



Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

8. Σύγχρονες μηχανές

Βασίλης Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής



Σύγχρονες μηχανές

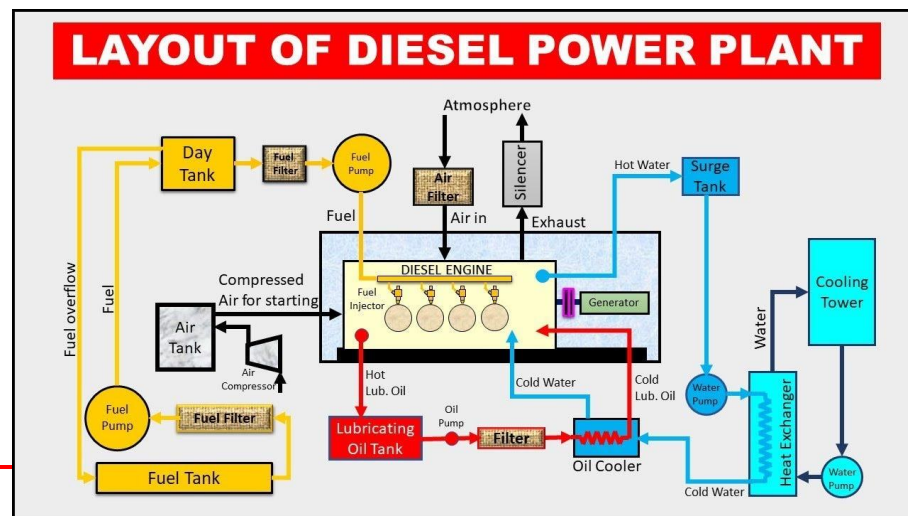
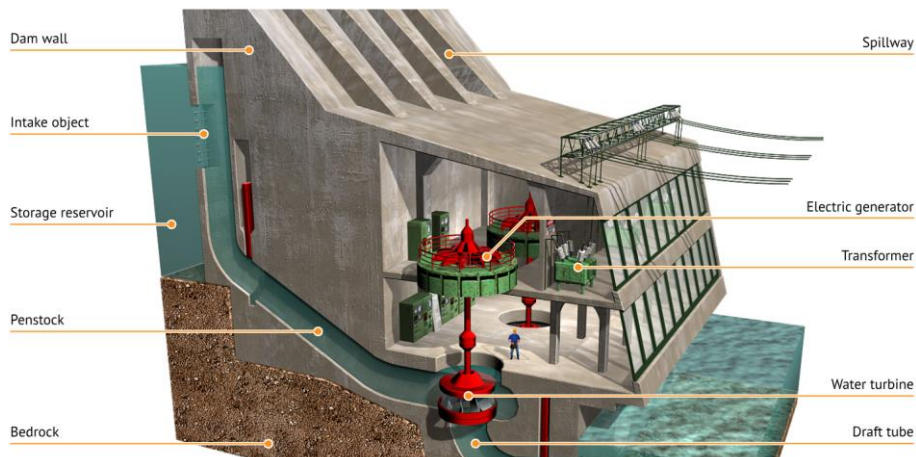
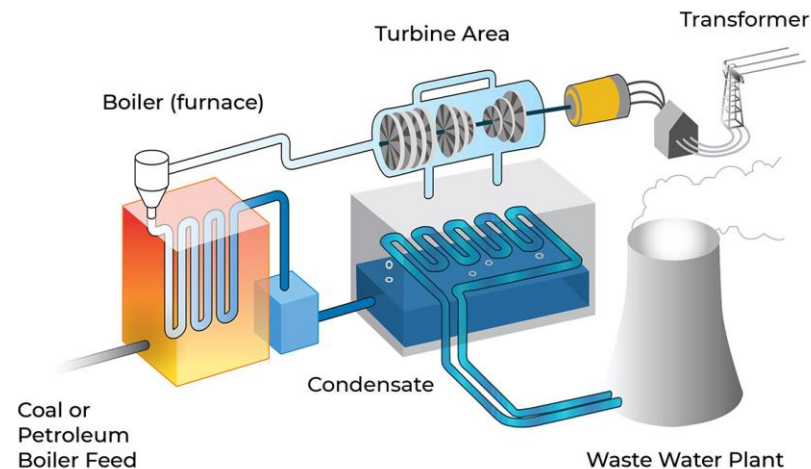
- ❑ Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας επιτυγχάνεται στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων μεγεθών.

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

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

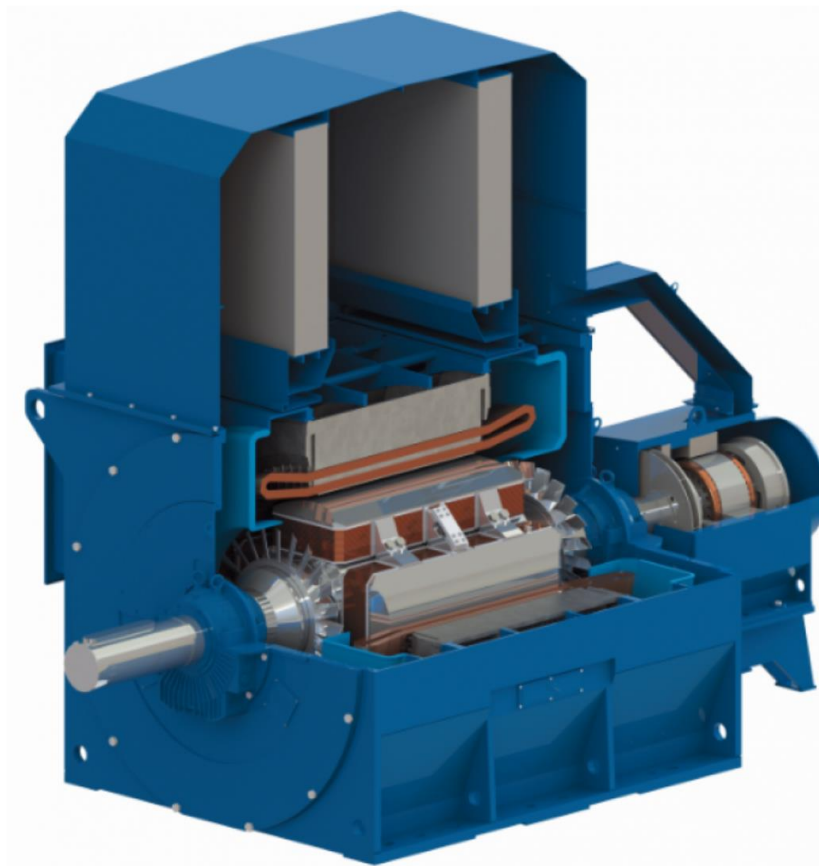


Σύγχρονες γεννήτριες

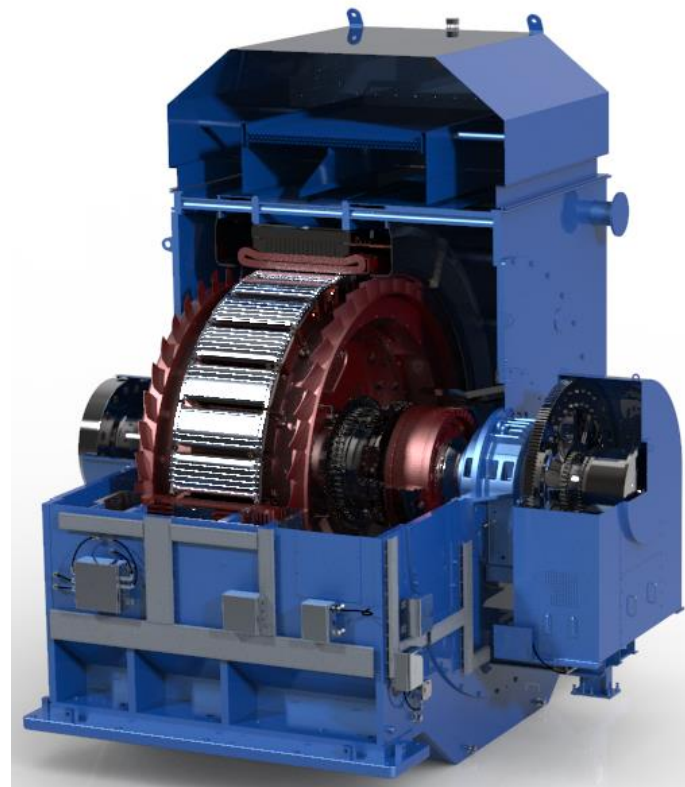




Σύγχρονοι κινητήρες



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



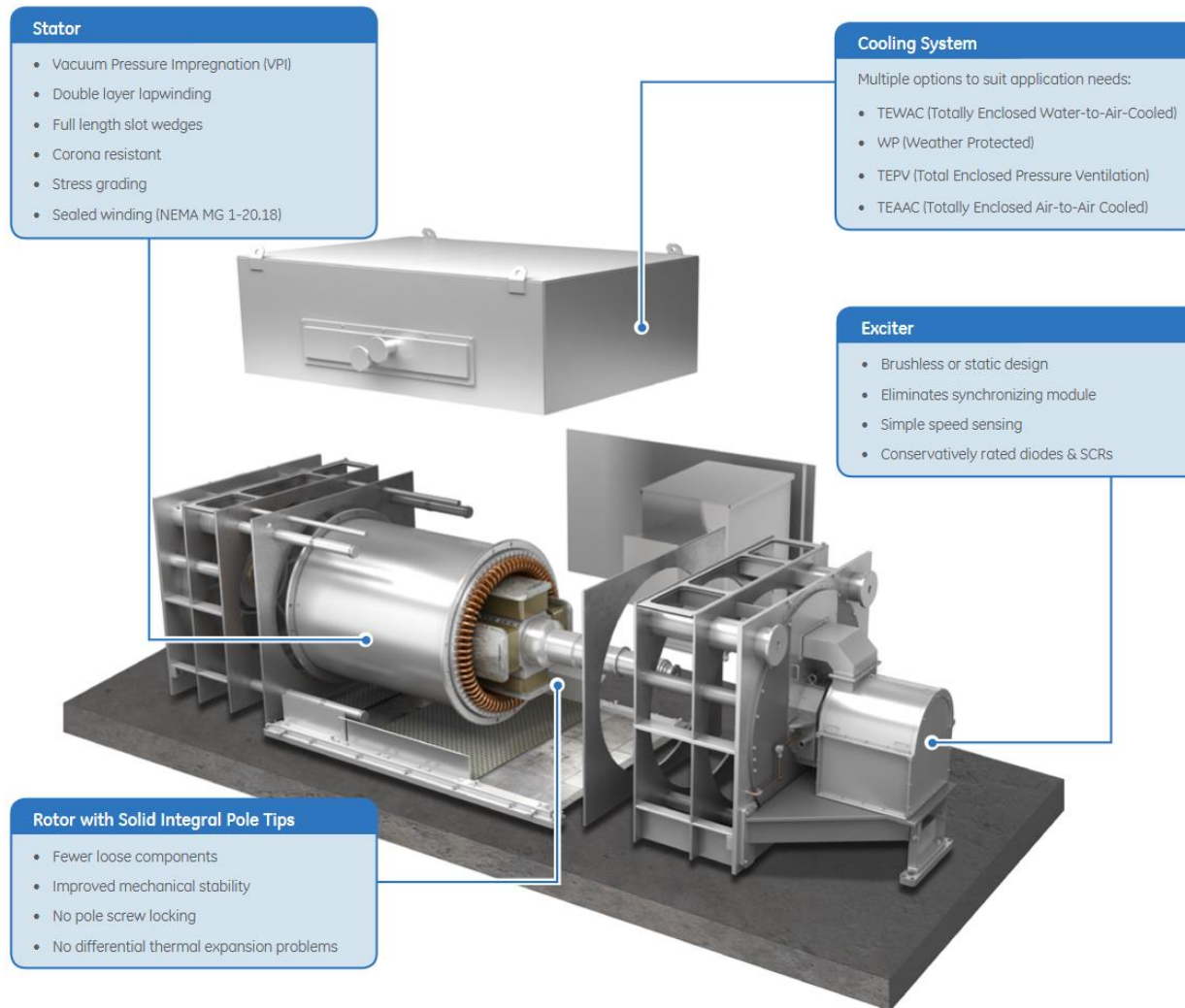


Σύγχρονοι πυκνωτές

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 ω_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)

$$E_f = X_{af} I_f$$

Για γραμμικό
μαγνητικό
πεδίο

AC

DC

Συντελεστής εξαρτώμενος από
τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

όπου

k_w ο συντελεστής τυλίγματος στάτη,

N_a ο εν σειρά αριθμός ελιγμάτων ανά φάση του στάτη,

Φ_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):

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

όπου

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

γεννήτρια

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

κινητήρας

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

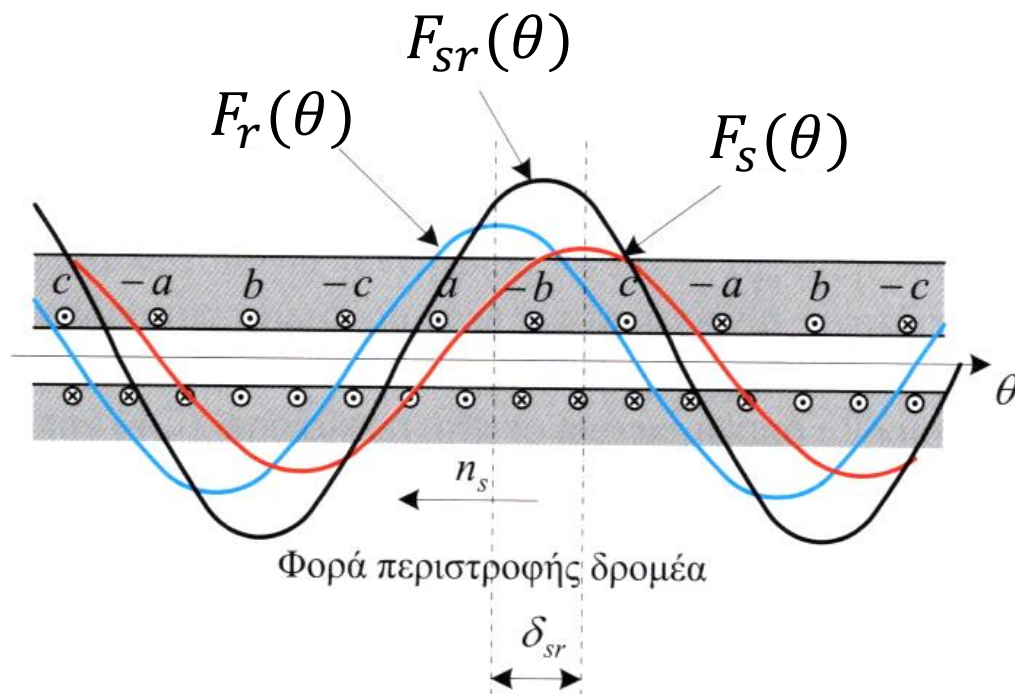
A η μέγιστη τιμή του κύματος ΜΕΔ τυμπάνου: $A = \frac{3}{2} F_m = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_a}{P} \sqrt{2} I_a$

- Μαγνητίζουσα αντίδραση τυμπάνου (ανά φάση):

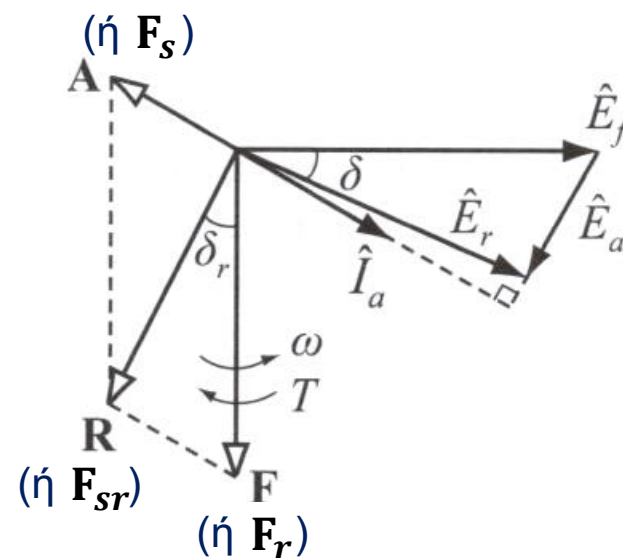
$$X_{\alpha} = \frac{3}{2} \omega L_{a\alpha} = \frac{3}{2} \omega \left[\frac{\mu_0 \pi r l}{g} \left(\frac{4}{\pi} k_w \frac{N_a}{P} \right)^2 \right]$$

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

Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – ΜΕΔ



Κύματα ΜΕΔ



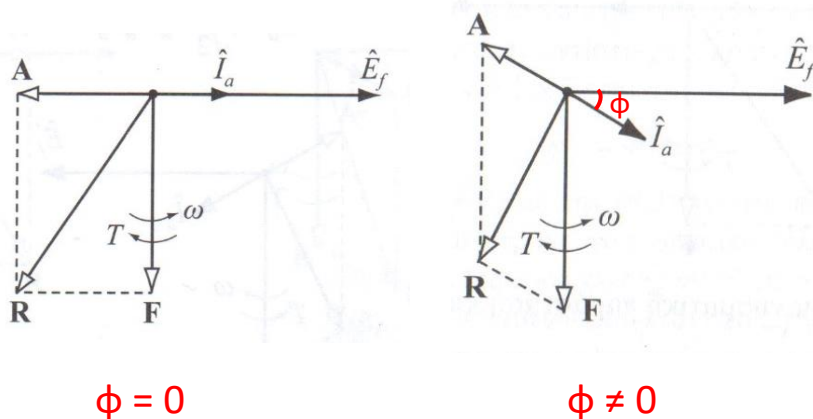
Διανύσματα χώρου ΜΕΔ

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 ($T < 0$)

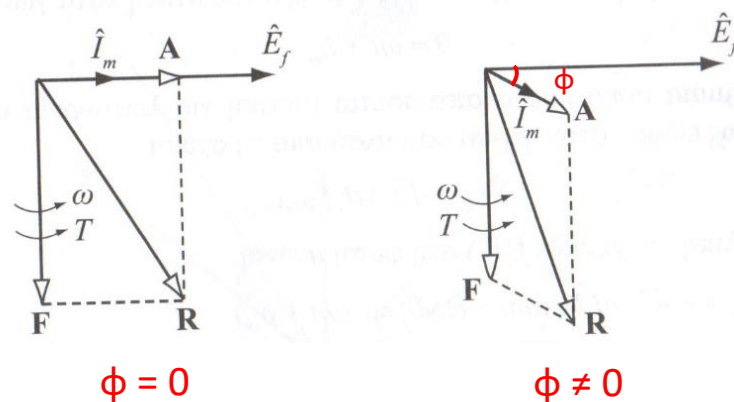
$$\hat{E}_r = \hat{E}_f + \hat{E}_a = \hat{E}_f - jX_a \hat{I}_a$$



Σύγχρονος κινητήρας ($T > 0$)

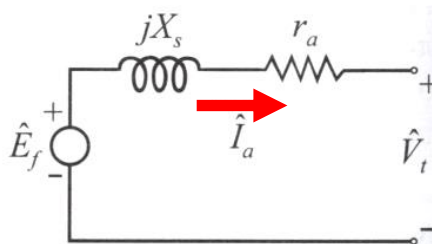
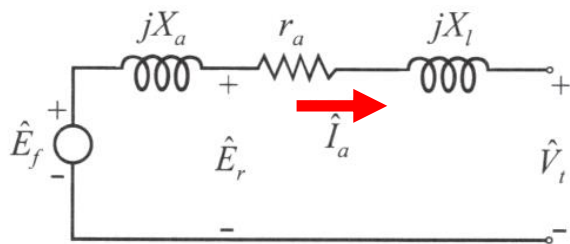
$$\hat{E}_r = \hat{E}_f + \hat{E}_a = \hat{E}_f + jX_a \hat{I}_m$$

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

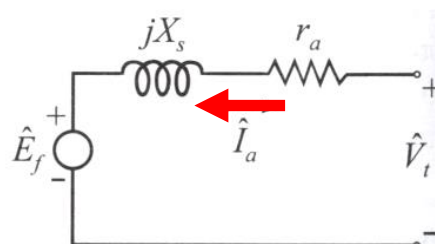
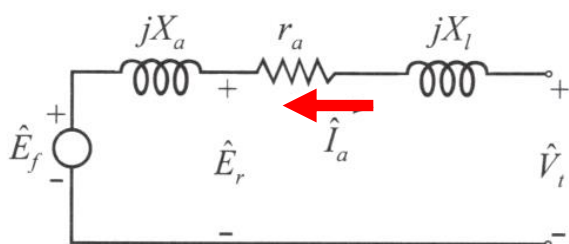




Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα – ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα



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

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

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



Σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα - παραγόμενη ισχύς

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

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

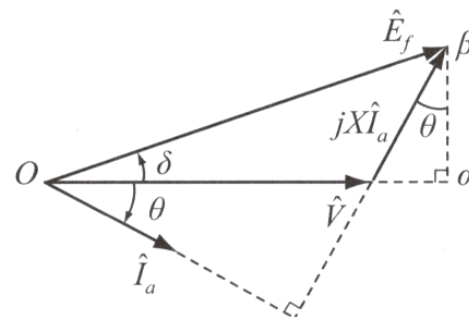
$$S = V_t \frac{(E_f \cos\delta - V_t) - jE_f \sin\delta}{-jX_s} = \frac{V_t E_f \sin\delta}{X_s} + j \frac{V_t E_f \cos\delta - V_t^2}{X_s} \quad \longrightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{V_t E_f \sin\delta}{X_s} \quad (\alpha\mu) \\ Q = \frac{V_t E_f \cos\delta - V_t^2}{X_s} \quad (\alpha\mu) \end{array} \right\} \quad \text{ή} \quad \left. \begin{array}{l} P_{3\phi} = 3 \frac{V_{t\phi} E_{f\phi} \sin\delta}{X_s} \quad (W) \\ Q_{3\phi} = 3 \frac{V_{t\phi} E_{f\phi} \cos\delta - V_{t\phi}^2}{X_s} \quad (Var) \end{array} \right\}$$

Καταστάσεις λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας κ.δ.

Επαγωγική φόρτιση (υπερδιέγερση)

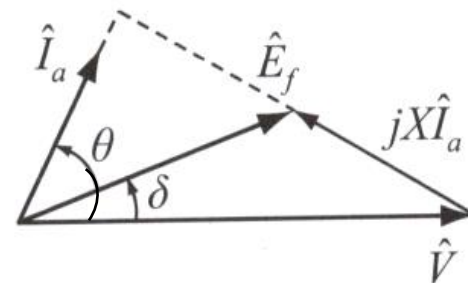
- Παράγει ενεργό ισχύ $P > 0$
- Παράγει άεργο ισχύ $Q > 0$
- Ο φασιθέτης $\hat{E}_f$ προηγείται του $\hat{V}_t$ ($\delta > 0$)
- $E_f > V_t$



$$r_a = 0$$

Χωρητική φόρτιση (υποδιέγερση)

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

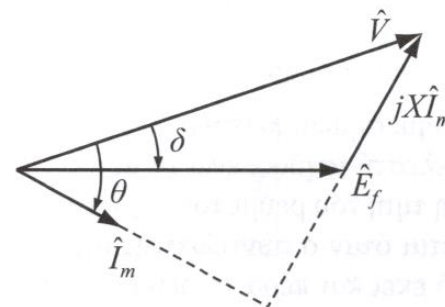


Σύνδεση σε άπειρο ζυγό: $V_t = V =$ σταθερή κατά μέτρο και γωνία & $f =$ σταθερή

Καταστάσεις λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα κ.δ.

Επαγωγική συμπεριφορά (υποδιέγερση)

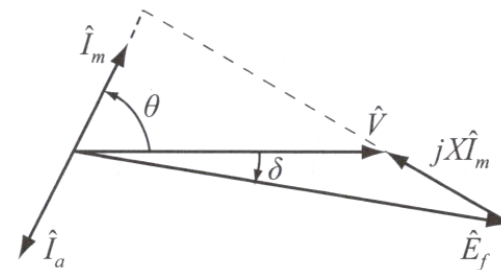
- Απορροφά ενεργό ισχύ $P < 0$
- Απορροφά άεργο ισχύ $Q < 0$
- Ο φασιθέτης $\hat{E}_f$ έπεται του $\hat{V}_t$ ($\delta < 0$)
- $E_f > < = V_t$



$$r_a = 0$$

Χωρητική συμπεριφορά (υπερδιέγερση)

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

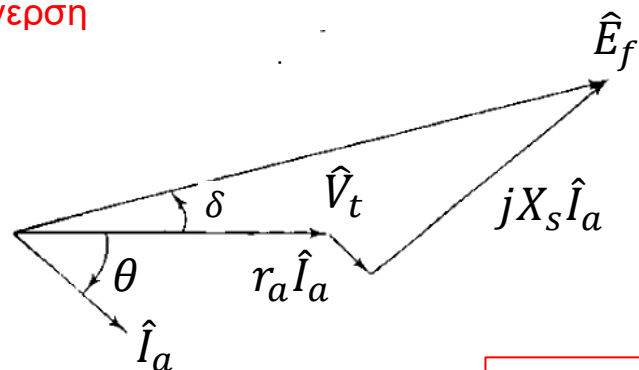


Σύνδεση σε άπειρο ζυγό: $V_t = V =$ σταθερή κατά μέτρο και γωνία & $f =$ σταθερή



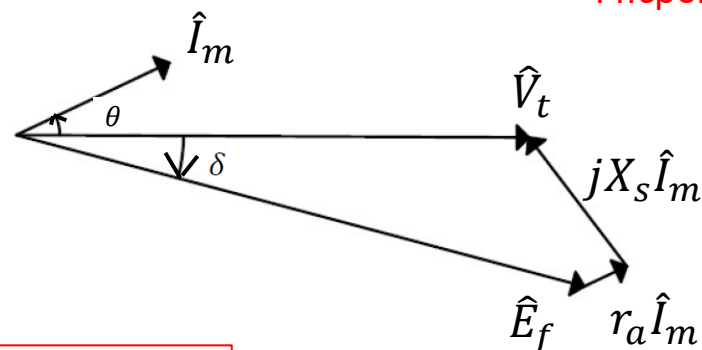
Καταστάσεις λειτουργίας με αντίσταση r_a

Υπερδιέγερση



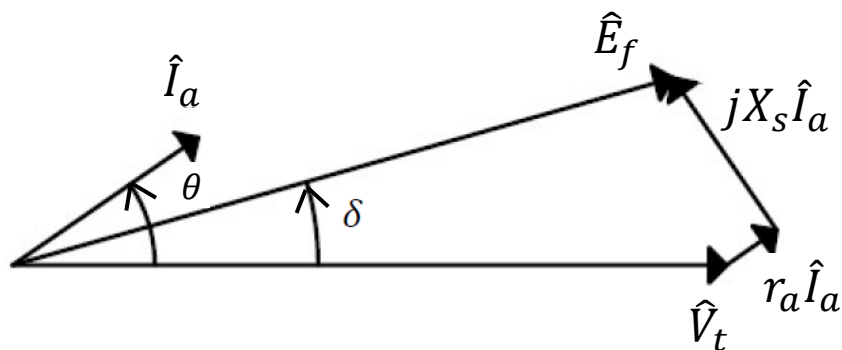
Γεννήτρια

Υπερδιέγερση



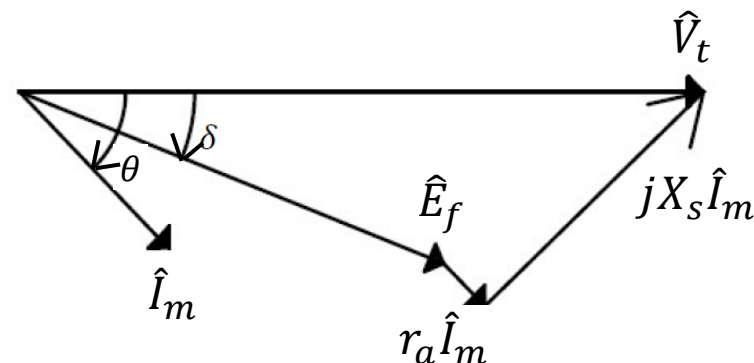
Κινητήρας

Υποδιέγερση



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

Υποδιέγερση



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

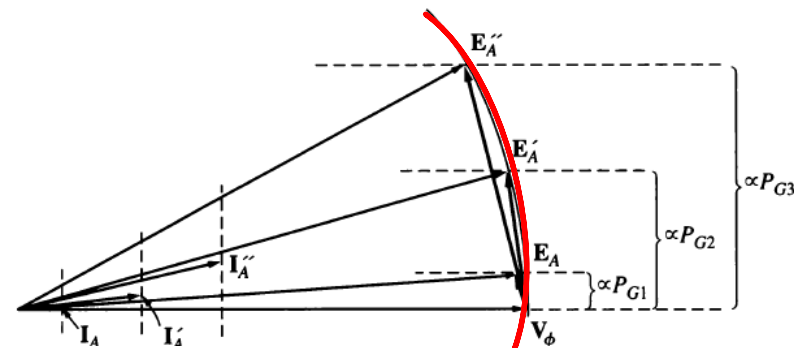


Διασυνδεδεμένη λειτουργία σε δίκτυο (άπειρος ζυγός)

- Αύξηση της δ με σταθερή E_f

=> Αύξηση της P

- Ρυθμιστής Στροφών

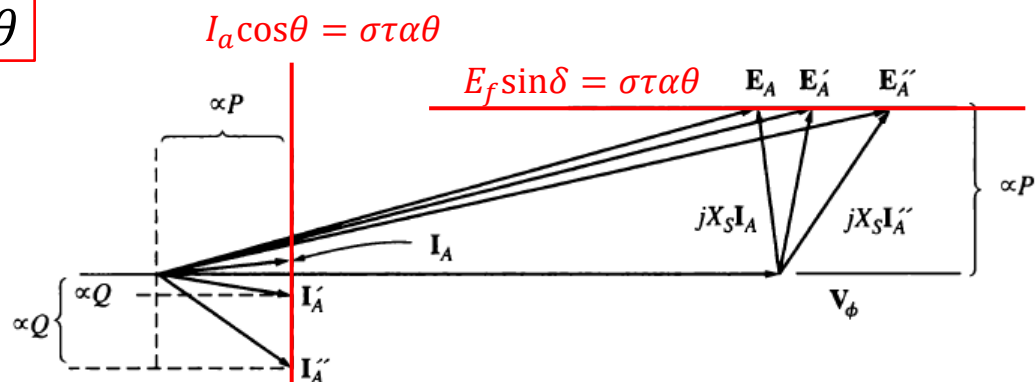


$$r_a = 0$$

- Μεταβολή της E_f με σταθερή μηχανική ισχύ εισόδου =>

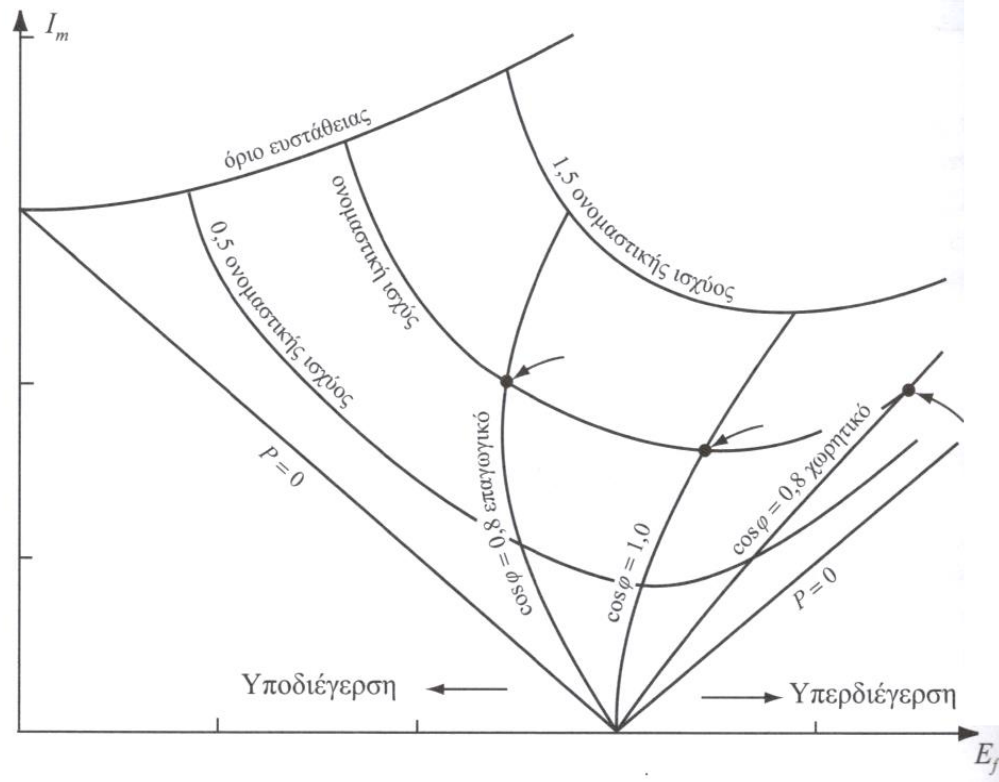
$$P, V_t \text{ σταθερά} \Rightarrow E_f \sin \delta = \text{σταθ}$$

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





Καμπύλες V σύγχρονου κινητήρα





Ροπή / ισχύς σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα

$$T_m = |T_e| + T_{\alpha\pi}$$

(Ισοζύγιο για σύγχρονη γεννήτρια)

$$|T_m| = T_e - T_{\alpha\pi}$$

(Ισοζύγιο για σύγχρονο κινητήρα)

$$P_m = T_m \omega_s$$

$$P_e = T_e \omega_s$$

$$T = P = \frac{V_{t,\alpha\mu} E_{f,\alpha\mu}}{X_{s,\alpha\mu}} \sin\delta$$

(Ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ή εσωτερική ροπή)

$$T = T_B \frac{V_{t,\alpha\mu} E_{f,\alpha\mu}}{X_{s,\alpha\mu}} \sin\delta$$

(Ηλεκτρομαγνητική ή εσωτερική ροπή σε Nm)

$$T_B = \frac{P_B}{\omega_s} = \frac{P_B}{\frac{\omega}{P/2}}$$

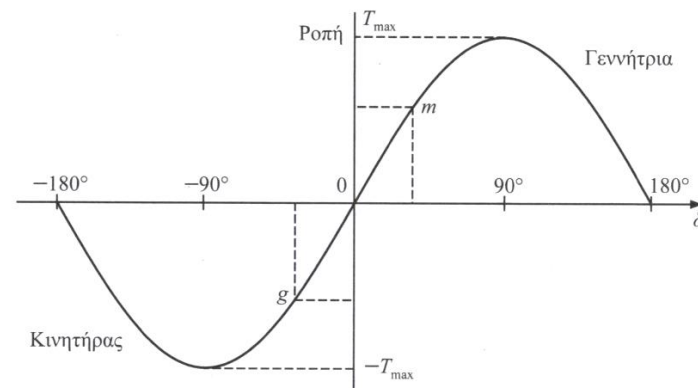
(Βάση ροπής)

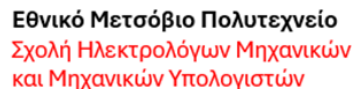
$$T_{max} = T_B \frac{V_{t,\alpha\mu} E_{f,\alpha\mu}}{X_{s,\alpha\mu}}$$

(Ροπή αποσυγχρονισμού)

$$P_{max} = \frac{V_{t,\alpha\mu} E_{f,\alpha\mu}}{X_{s,\alpha\mu}}$$

(Ισχύς αποσυγχρονισμού)





ΔΡΟΜΕΑΣ

ΣΤΑΤΗΣ

$P_{\varepsilon\sigma} = P_e = T_e \omega_s$

$P_m = T_m \omega_s$

$P_{\varepsilon\xi} = 3V_t I_a \cos \theta$

$P_{\alpha\pi.\chiαλκού} = 3I_a^2 r_a$

$P_{\alpha\pi.σταθερες}$

$P_{\alpha\pi.μεταβλητες}$

$$\eta = \frac{P_{\varepsilon\xi}}{P_{\varepsilon\iota\sigma}} = \frac{P_{\varepsilon\xi}}{P_{\varepsilon\xi} + P_{\text{απ.σταθερές}} + P_{\text{απ.μεταβλητές}}}$$
$$P_{\alpha\pi.\sigma\tau\alpha\theta\epsilon\rho\epsilon\varsigma} = P_{\alpha\pi.\mu\epsilon\tau\alpha\beta\lambda\eta\tau\epsilon\varsigma}$$