



# Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 9. Τριφασικές μηχανές επαγωγής

Βασίλης Νικολαΐδης  
Επίκουρος Καθηγητής

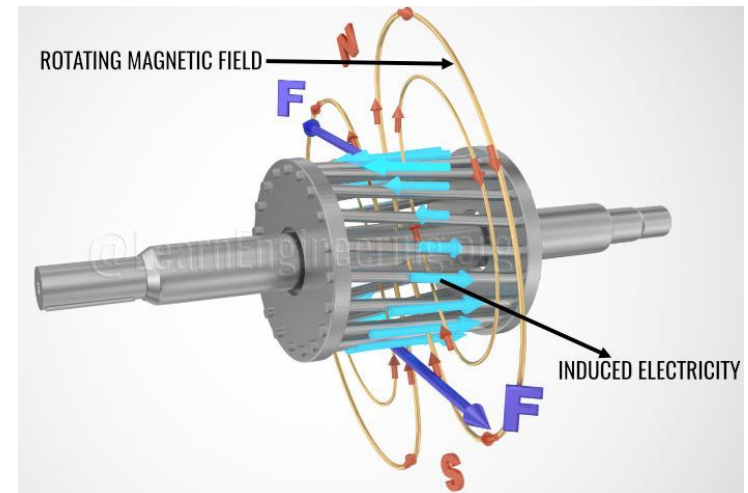
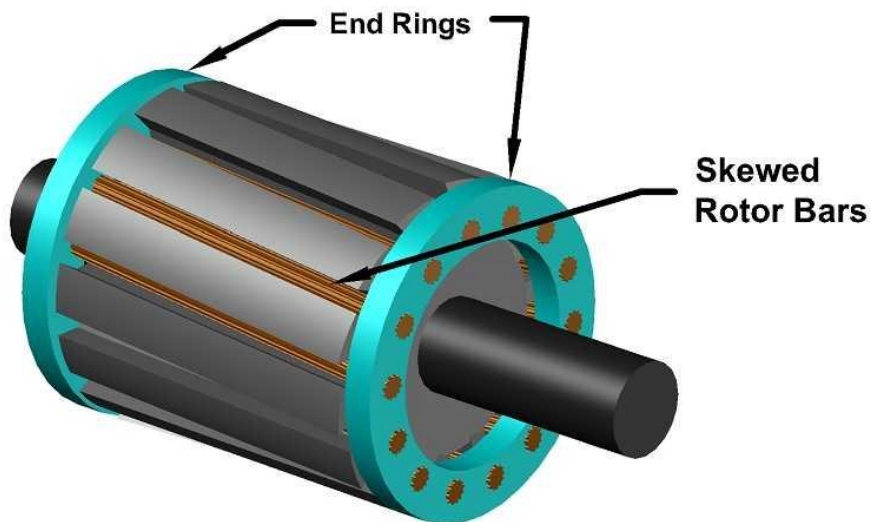


# Μηχανές επαγωγής

- ❑ Αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο ηλεκτρικού κινητήρα.
- ❑ Χρησιμοποιούνται και ως γεννήτριες στα αιολικά πάρκα.
- ❑ Δεν χρειάζονται ειδικό σύστημα διέγερσης.
- ❑ Μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να διορθώσουν οι ίδιες τον συντελεστή ισχύος και χρειάζονται άεργο αντιστάθμιση (π.χ. πυκνωτές)

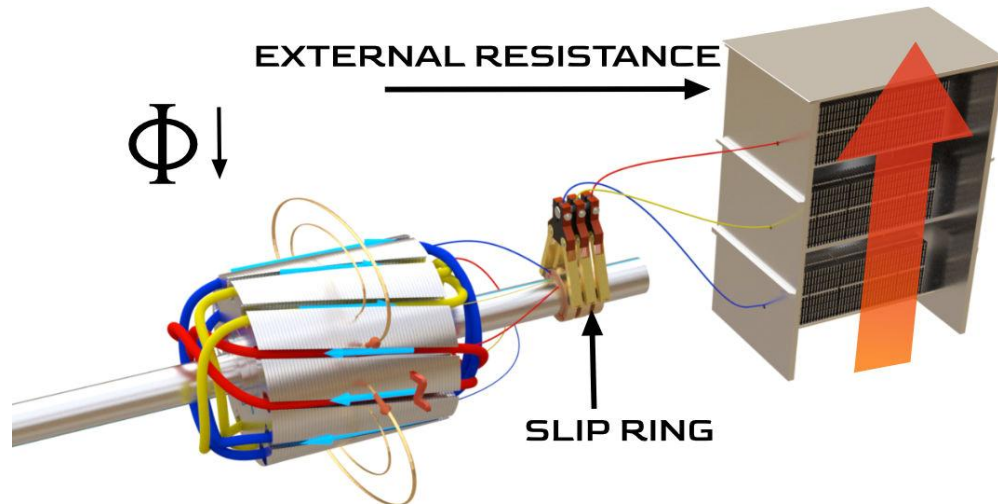
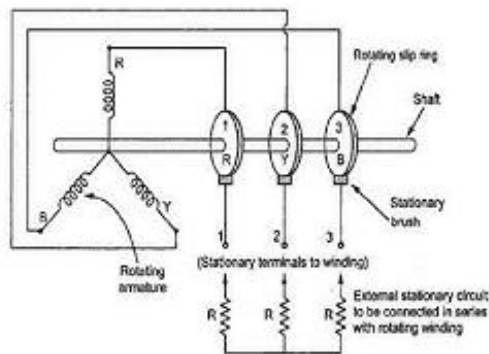
# Κινητήρες επαγωγής με τύλιγμα κλωβού

- ❑ Το τύλιγμα δρομέα αποτελείται από χάλκινες αγωγίμες ράβδους, τοποθετημένες σε αύλακες στο σιδερένιο πυρήνα του δρομέα, που βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίους.



## Κινητήρες με τυλιγμένο δρομέα

- ❑ Το τύλιγμα δρομέα είναι τριφασικό, όμοιο με του στάτη, με τον ίδιο αριθμό πόλων. Οι ακροδέκτες του δρομέα συνδέονται μέσω δακτυλίων και ψηκτρών με εξωτερικές μεταβαλλόμενες αντιστάσεις για τη αύξηση της αντίστασης κατά την εκκίνηση.

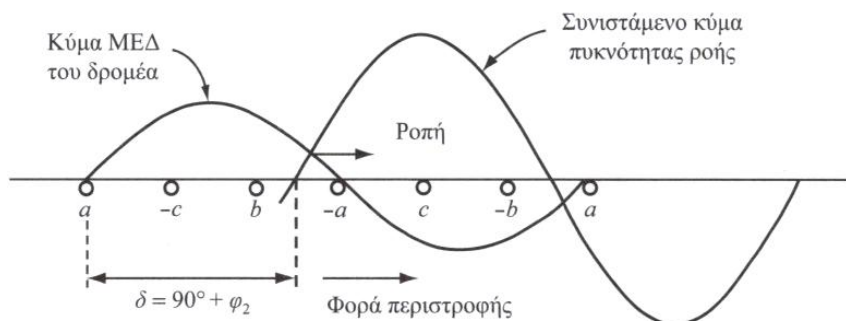




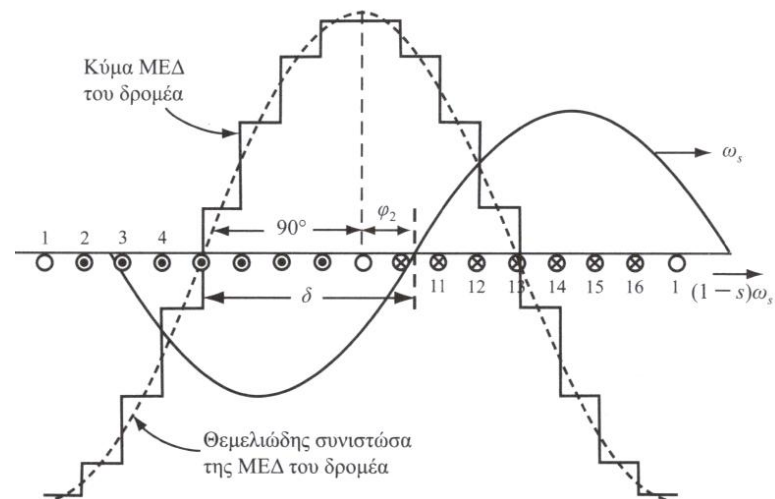
# Αρχή λειτουργίας μηχανής επαγωγής

- ❑ Το τύλιγμα στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα συχνότητας  $f$ .
- ❑ Το τύλιγμα δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής στη συχνότητα ολίσθησης  $f_r = sf$ , όπου
  - $s = \frac{n_s - n}{n_s}$  η ολίσθηση,
  - $n_s = \frac{120f}{p}$  η σύγχρονη ταχύτητα,
  - $n = (1 - s) n_s$  η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε ΣΑΛ,
  - $\omega_m = (1 - s)\omega_s$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rad/s.

# Κύματα ΜΕΔ



Τυλιγμένου δρομέα

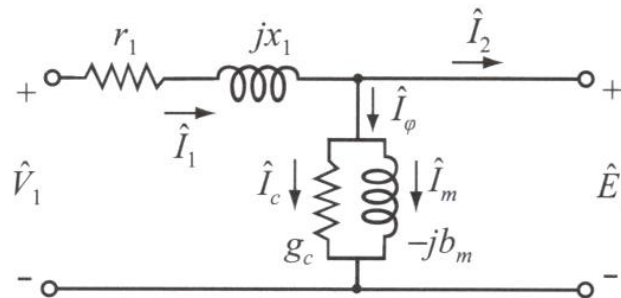


Κλωβού

$$\delta \geq 90^\circ + \varphi_2$$

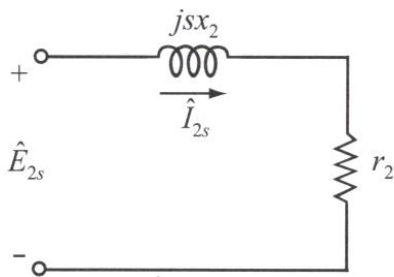
όπου  $\varphi_2$  η γωνία του συντελεστή ισχύος του τυλίγματος δρομέα

# Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη μηχανής επαγωγής



- ❑  $\hat{E}_1$  η επαγόμενη στο στάτη αντι-ΗΕΔ από το συνιστάμενο κύμα ΜΕΔ
- ❑  $\hat{I}_2$  η συνιστώσα του ρεύματος φορτίου (ρεύμα δρομέα ανηγμένο στο στάτη ως προς το λόγο ελιγμάτων και τη συχνότητα)
- ❑  $\hat{I}_\phi = \hat{I}_m + \hat{I}_c$  το ρεύμα διέγερσης ως άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης  $\hat{I}_m$  και του ρεύματος απωλειών πυρήνα  $\hat{I}_c$  (θεωρούμε  $\hat{I}_c = 0$ )

# Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα μηχανής επαγωγής



- Εκφρασμένο στη συχνότητα ολίσθησης
- Ανηγμένο στο στάτη ως προς το λόγο ελιγμάτων στάτη-δρομέα (λόγος μετασχηματισμού)  $a = N_1:N_2$

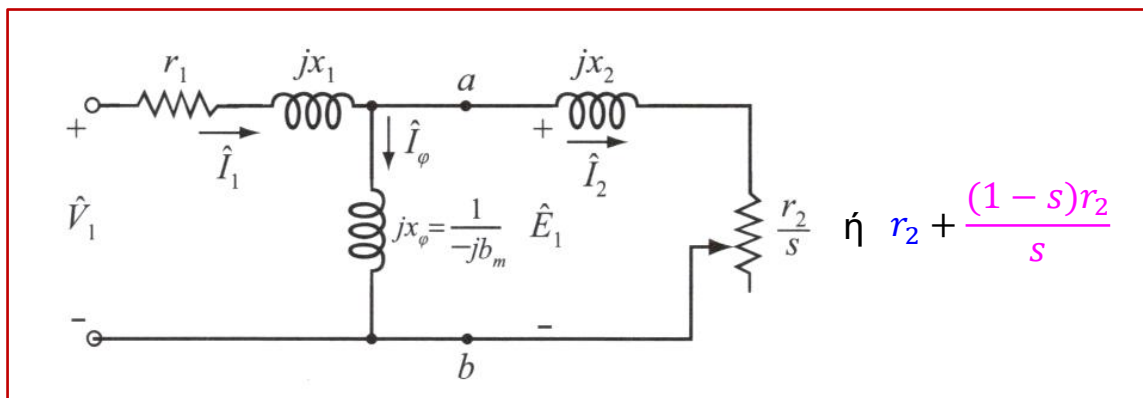
$$\hat{E}_{2s} = (r_2 + jsx_2)\hat{I}_{2s}$$

- ❑  $\hat{E}_{2s}$  η επαγόμενη στο δρομέα ΗΕΔ από το συνιστάμενο κύμα ΜΕΔ, στη συχνότητα ολίσθησης  $s\omega$
- ❑  $\hat{I}_{2s}$  το ρεύμα δρομέα στη συχνότητα ολίσθησης  $s\omega$
- ❑  $sx_2 = s\omega L_2$  η αντίδραση σκεδάσεως στη συχνότητα ολίσθησης  $s\omega$
- ❑  $L_2$  η αυτεπαγωγή σκεδάσεως του δρομέα



# Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

$$\left. \begin{array}{l} \hat{E}_{2s} = s\hat{E}_1 \\ \hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \end{array} \right\} \xrightarrow{\hat{E}_{2s} = (r_2 + jsx_2)\hat{I}_{2s}} \hat{E}_1 = \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)\hat{I}_2$$



Η συμβατική φορά ρευμάτων και ισχύων θα αντιστοιχούν πάντα σε λειτουργία κινητήρα είτε η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια.



# Λειτουργία κινητήρα επαγωγής

- Ισχύς εισόδου:

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_{g1} + 3I_1^2 r_1 \quad (\varphi_1 \text{ η γωνία του συντελεστή ισχύος})$$

- Ολική ισχύς που μεταφέρεται διαμέσου του διακένου αέρα από το στάτη στο δρομέα:

$$P_{g1} = 3I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (\text{σε W και για τις τρεις φάσεις})$$

- Απώλειες χαλκού δρομέα:

$$P_{x2} = 3I_2^2 r_2 = s P_{g1}$$

- Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς κινητήρα:

$$P_e = P_{g1} - P_{x2} = 3I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} = (1-s) P_{g1}$$

- Μηχανική ισχύς κινητήρα (μηχανικό φορτίο):

$$P_m = P_e - P_{\alpha\pi} \quad P_{\alpha\pi}: \text{απώλειες περιστροφής + απώλειες σιδήρου (όταν } I_c = 0)$$

- Βαθμός απόδοσης:  $\eta = \frac{P_m}{P_1}$



## Ροπές

- Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{P_e}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{g1}}{\omega_s} \quad \text{ή} \quad T_e = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

- Μηχανική ροπή ή ροπή εξόδου κινητήρα:

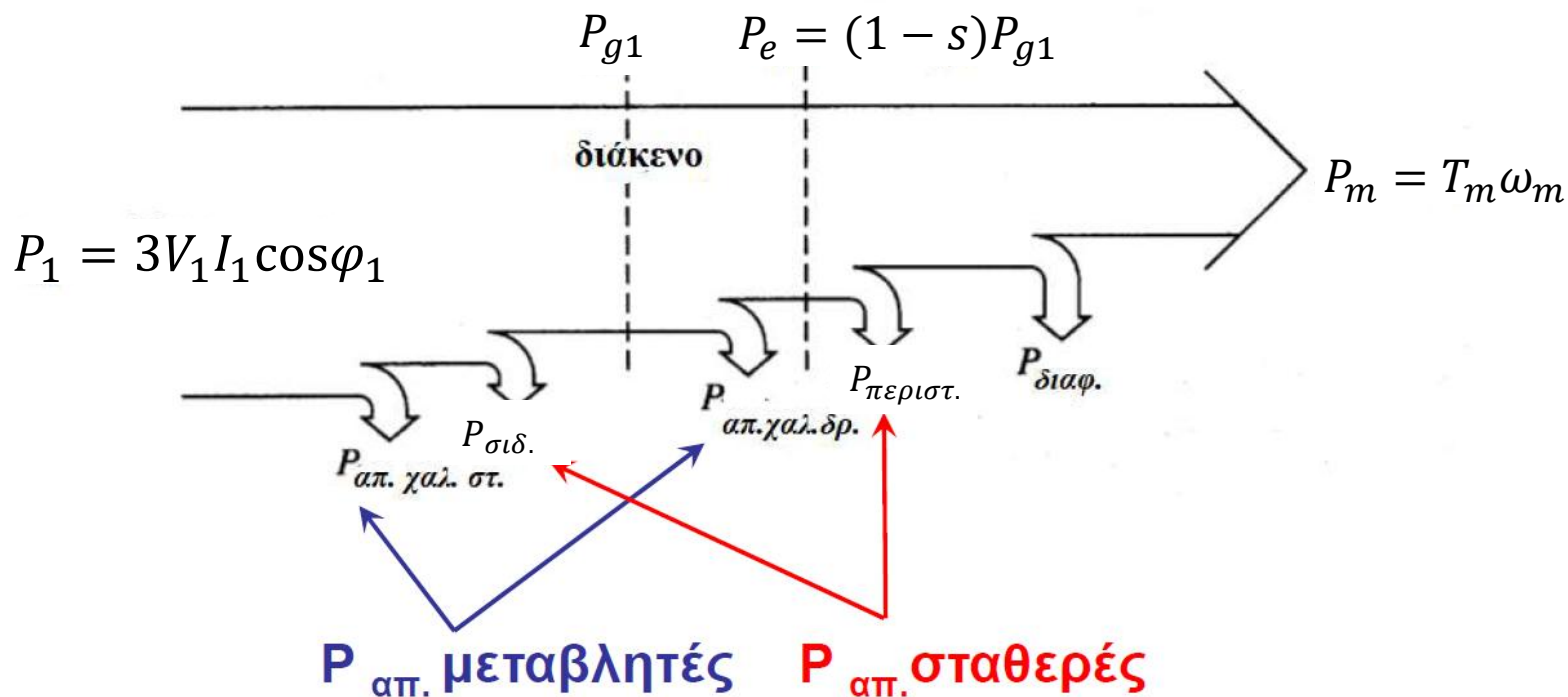
$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m}$$

Αποδοτικότερη λειτουργία με μικρή ολίσθηση.

Βαθμός απόδοσης πάντα μικρότερος του  $1 - s$ , δηλαδή  $\eta < 1 - s$



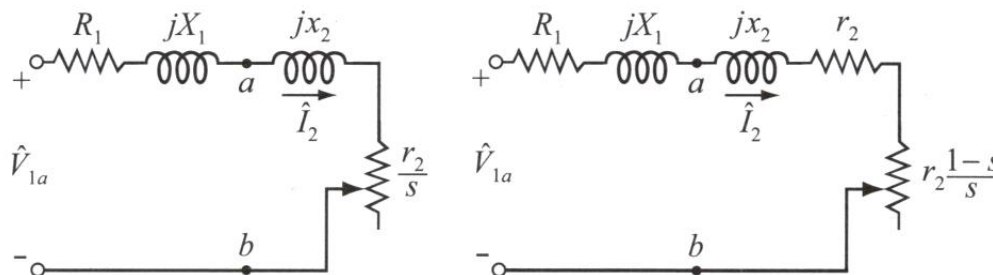
## Βαθμός απόδοσης



$$\eta = \frac{P_m}{P_1} = \frac{P_m}{P_m + P_{\text{απ. σταθ}} + P_{\text{απ. μεταβ.}}} = \frac{P_e - P_{\text{απ. περιστ.}}}{P_e + P_{\text{χαλ. στατη}} + P_{\text{χαλ. δρομεα}}}$$



# Ισοδύναμο Thevenin



□ Τάση Thevenin:  $\hat{V}_{1a} = \frac{jx_\phi}{r_1 + j(x_1 + x_\phi)} \hat{V}_1$

□ Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thevenin:  $R_1 + jX_1 = \frac{jx_\phi(r_1 + jx_1)}{r_1 + j(x_1 + x_\phi)}$

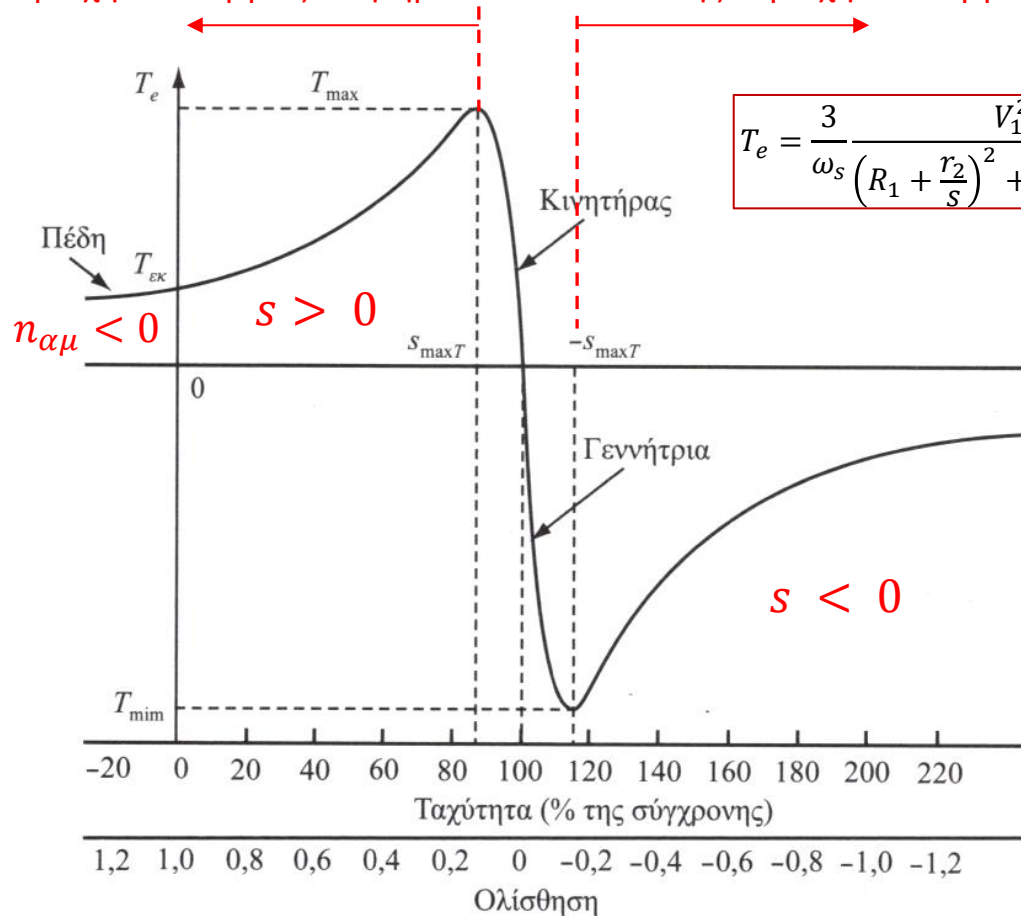
□ Ρεύμα φορτίου:  $I_2^2 = \frac{V_{1a}^2}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + x_2)^2}$

□ Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα:  $T_e = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + x_2)^2} \frac{r_2}{s}$

# Χαρακτηριστική ροπής - ολίσθησης

Ασταθής περιοχή λειτουργίας κινητήρα

Ασταθής περιοχή λειτουργίας γεννήτριας





# Ροπή σε χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας

- Ροπή εκκίνησης κινητήρα ( $s = 1$ ):

$$T_{εκ} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + x_2)^2} r_2$$

$$\hat{I}_{εκ} = \frac{\hat{V}_1}{(r_1 + jx_1) + [jx_\varphi \parallel (r_1 + jx_2)]}$$

- Μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής ( $s = s_{maxT} = + \frac{r_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2}}$ ):  
(λειτουργία κινητήρα)

$$T_{max} = \frac{3/2}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2}}$$

- Ελάχιστη ροπή ή μέγιστη αρνητική ( $s = s_{minT} = - \frac{r_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2}}$ ):  
(λειτουργία γεννήτριας)

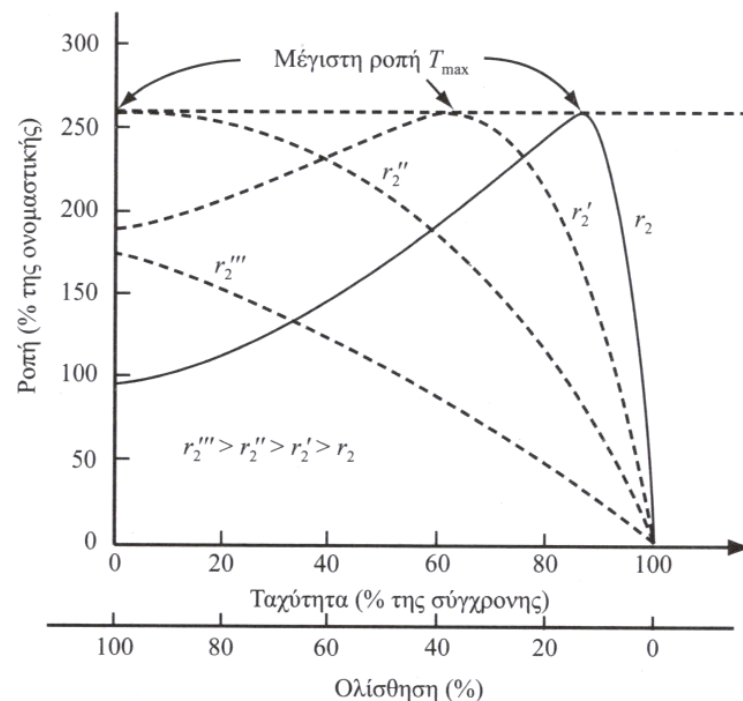
$$T_{min} = - \frac{3/2}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2} - R_1}$$

$\frac{dT_e}{dz} = 0 \quad \xrightarrow{z = r_2/s} \quad s_{maxT}, s_{minT}$



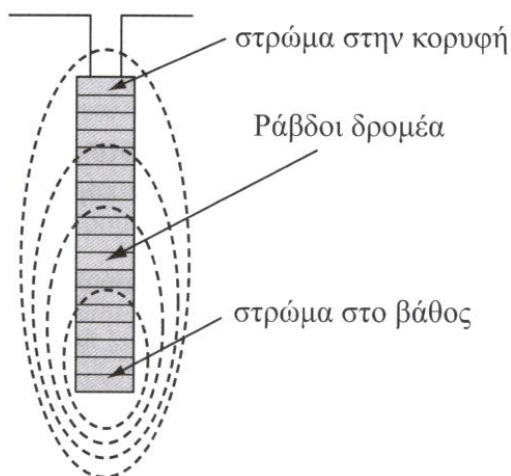
# Επίδραση της αντίστασης του δρομέα στη ροπή

- Η αντίσταση δρομέα μεταβάλλεται:
  - Μεταβάλλοντας εξωτερικές αντιστάσεις σε κινητήρες τυλιγμένου δρομέα
  - Εγγενώς με την ταχύτητα περιστροφής με κατάλληλη διαμόρφωση του δρομέα σε κινητήρες κλωβού

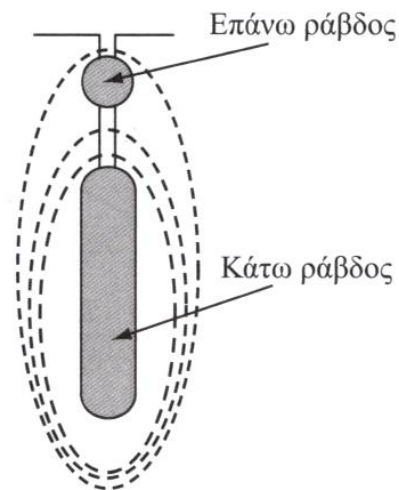


# Διαμόρφωση δρομέα σε κινητήρες κλωβού

Επιτυγχάνεται η ισοδύναμη ωμική αντίσταση του δρομέα στην εκκίνηση (50 Hz) να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή στο πλήρες φορτίο (1-3 Hz).



Βαθιάς αύλακας



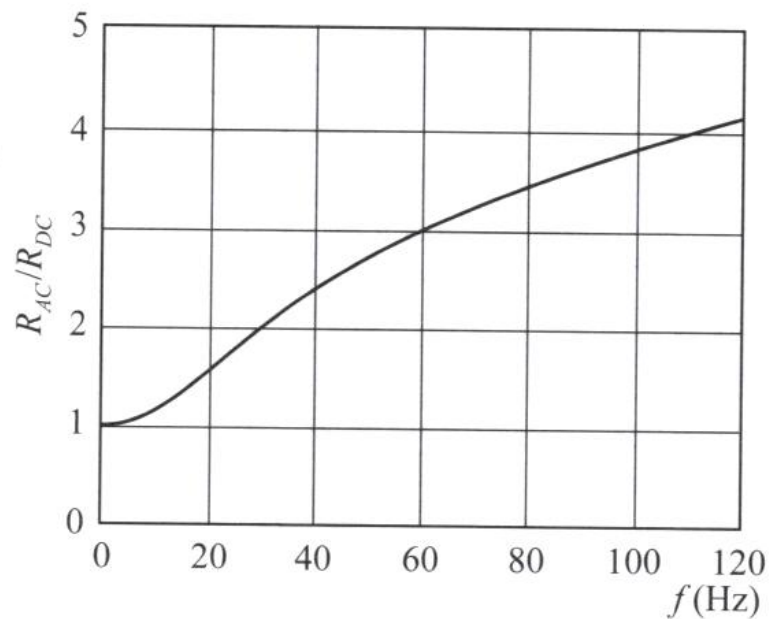
Διπλού κλωβού



# Επιδερμικό φαινόμενο

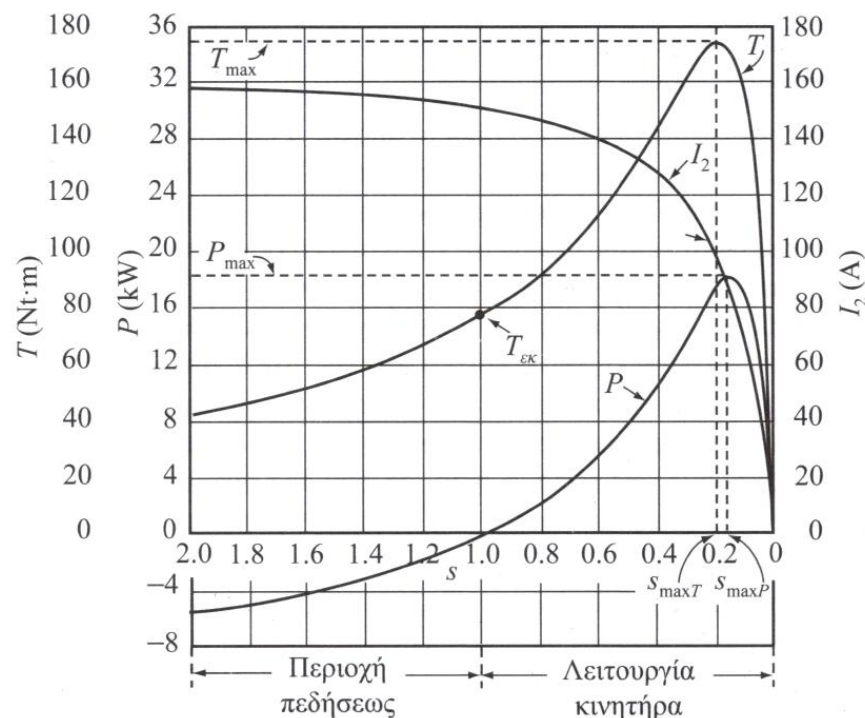
$R_{AC}$ : αντίσταση  
εναλλασσόμενου  
ρεύματος

$R_{DC}$ : αντίσταση  
συνεχούς  
ρεύματος



## Λειτουργία πέδης

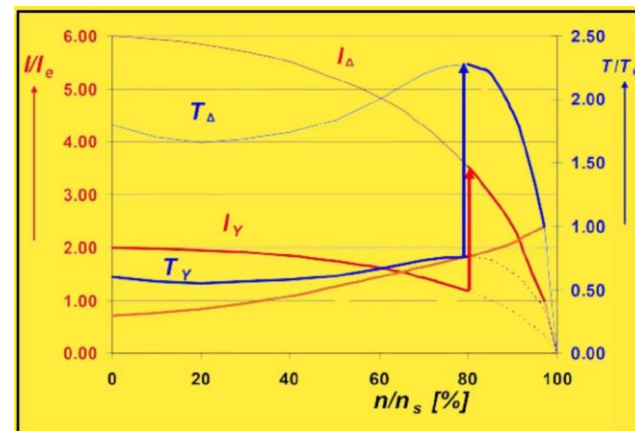
- ❑ Περιστροφή του κινητήρα αντίθετα από τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου
- ❑ Απαιτείται να ασκηθεί μηχανική ροπή  $T_m$  μεγαλύτερη από την  $T_e$
- ❑ Στην πράξη, σε τριφασικούς κινητήρες επαγωγής πέδηση επιτυγχάνεται με εναλλαγή δύο ακροδεκτών του στάτη (αντιστροφή ακολουθίας φάσεων)





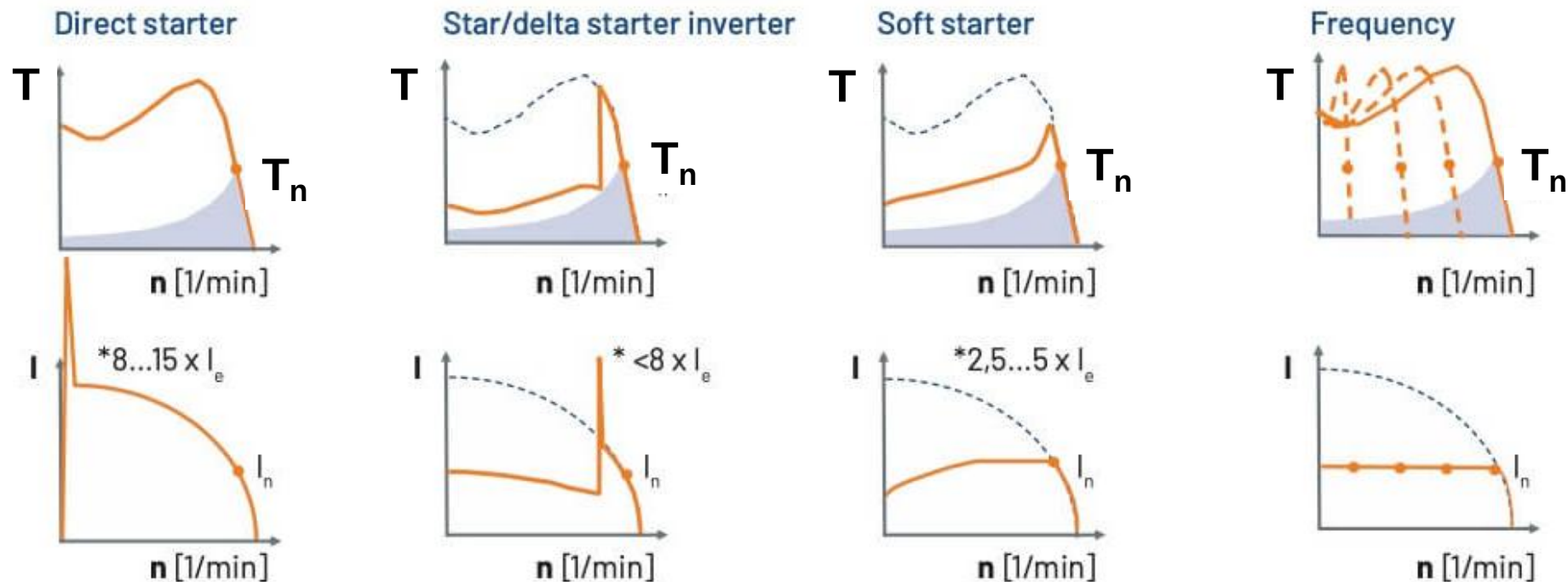
# Συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου

- ❑ Συνδεσμολογία τυλίγματος στάτη σε Υ:  $V_1 = V_\phi$   $I_1 = I_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\eta\varsigma}$
- ❑ Συνδεσμολογία τυλίγματος στάτη σε Δ:  $V_1 = V_\pi = \sqrt{3}V_\phi$   $I_1 = I_{\tau\upsilon\lambda\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}$   
 $I_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\eta\varsigma} = \sqrt{3}I_{\tau\upsilon\lambda\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}$
- ❑ Ρεύμα γραμμής στις δυο συνδεσμολογίες:  $I_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\eta\varsigma(\Delta)} = 3I_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\eta\varsigma(\Upsilon)}$
- ❑ Ροπή και ένταση κατά την εκκίνηση με διακόπτη Υ-Δ:



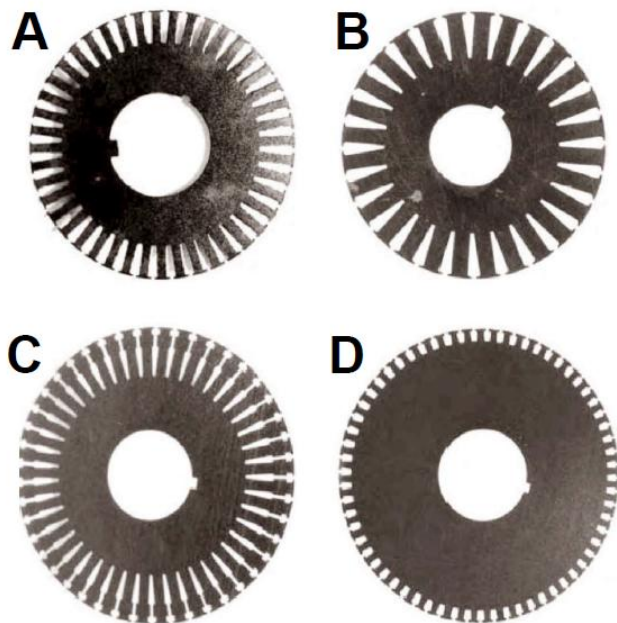


# Τρόποι εκκίνησης κινητήρων επαγωγής





# Τυποποίηση κινητήρων



| Motor class | Description                                     |
|-------------|-------------------------------------------------|
| A           | Normal starting torque, normal starting current |
| B           | Normal starting torque, low starting current    |
| C           | High starting torque, low starting current      |
| D           | High starting torque, high slip                 |
| Wound rotor | Performance varies with rotor resistance        |

Source: IEEE Standard 112.

