



# Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 8. Σύγχρονες μηχανές

Βασίλης Νικολαΐδης  
Επίκουρος Καθηγητής



## Σύγχρονες μηχανές

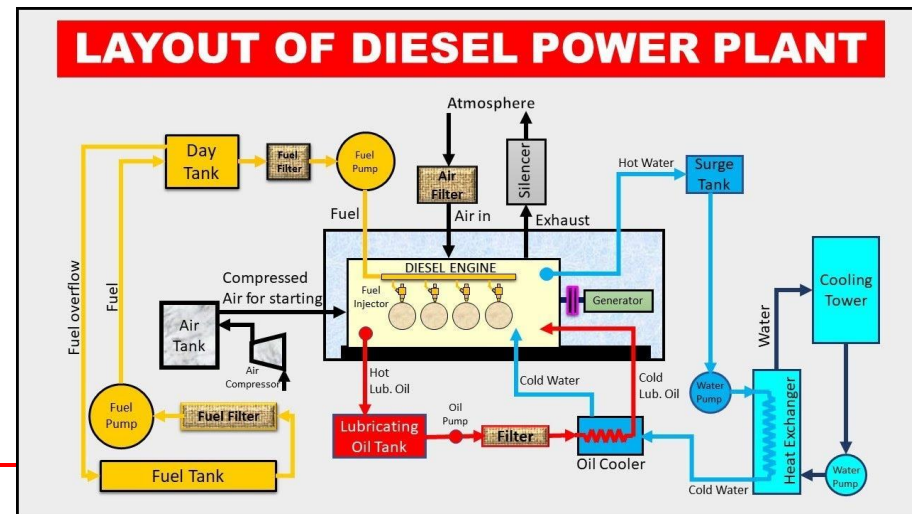
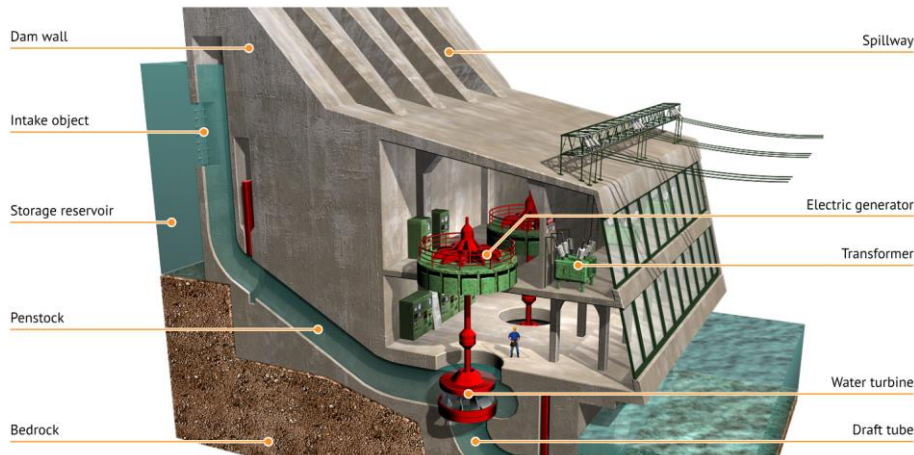
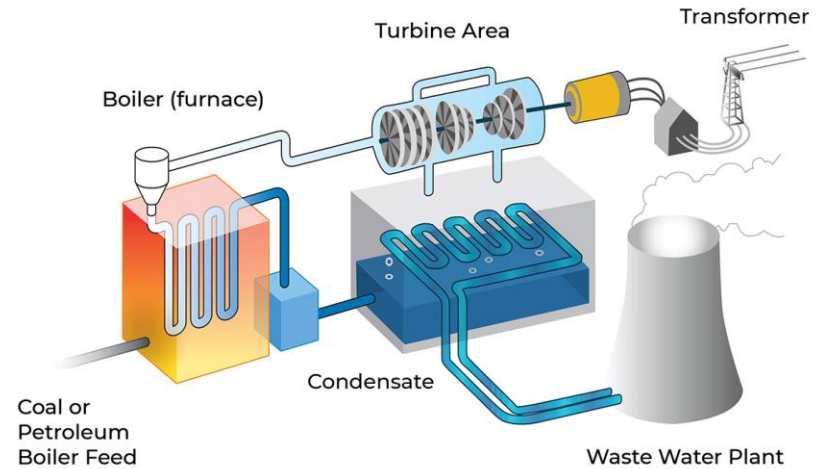
- Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας επιτυγχάνεται στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων μεγεθών.

<https://www.youtube.com/watch?v=YYQayMrK4Fo>

<https://www.youtube.com/watch?v=tiKH48EMgKE>

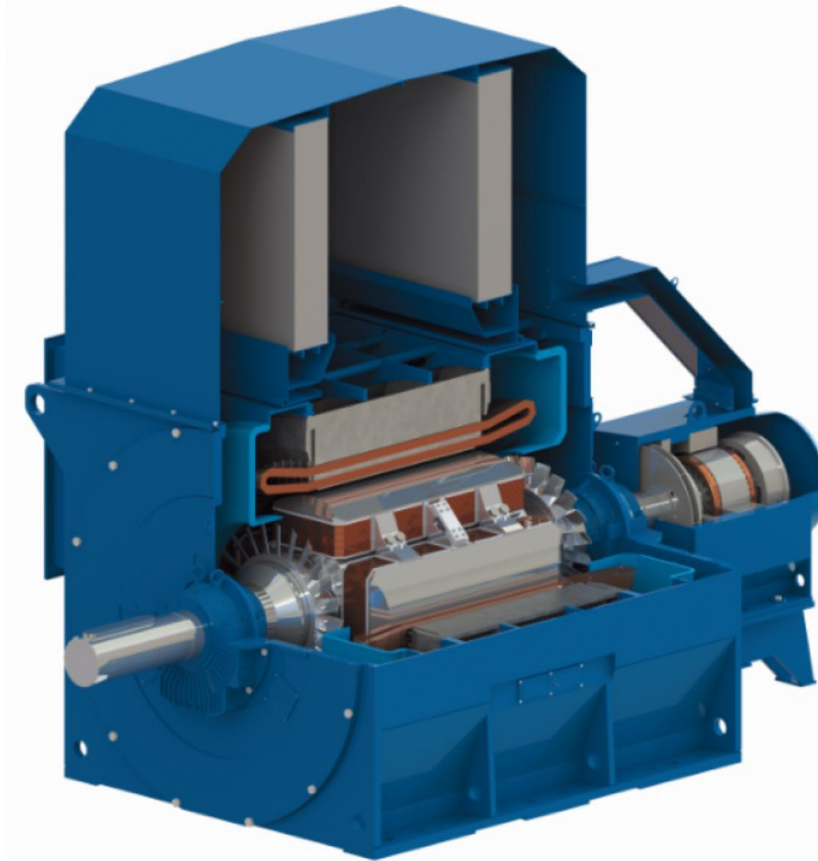


# Σύγχρονες γεννήτριες

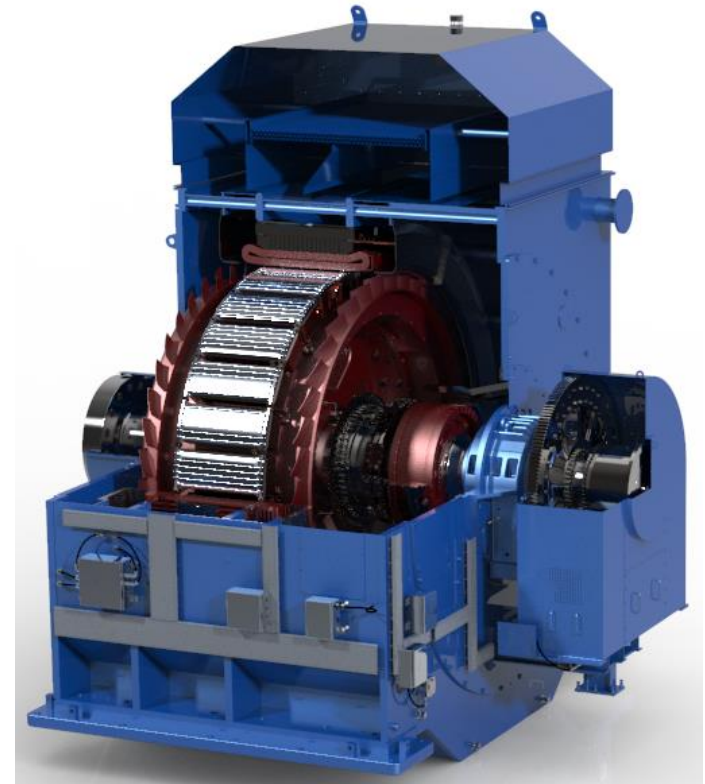




## Σύγχρονοι κινητήρες



*Really tough: WEG's new SM40 synchronous motor with rated power up to 35 MW*



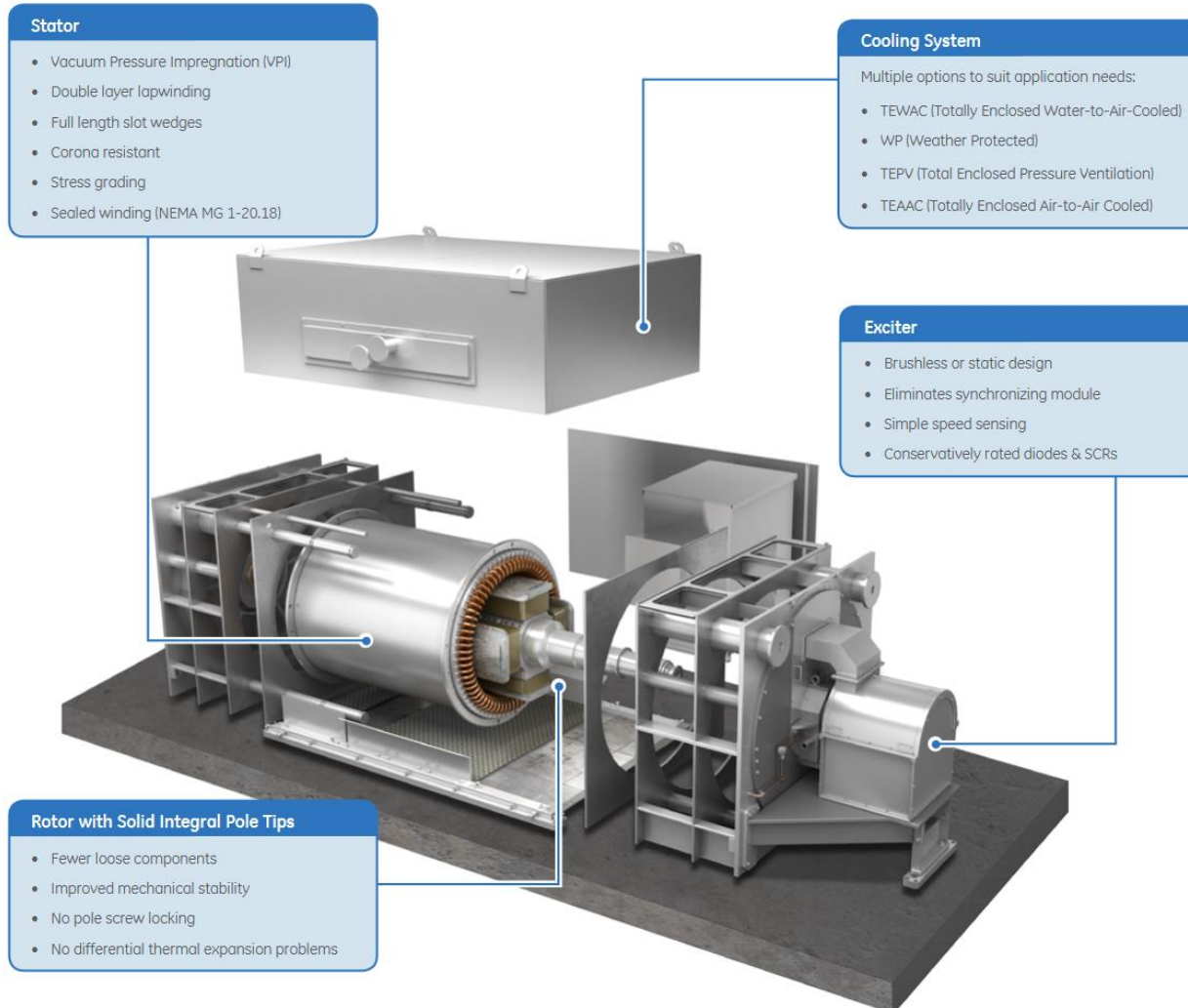


# Σύγχρονοι πυκνωτές

## Core Components

### Innovative Design

GE's Synchronous Condenser system consists of components commonly used in electric utilities and industrial facilities, with proven robustness and reliability.





## Σύγχρονες μηχανές – γενική αρχή λειτουργίας

- ❑ Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα  $I_f$ .
- ❑ Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα δρομέα περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_m$ .
- ❑ Το μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται με την ίδια, **σύγχρονη**, ταχύτητα  $\omega_s = \omega_m$ .





## Σύγχρονες μηχανές – γενικά χαρακτηριστικά

- ❑ Σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής:  $n = \frac{120f}{P}$ 
  - Για σύνδεση σε ηλεκτρικό δίκτυο σταθερής συχνότητας
  - Σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
  - Μέχρι την ροπή αποσυγχρονισμού
  
- ❑ Δεν αναπτύσσουν ροπή εκκίνησης από ακινησία ( $n = 0$ )
  - Εκκίνηση με άλλο τρόπο (ως κινητήρας επαγωγής)

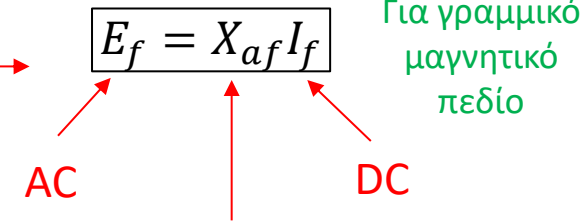


## Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα - λειτουργία εν κενώ

- ΗΕΔ επαγόμενη στο στάτη από το πεδίο διέγερσης (ενεργός τιμή):

$$E_f = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} k_w N_a \Phi_f$$

(ΗΕΔ ή τάση διέγερσης)



όπου

$k_w$  ο συντελεστής τυλίγματος στάτη,

$N_a$  ο εν σειρά αριθμός ελιγμάτων ανά φάση του στάτη,

$\Phi_f$  η μαγνητική ροή ανά πόλο που οφείλεται στο δρομέα:  $\Phi_f = \frac{4}{P} r l \mu_0 \frac{F}{g}$

$F$  η μέγιστη τιμή του κύματος ΜΕΔ του δρομέα:  $F = \frac{4}{\pi} k_r \frac{N_r}{P} I_f$

$k_r$  ο συντελεστής τυλίγματος δρομέα,

$N_r$  ο εν σειρά αριθμός ελιγμάτων του δρομέα





## Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα - λειτουργία υπό φορτίο

- HEΔ επαγόμενη στο στάτη από το πεδίο τυμπάνου (ενεργός τιμή):

$$E_{\alpha} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} k_w N_a \Phi_{\alpha} \quad \xrightarrow{\text{(HEΔ ή τάση αντίδρασης)}} \quad E_{\alpha} = X_a I_{\alpha}$$

όπου

$$\hat{E}_{\alpha} = -jX_a \hat{I}_{\alpha}$$

γεννήτρια

$$\hat{E}_{\alpha} = jX_a \hat{I}_m$$

κινητήρας

$\Phi_{\alpha}$  η μαγνητική ροή ανά πόλο που οφείλεται στο στάτη:  $\Phi_{\alpha} = \frac{4}{P} r l \mu_0 \frac{A}{g}$

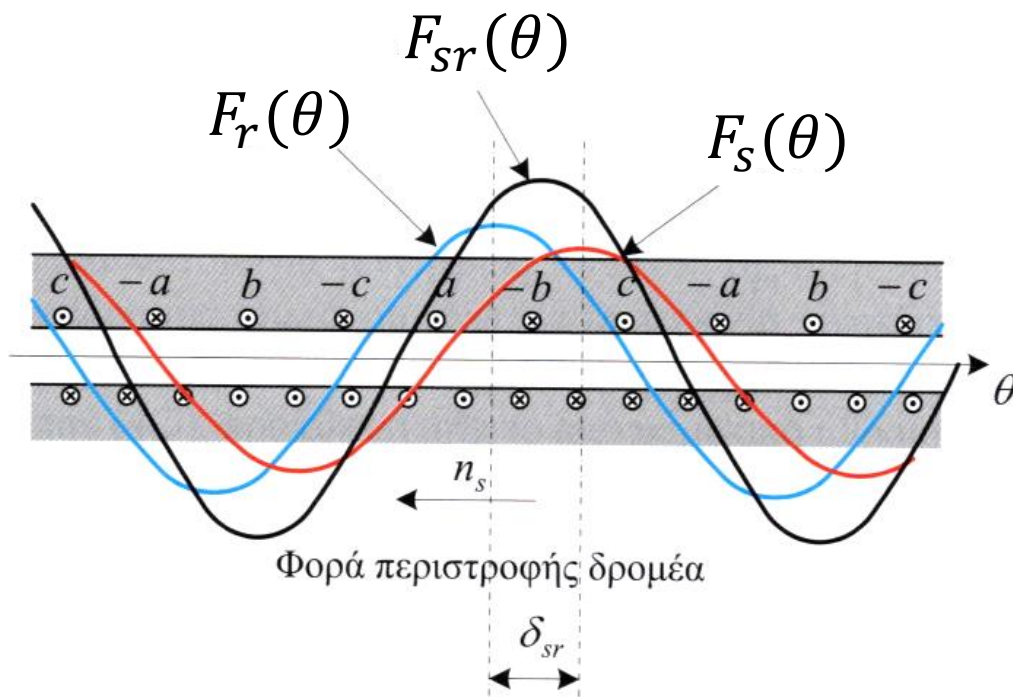
A η μέγιστη τιμή του κύματος ΜΕΔ τυμπάνου:  $A = \frac{3}{2} F_m = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_a}{P} \sqrt{2} I_a$

- Μαγνητίζουσα αντίδραση τυμπάνου (ανά φάση):

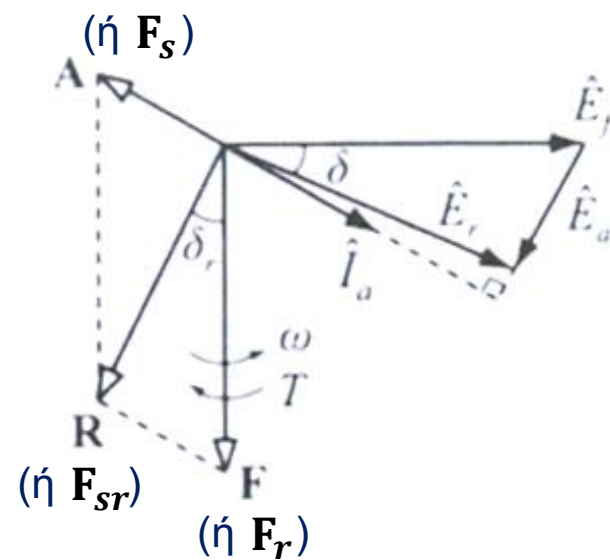
$$X_{\alpha} = \frac{3}{2} \omega L_{a\alpha} = \frac{3}{2} \omega \left[ \frac{\mu_0 \pi r l}{g} \left( \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_a}{P} \right)^2 \right]$$

όπου  $L_{a\alpha}$  η αυτεπαγωγή μαγνήτισης της μίας φάσης στάτη.

# Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – ΜΕΔ



Κύματα ΜΕΔ



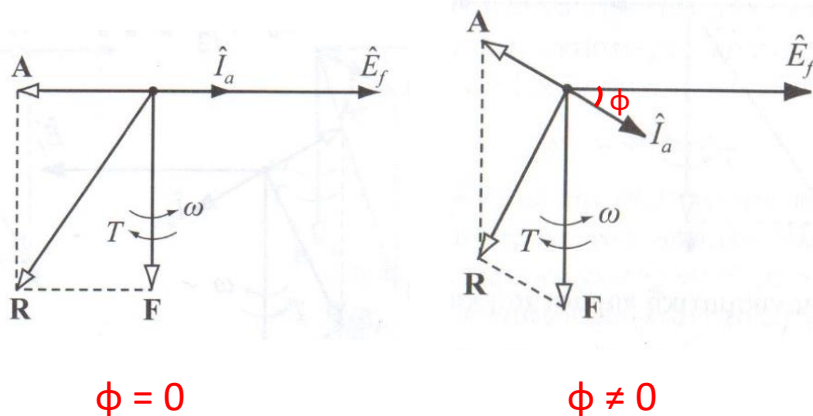
Διανύσματα χώρου ΜΕΔ

# Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – συνιστάμενη ΗΕΔ

- ΗΕΔ επαγόμενη στο στάτη από το συνιστάμενο πεδίο:  $\mathbf{R} = \mathbf{F} + \mathbf{A}$   
 (Για γραμμικό μαγνητικό κύκλωμα μηχανής)

## Σύγχρονη γεννήτρια ( $T < 0$ )

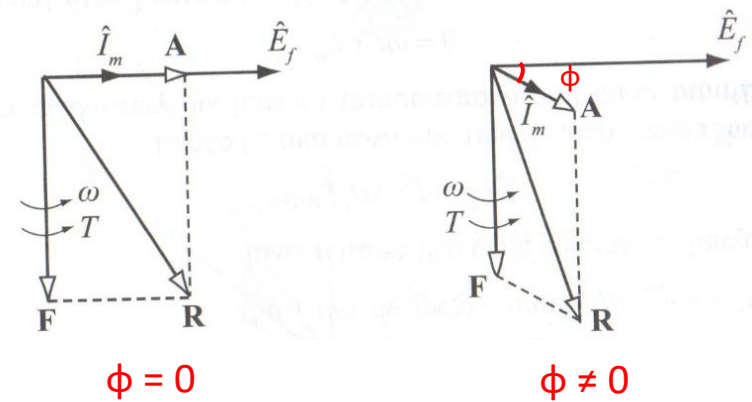
$$\hat{E}_r = \hat{E}_f + \hat{E}_a = \hat{E}_f - jX_a \hat{I}_a$$



## Σύγχρονος κινητήρας ( $T > 0$ )

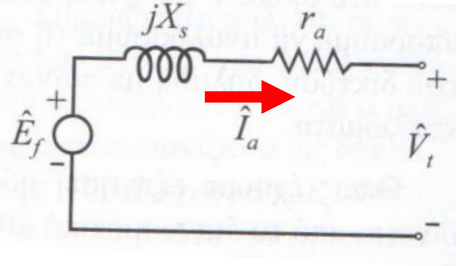
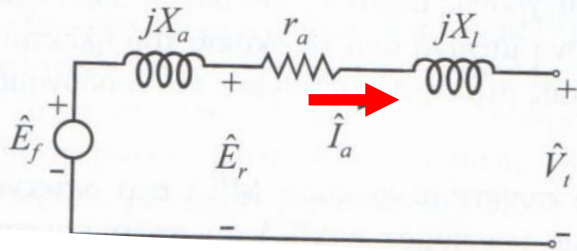
$$\hat{E}_r = \hat{E}_f + \hat{E}_a = \hat{E}_f + jX_a \hat{I}_m$$

$$\hat{I}_m = -\hat{I}_a$$

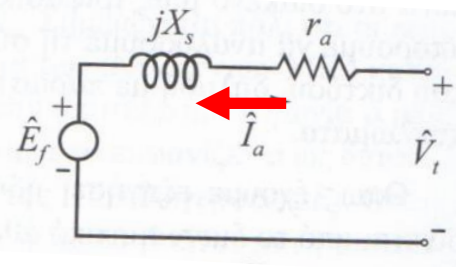
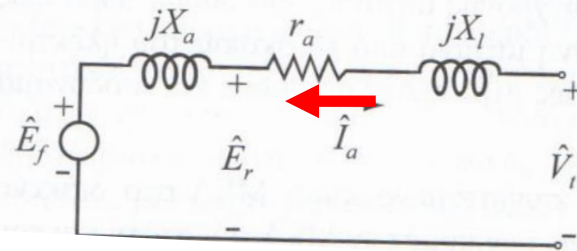




## Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα



Σύμβαση γεννήτριας:  
 $\hat{I}_a$  εξερχόμενο ή  $\hat{I}_a > 0$



Σύμβαση κινητήρα:  
 $\hat{I}_a$  εισερχόμενο ή  $\hat{I}_a < 0$

$$\hat{E}_f = \hat{V}_t + (r_a + jX_a + jX_l)\hat{I}_a \longrightarrow \boxed{\hat{E}_f = \hat{V}_t + (r_a + jX_s)\hat{I}_a}$$

Ισχύει για φυσικά  
ή αμ μεγέθη

όπου  $X_l$  η αντίδραση σκέδασης και  $X_s = X_a + X_l$  η σύγχρονη αντίδραση της μηχανής (ανά φάση).



## Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα

$$\hat{E}_f = \hat{V}_t + (r_a + jX_s)\hat{I}_a \quad \textcircled{1}$$

3 μιγαδικά μεγέθη	$\hat{E}_f, \hat{V}_t, \hat{I}_a$
2 πραγματικές εξισώσεις	$Re \textcircled{1}, Im \textcircled{1}$
5 πραγματικές μεταβλητές	$E_f, V_t, I_a, \delta, \theta$ ( $\hat{V}_t = V_t \angle 0$ )



## Σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα - παραγόμενη ισχύς

$$S = P + jQ = \hat{V}_t \hat{I}_a^* \quad (pu)$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{V}_t = V_t \angle 0 = V_t + j0 \\ \hat{E}_f = E_f (\cos\delta + j\sin\delta) \end{array} \right\} \xrightarrow{r_a = 0} \hat{I}_a = \frac{\hat{E}_f - \hat{V}_t}{jX_s} = \frac{(E_f \cos\delta - V_t) + jE_f \sin\delta}{jX_s} \longrightarrow$$

$$S = V_t \frac{(E_f \cos\delta - V_t) - jE_f \sin\delta}{-jX_s} = \frac{V_t E_f \sin\delta}{X_s} + j \frac{V_t E_f \cos\delta - V_t^2}{X_s} \longrightarrow$$

$$P = \frac{V_t E_f \sin\delta}{X_s} \quad (pu)$$

$$Q = \frac{V_t E_f \cos\delta - V_t^2}{X_s} \quad (pu)$$

ή

$$P_{3\varphi} = 3 \frac{V_{t\varphi} E_{f\varphi} \sin\delta}{X_s} \quad (W)$$

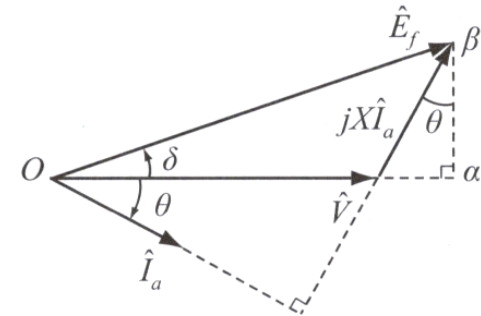
$$Q_{3\varphi} = 3 \frac{V_{t\varphi} E_{f\varphi} \cos\delta - V_{t\varphi}^2}{X_s} \quad (Var)$$



## Καταστάσεις λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας κ.δ.

### Επαγωγική φόρτιση (υπερδιέγερση)

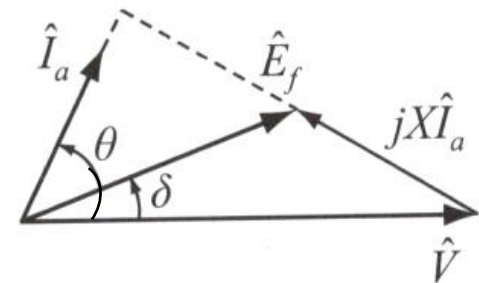
- Παράγει ενεργό ισχύ  $P > 0$
- Παράγει άεργο ισχύ  $Q > 0$
- Ο φασιθέτης  $\hat{E}_f$  προηγείται του  $\hat{V}_t$  ( $\delta > 0$ )
- $E_f > V_t$



$$r_a = 0$$

### Χωρητική φόρτιση (υποδιέγερση)

- Παράγει ενεργό ισχύ  $P > 0$
- Απορροφά άεργο ισχύ  $Q < 0$
- Ο φασιθέτης  $\hat{E}_f$  προηγείται του  $\hat{V}_t$  ( $\delta > 0$ )
- $E_f > < = V_t$



Σύνδεση σε άπειρο ζυγό:  $V_t = V =$  σταθερή κατά μέτρο και γωνία &  $f =$  σταθερή

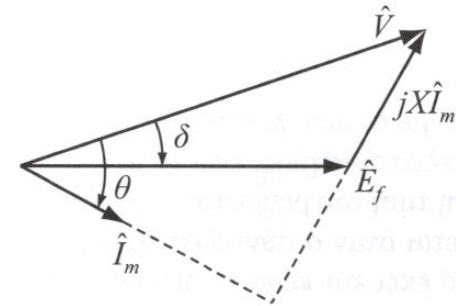




# Καταστάσεις λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα κ.δ.

## Επαγωγική συμπεριφορά (υποδιέγερση)

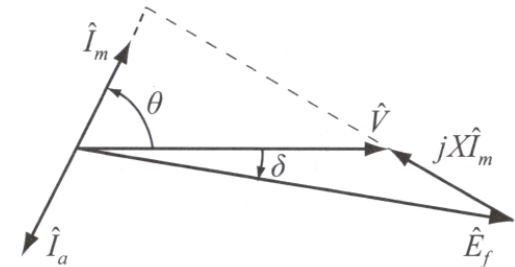
- Απορροφά ενεργό ισχύ  $P < 0$
- Απορροφά άεργο ισχύ  $Q < 0$
- Ο φασιθέτης  $\hat{E}_f$  έπεται του  $\hat{V}_t$  ( $\delta < 0$ )
- $E_f > < = V_t$



$$r_a = 0$$

## Χωρητική συμπεριφορά (υπερδιέγερση)

- Απορροφά ενεργό ισχύ  $P < 0$
- Παράγει άεργο ισχύ  $Q > 0$
- Ο φασιθέτης  $\hat{E}_f$  έπεται του  $\hat{V}_t$  ( $\delta < 0$ )
- $E_f > < = V_t$

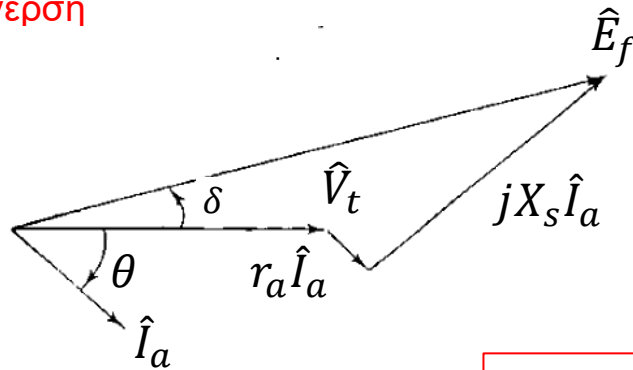


Σύνδεση σε άπειρο ζυγό:  $V_t = V =$  σταθερή κατά μέτρο και γωνία &  $f =$  σταθερή



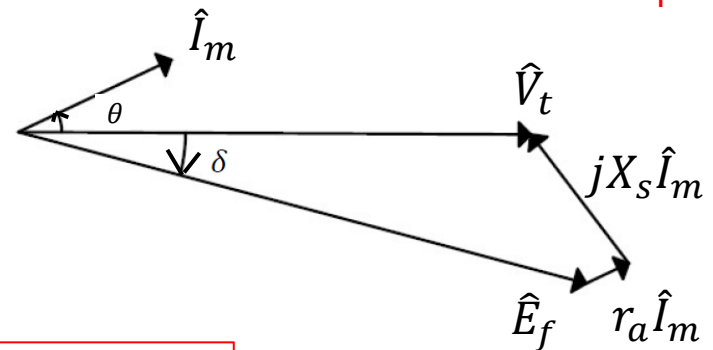
# Καταστάσεις λειτουργίας με αντίσταση $r_a$

Υπερδιέγερση



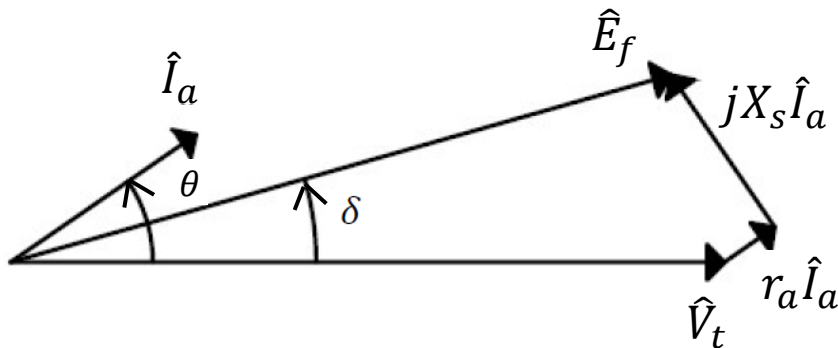
Γεννήτρια

Υπερδιέγερση



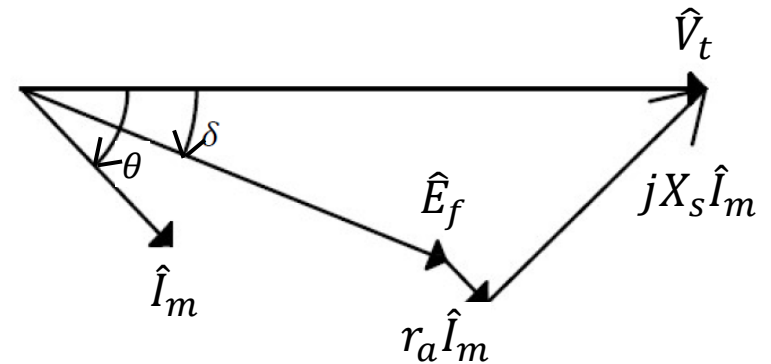
Κινητήρας

Υποδιέγερση



$$\hat{E}_f = \hat{V}_t + (r_a + jX_s)\hat{I}_a$$

Υποδιέγερση

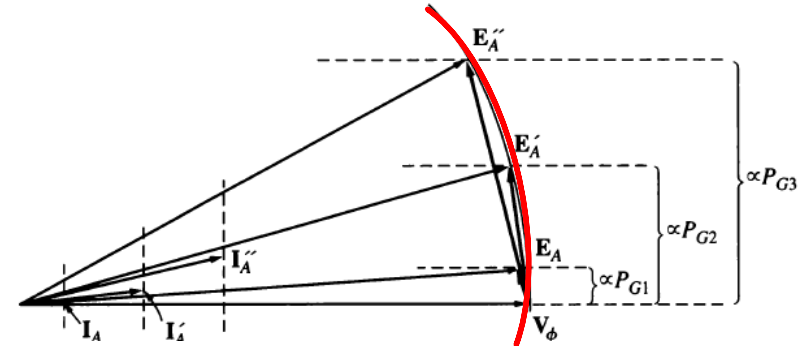


$$\hat{V}_t = \hat{E}_f + (r_a + jX_s)\hat{I}_m$$



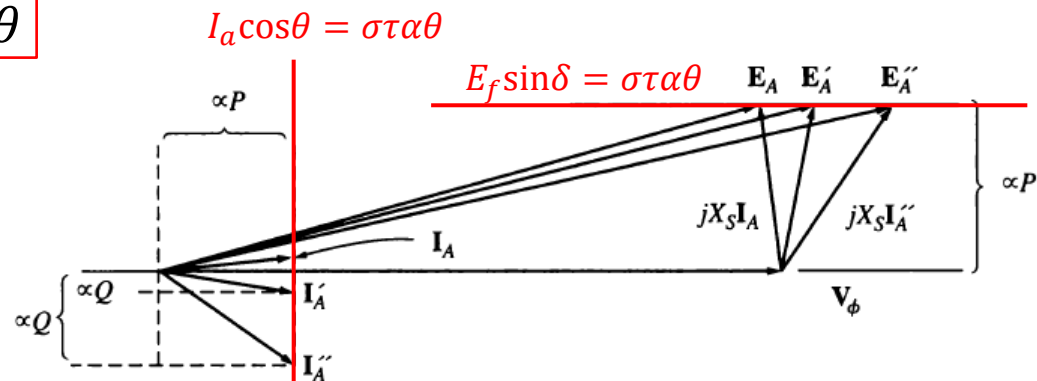
# Διασυνδεδεμένη λειτουργία σε δίκτυο (άπειρος ζυγός)

- Αύξηση της  $\delta$  με σταθερή  $E_f$ 
  - => Αύξηση της  $P$
  - Ρυθμιστής Στροφών



$$r_a = 0$$

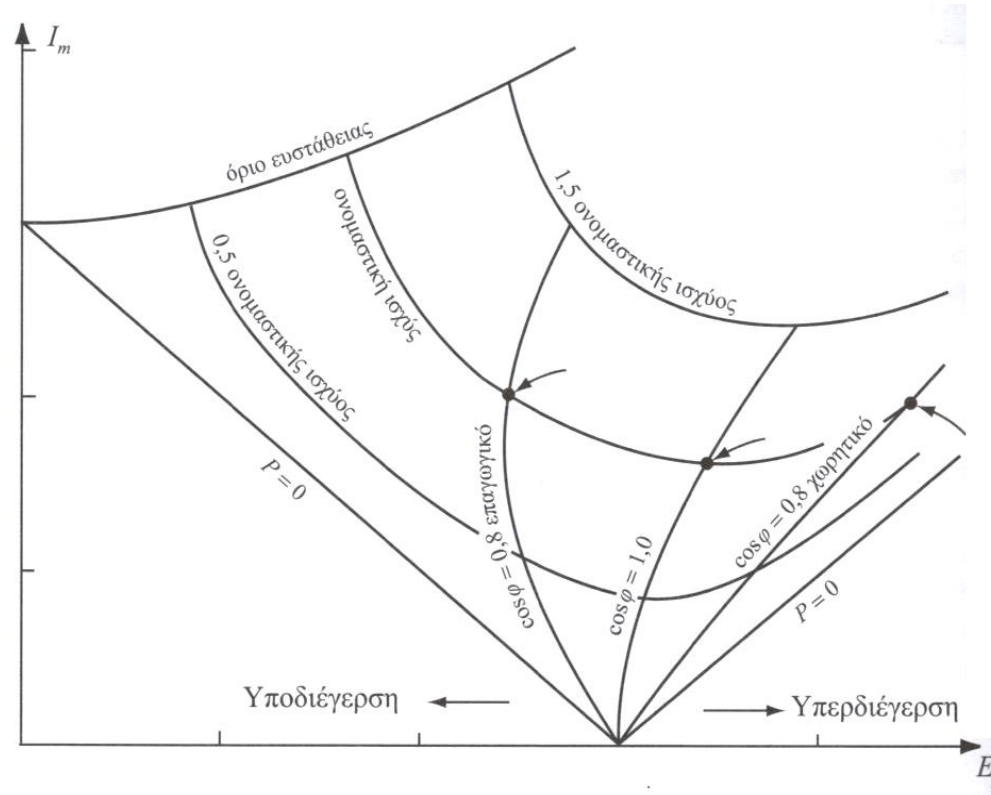
- Μεταβολή της  $E_f$  με σταθερή μηχανική ισχύ εισόδου =>
  - $P, V_t$  σταθερά =>  $E_f \sin \delta = \text{σταθ}$



- Αύξηση της  $Q$  με αύξηση της  $E_f$  (αυτόματος ρυθμιστής τάσης)



# Καμπύλες $V$ σύγχρονου κινητήρα





# Ροπή / ισχύς σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα

$$T_m = |T_e| + T_{\alpha\pi} \quad (\text{Ισοζύγιο για σύγχρονη γεννήτρια})$$

$$|T_m| = T_e - T_{\alpha\pi} \quad (\text{Ισοζύγιο για σύγχρονο κινητήρα})$$

$$T = P = \frac{V_{t,pu} E_{f,pu}}{X_{s,pu}} \sin\delta \quad (\text{Ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ή εσωτερική ροπή})$$

$$T = T_B \frac{V_{t,pu} E_{f,pu}}{X_{s,pu}} \sin\delta \quad (\text{Ηλεκτρομαγνητική ή εσωτερική ροπή σε Nm})$$

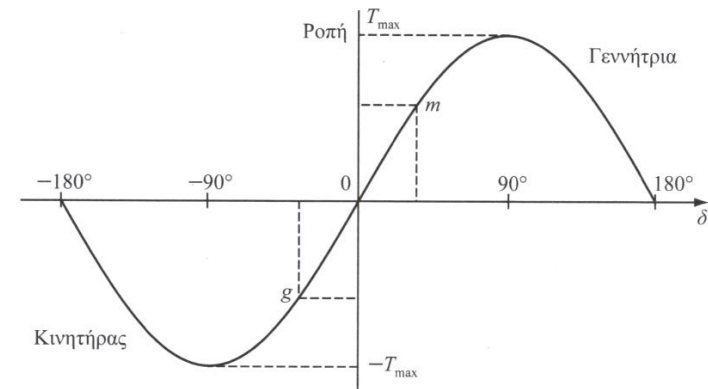
$$T_B = \frac{P_B}{\omega_s} = \frac{P_B}{\frac{\omega}{P/2}} \quad (\text{Βάση ροπής})$$

$$T_{max} = T_B \frac{V_{t,pu} E_{f,pu}}{X_{s,pu}} \quad (\text{Ροπή αποσυγχρονισμού})$$

$$P_{max} = \frac{V_{t,pu} E_{f,pu}}{X_{s,pu}} \quad (\text{Ισχύς αποσυγχρονισμού})$$

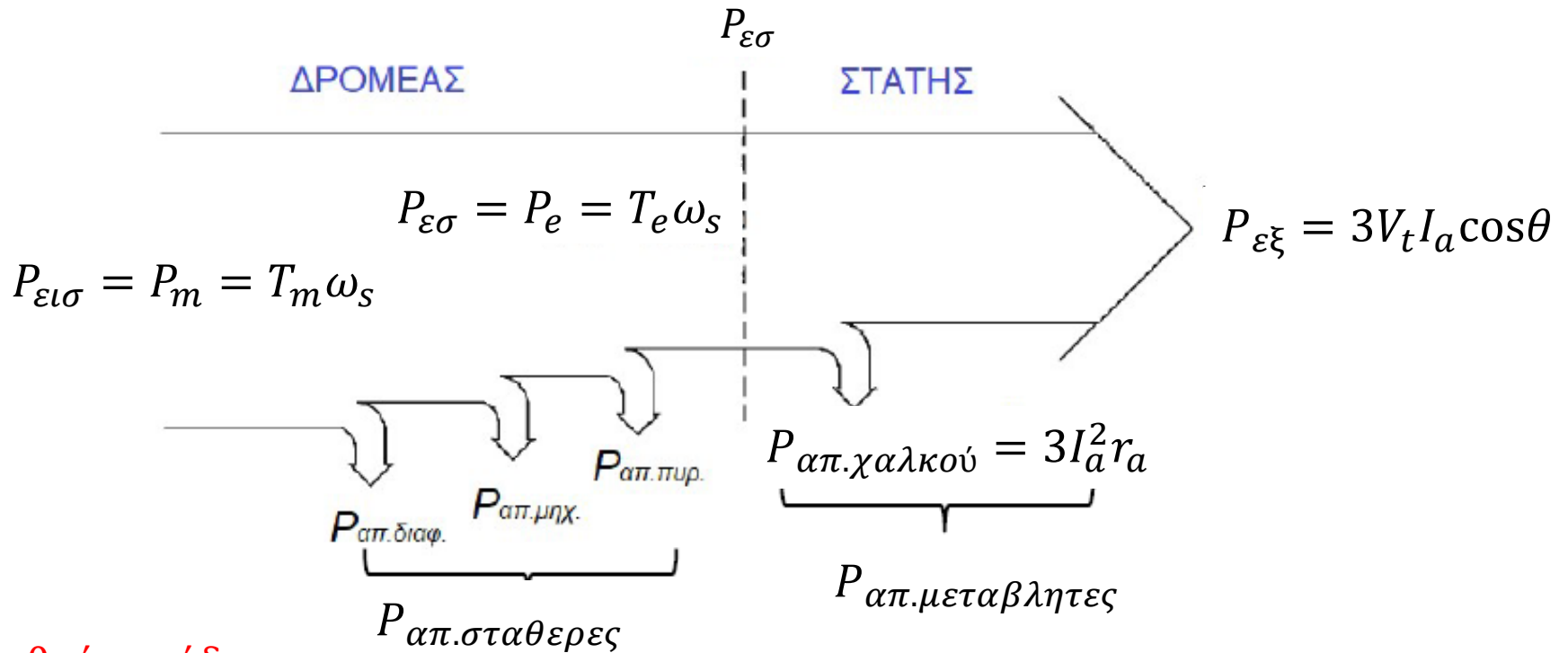
$$P_m = T_m \omega_s$$
$$P_e = T_e \omega_s$$

(Φυσικές μονάδες)





# Βαθμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας



Βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_{\epsilon\xi}}{P_{\epsilon\iota\sigma}} = \frac{P_{\epsilon\xi}}{P_{\epsilon\xi} + P_{\text{απ.σταθερες}} + P_{\text{απ.μεταβλητες}}}$$

Βέλτιστος βαθμός απόδοσης:

$$P_{\text{απ.σταθερες}} = P_{\text{απ.μεταβλητες}}$$