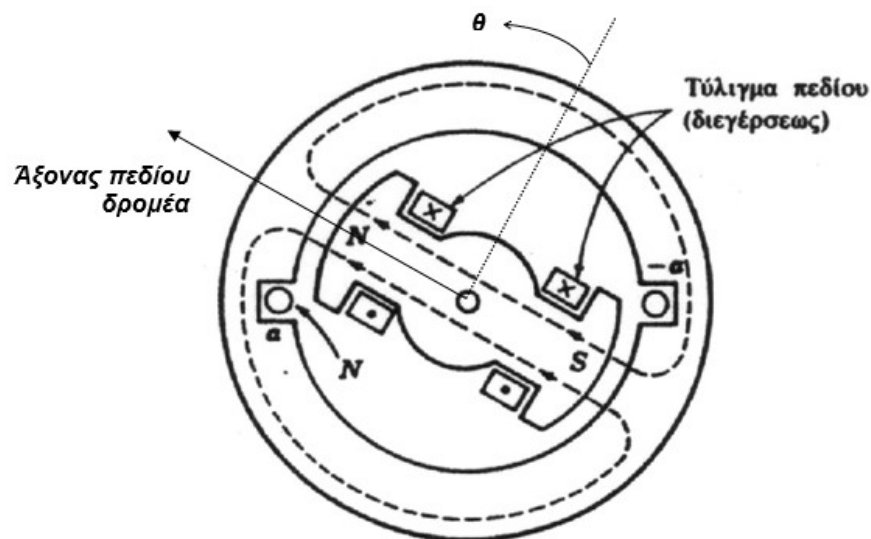
Είδη δρομέων

Δρομέας έκτυπων πόλων: Πολύ-πολικές μηχανές → χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (π.χ. υδροστρόβιλοι)





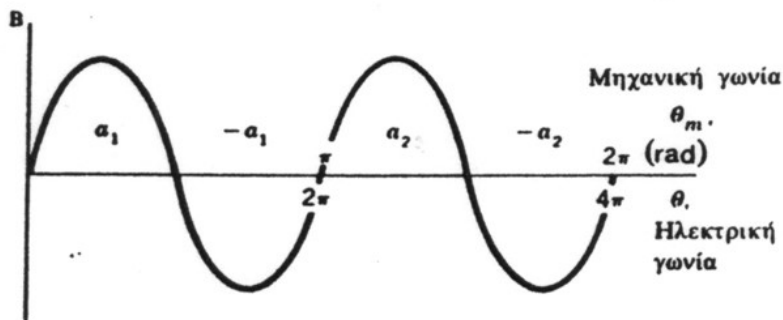
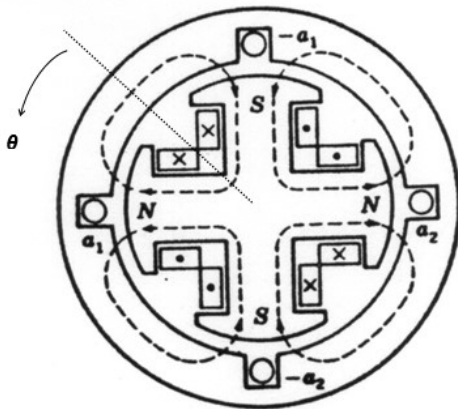
1Φ Διπολική Μηχανή



- Διέγερση δρομέα: εμφάνιση πόλων N-S (πάντοτε ζεύγη)
 - Πολικό βήμα: $180^\circ = 360^\circ/P$
- Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο: ημιτονοειδής χωρική κατανομή (κατά προσέγγιση)
- Αν $\omega_m = \sigma\tau\theta \rightarrow$ επαγωγή τάσεως στον στάτη συχνότητας $f_e = f_m$



1Φ Τετραπολική Μηχανή



- Τύλιγμα δρομέα τέτοιο ώστε αντίθετοι διαδοχικοί πόλοι (N-S)
 - Πολικό βήμα: $360^\circ/P = 90^\circ$ μηχανική γωνία
- Τύλιγμα στάτη: 2 πηνία, βήματος 90° το καθένα, έστω σε σειρά
- Β διακένου: 2 πλήρεις κύκλοι για $\theta_m = 0 \rightarrow 2\pi$
- Κίνηση δρομέα κατά 180° ($1/2$ περιστροφή) \rightarrow 1 πλήρης εναλλαγή ροής σε κάθε πηνίο \rightarrow 1 κύκλος επαγόμενης τάσεως
 - $\theta_e = 2\theta_m$ (αφού για $\theta_m = 2\pi \rightarrow \theta_e = 4\pi$)
 - $f_e = 2f_m$
- Σύνδεση πηνίων σε σειρά: Εμφάνιση διπλάσιας ολικής τάσεως



Γενικά περί πόλων και ταχυτήτων

Μηχανή P πόλων (P άρτιος):

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

θ : φάση ηλεκτρικών μεγεθών

θ_m : γωνία περιστροφής δρομέα

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m \Rightarrow 2\pi f = \frac{P}{2} 2\pi \frac{n}{60} \Rightarrow n = \frac{120f}{P} \text{ ΣΑΛ}$$

2πολική \rightarrow 3000 ΣΑΛ

4πολική \rightarrow 1500 ΣΑΛ

6πολική \rightarrow 1000 ΣΑΛ

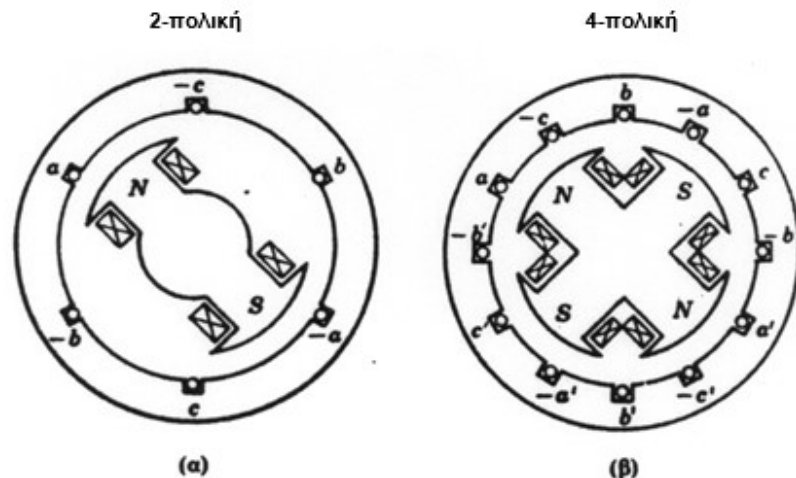
Π.χ. Σ/Γ 50 Hz, 125 ΣΑΛ, $P = \frac{120 \cdot 50}{125} = 48$ πόλοι ή 24 ζεύγη πόλων.

↓ P στις στροβιλογεννήτριες \rightarrow κυλινδρικός δρομέας

↑ P στους υδροστροβίλους (και Α/Γ) \rightarrow έκτυπτοι πόλοι



3Φ μηχανές

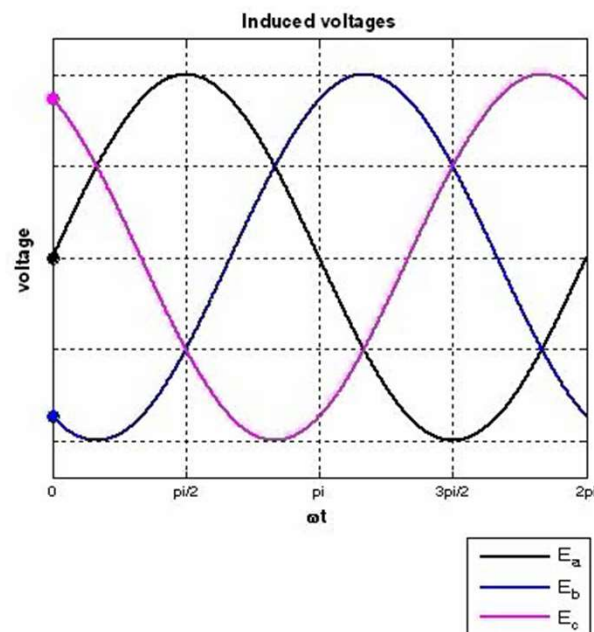
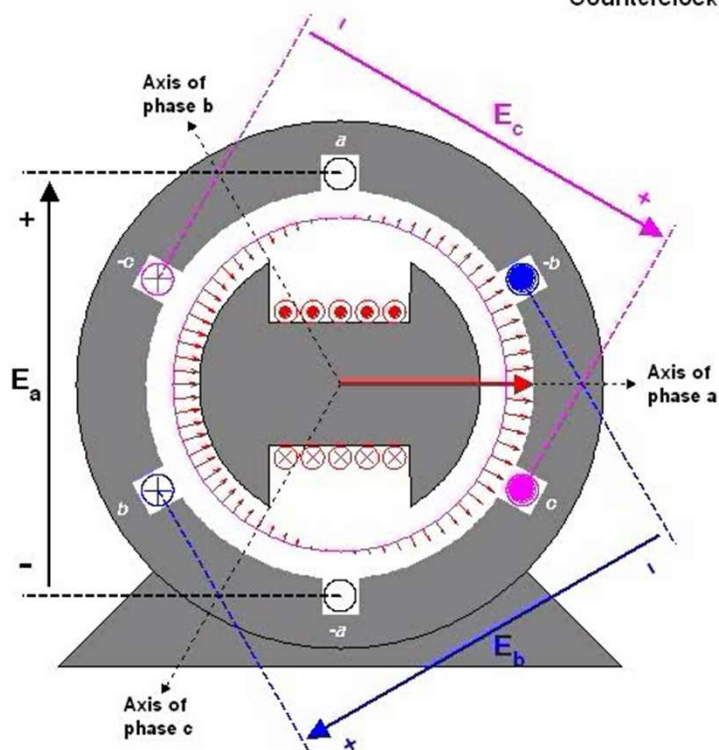


- Στη διπολική: 3 πηνία μετατοπισμένα κατά 120° μεταξύ τους
- Στην τετραπολική: ό,τι υπάρχει στη διπολική μηχανή σε 360° μηχανική γωνία (πλήρης περιφέρεια διακένου), εδώ υπάρχει σε 180° μηχανικές μοίρες ($1/2$ περιφέρειας διακένου):
 - Κάθε φάση έχει 2 ομάδες πηνίων (βήματος 90°)
 - Τα πηνία διαδοχικών φάσεων απέχουν 60 μηχανικές μοίρες



Ανάπτυξη τάσεων στο τύλιγμα στάτη

Generation of voltages in a two-pole, three-phase synchronous machine
Counterclockwise rotation



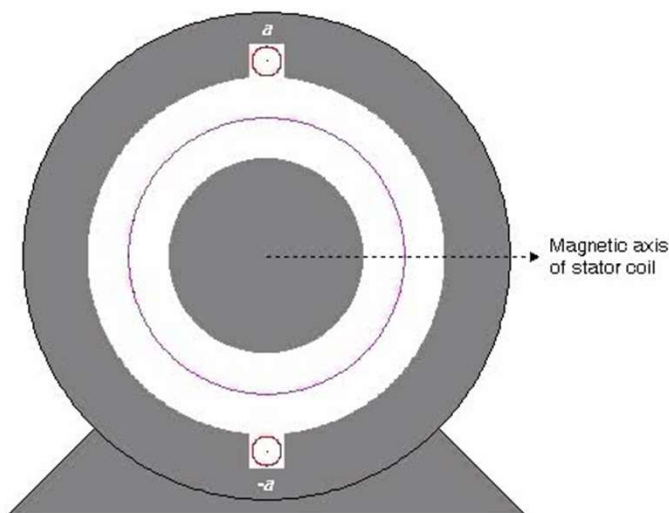
The arrows with red color show the space distribution of the fundamental component of the air-gap density of the flux, produced by the rotor

$$\text{Ενδεικνύμενη τιμή ανά φάση: } E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \Phi$$

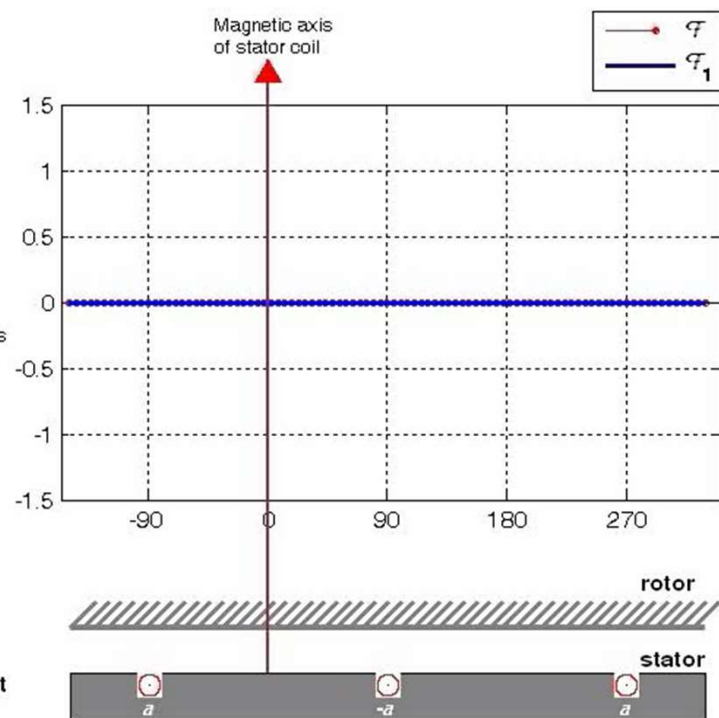


ΜΕΔ 1Φ τυλίγματος: Παλλόμενο πεδίο στο διάκενο

MMF produced by a concentrated two-pole, single-phase winding with one full-pitch coil



The arrows with red color show the MMF in the air gap, while those with blue color show its fundamental component

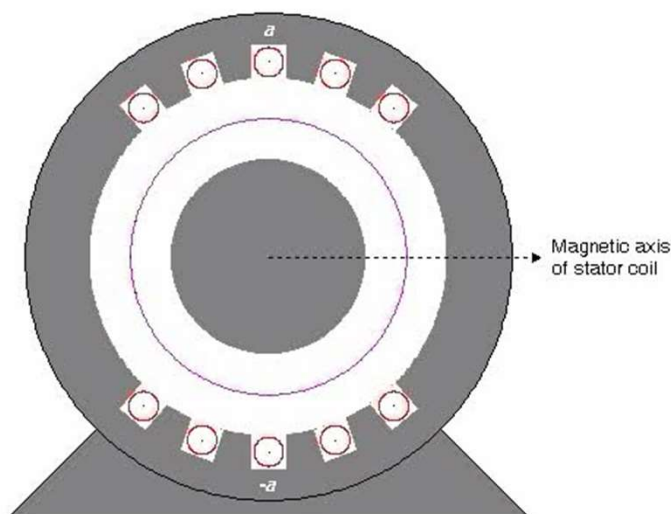


Developed form

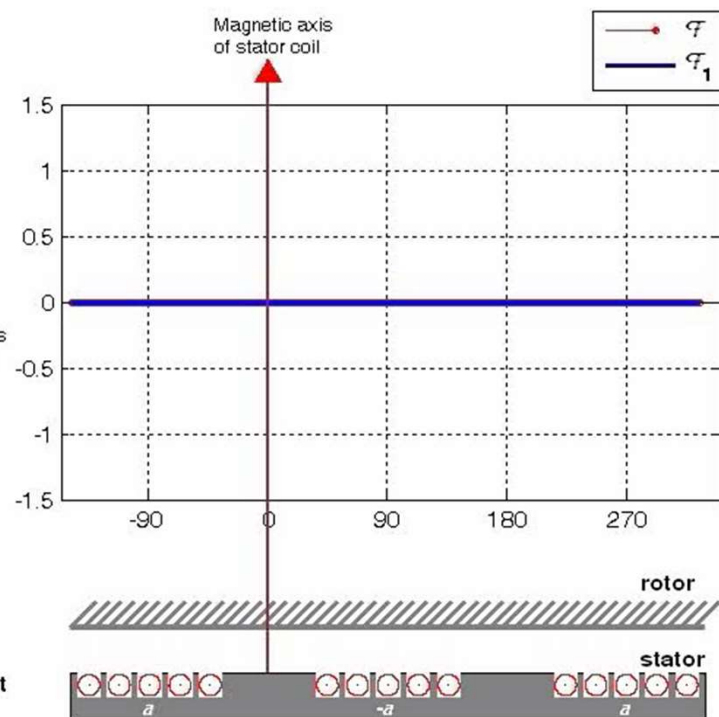


ΜΕΔ 1Φ κατανεμημένου τυλίγματος (σε 5 αύλακες)

MMF produced by a distributed two-pole, single-phase winding with five full-pitch coils



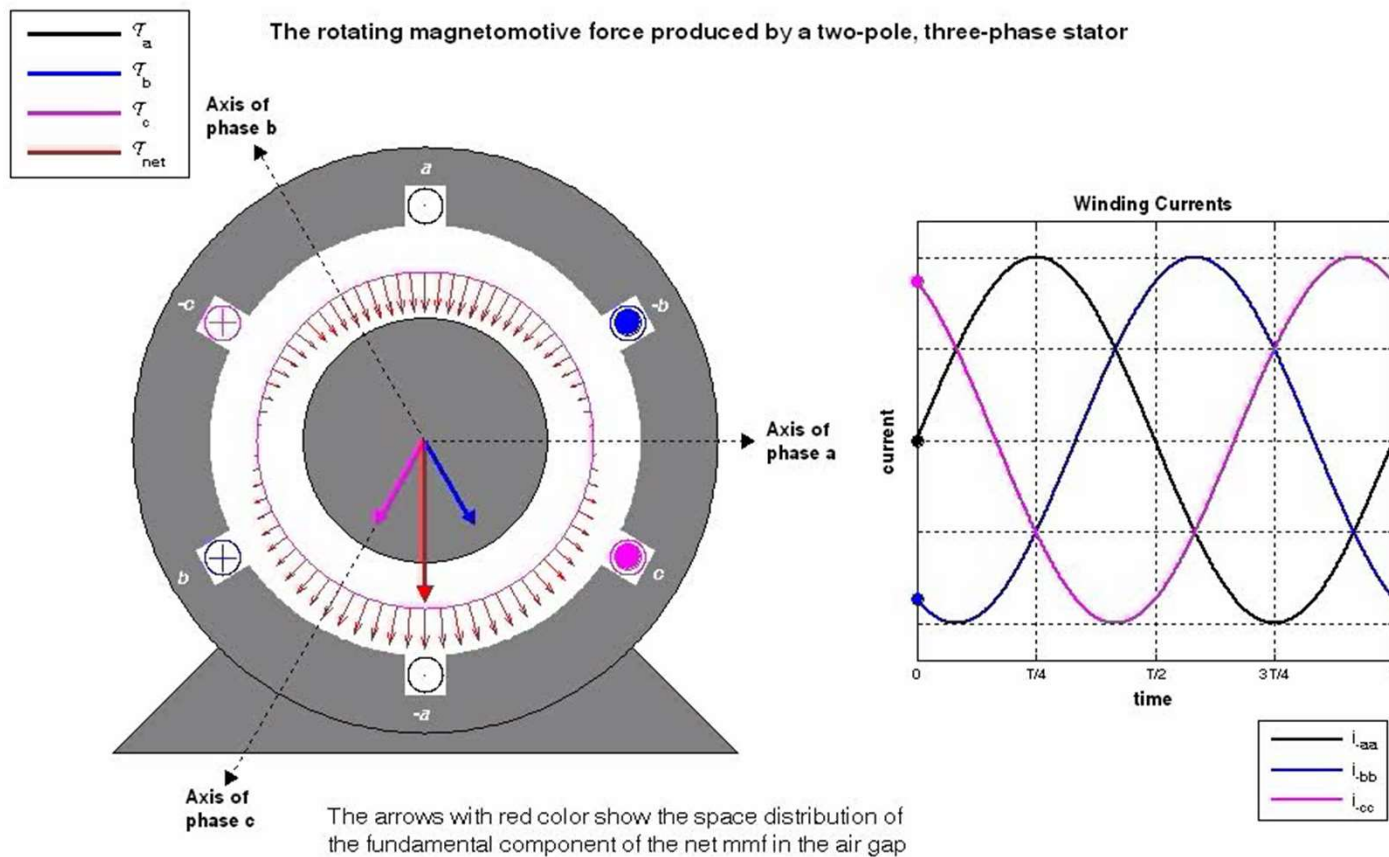
The arrows with red color show the MMF in the air gap, while those with blue color show its fundamental component



Developed form



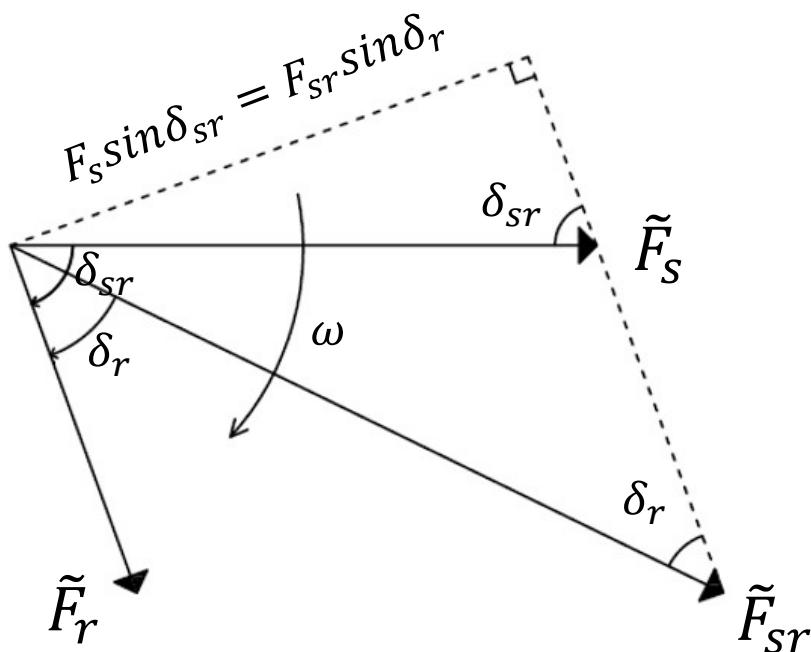
ΜΕΔ 3Φ τυλίγματος: Στρεφόμενο πεδίο στο διάκενο



Πεδίο στρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα $\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2}$



Ανάπτυξη ροπής



- \tilde{F}_s, \tilde{F}_r : διανύσματα χώρου των πεδίων (ΜΕΔ) στάτη και δρομέα
- Σε μόνιμη κατάσταση $\tilde{F}_s, \tilde{F}_r, \delta_{sr}$ σταθερά $\rightarrow T = \text{σταθ.}$
- Λειτουργία κινητήρα-γεννήτριας:
 - \tilde{F}_s προηγείται της \tilde{F}_r : Κινητήρας
 - \tilde{F}_s έπεται της \tilde{F}_r : Γεννήτρια

$$T = -\frac{P}{2} \cdot \frac{\mu_0 \pi r l}{g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad \xrightarrow{F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r} \quad T = -\frac{P}{2} \cdot \frac{\mu_0 \pi r l}{g} F_{sr} F_r \sin \delta_r$$

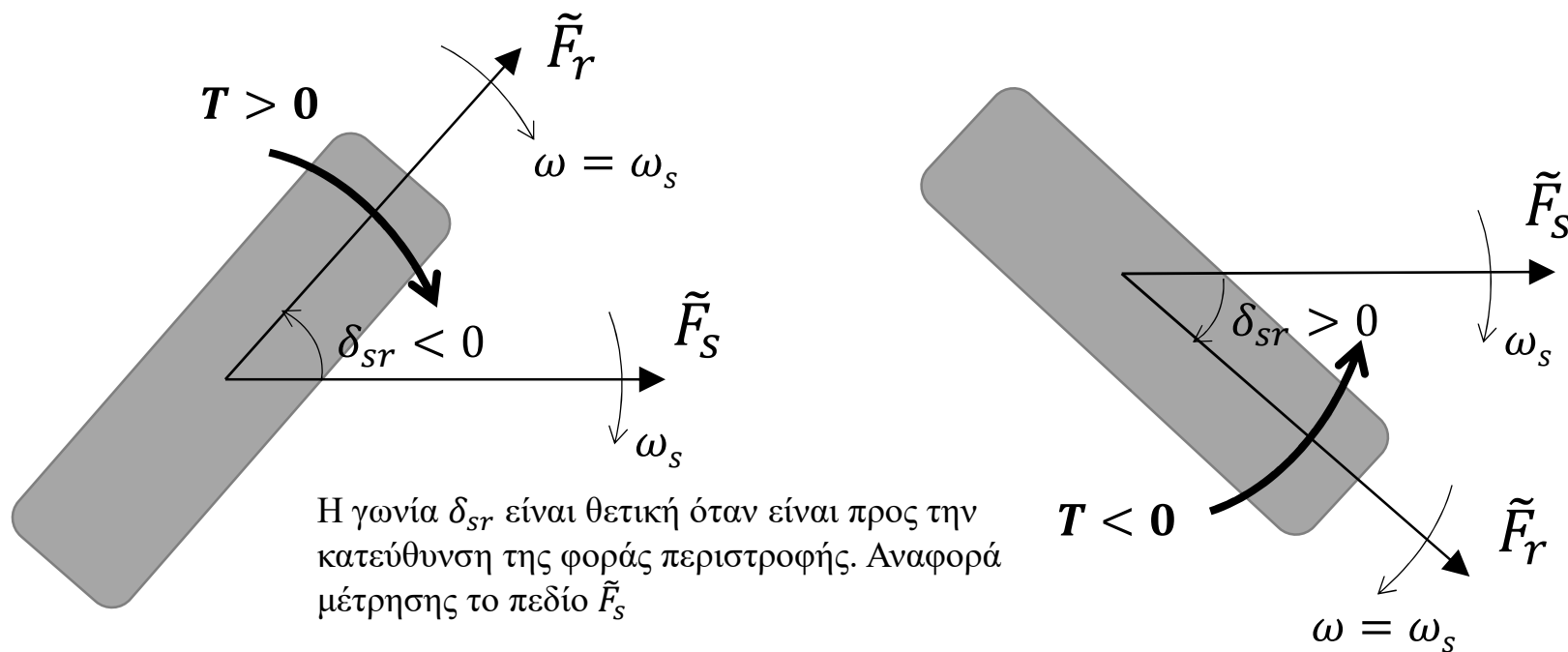
$$T = -\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{P}{2}\right)^2 \cdot \Phi_{sr} \cdot F_r \sin \delta_r$$

Φ_{sr} : Ολική ροή ανά πόλο

$\frac{P}{2}$: Ζεύγη πόλων



Λειτουργία κινητήρα-γεννήτριας



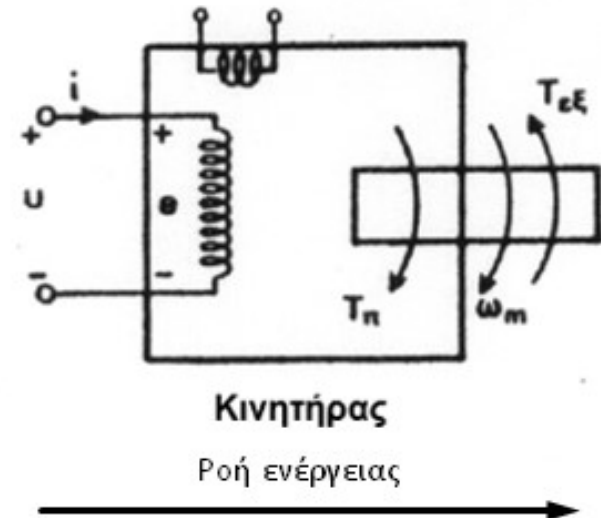
- \tilde{F}_r έπεται της $\tilde{F}_s \rightarrow \delta_{sr} < 0 \rightarrow T > 0$ (επιταχύνουσα) \rightarrow **κινητήρας**

- \tilde{F}_r προηγείται της $\tilde{F}_s \rightarrow \delta_{sr} > 0 \rightarrow T < 0$ (επιβραδύνουσα) \rightarrow **γεννήτρια**



Λειτουργία Κινητήρα

- Ροπή πεδίου T_e ίδιας φοράς με ω (επιταχύνουσα)
- Ροπή φορτίου T_m αντίθετη της φοράς περιστροφής (επιβραδύνουσα)
- Απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας
→ παραγωγή μηχανικού έργου



- Εξίσωση κίνησης:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - T_{\alpha\pi}$$

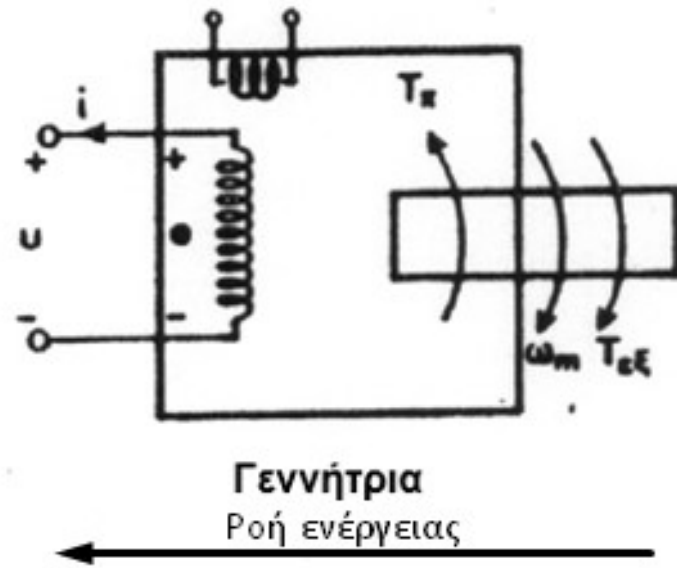
επιταχύνουσα \rightarrow T_e T_m \leftarrow επιβραδύνουσα
απώλειες $(-T_{\alpha\pi})$

- Μόνιμη κατάσταση: $\omega_m = \text{σταθ} \rightarrow T_e = T_m + T_{\alpha\pi}$



Λειτουργία Γεννήτριας

- Ροπή T_m κινητήριας μηχανής: προς φορά κίνησης (επιταχύνουσα)
- Ροπή πεδίου T_e : αντίρροπη της ω_m (επιβραδύνουσα)
- Απορρόφηση μηχανικής ενέργειας
→ παραγωγή ηλεκτρικής



- Εξίσωση κίνησης:

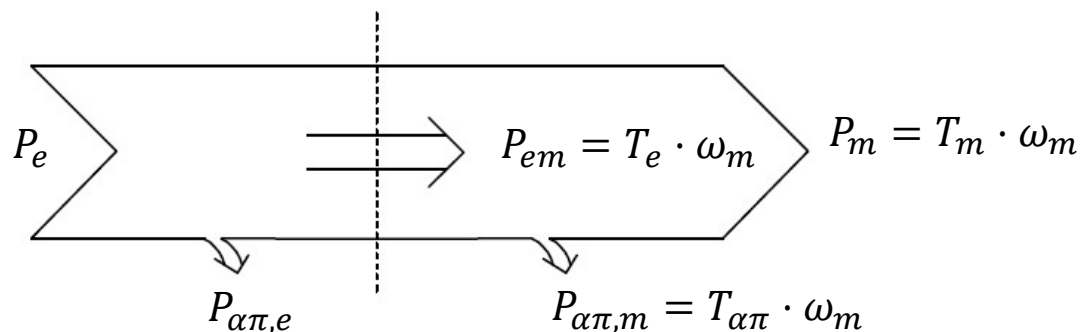
$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (-T_{απ})$$

- Συμβάσεις αναφοράς για ροπή:
 - Σύμβαση κινητήρα για T_m : θετική όταν επιταχύνει
 - Σύμβαση γεννήτριας για T_e : θετική όταν επιβραδύνει



Ροή ισχύος και απώλειες

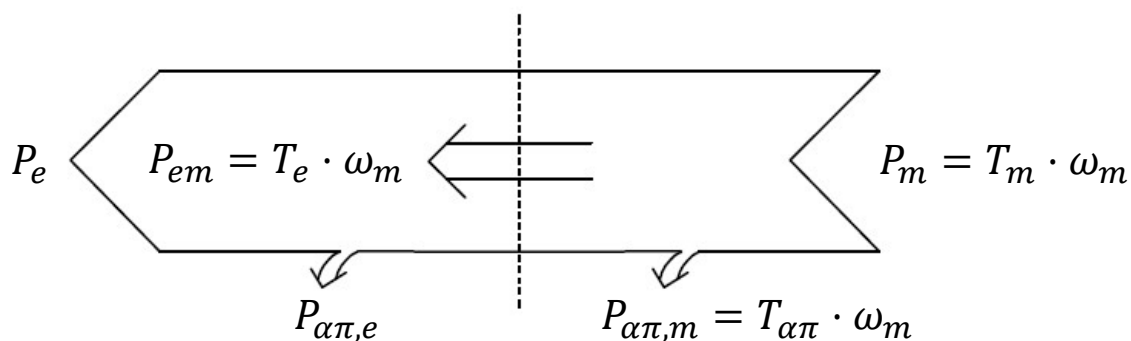
Κινητήρας



Βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}$$

Γεννήτρια



Βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_e}{P_m}$$