ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά μαθήματα ΠΠ

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα 4: Η Σύγχρονη Μηχανή

Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Βοβός
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Σημείωμα Αναφοράς

Σημείωμα Αδειοδότησης

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης creative commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΗΕ

- *ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ*

- *ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ*

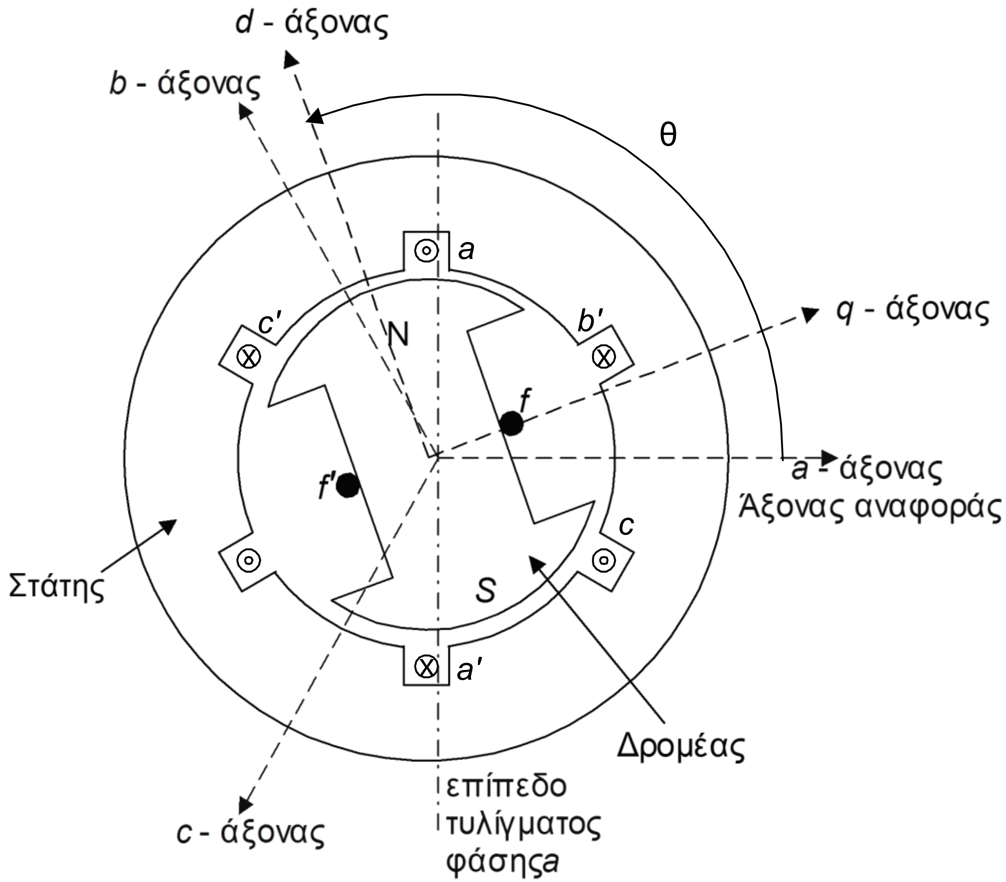
- *ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ*

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

$$\theta = \omega t + \theta_0$$
$$= \omega t + \delta + \frac{\pi}{2}$$

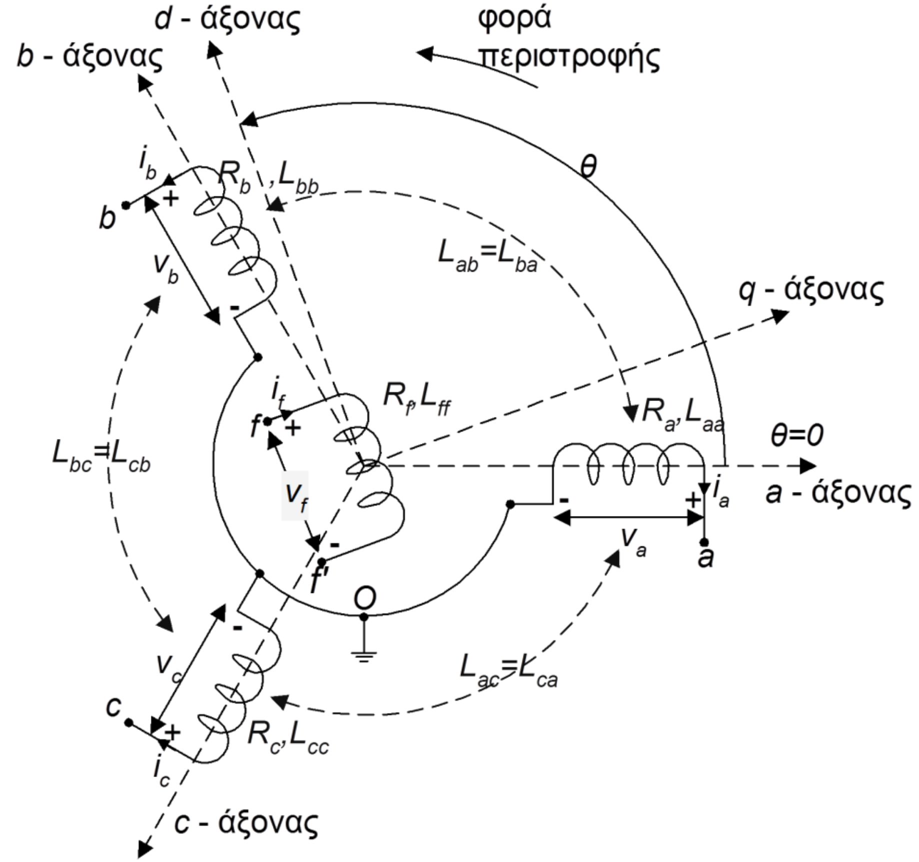
$$f = \frac{P}{2}\frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m$$

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



Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης μηχανής

ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ



ΔΡΟΜΕΑΣ ΜΕ ΕΚΤΥΠΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ: *Ολες οι επαγωγές, εκτός L_{ff}, συναρτήσεις της γωνίας θ.*

ΔΡΟΜΕΑΣ ΧΩΡΙΣ ΕΚΤΥΠΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ: *Ολες οι επαγωγές, εκτός L_{af}, L_{bf}, L_{cf}, σταθερές.*

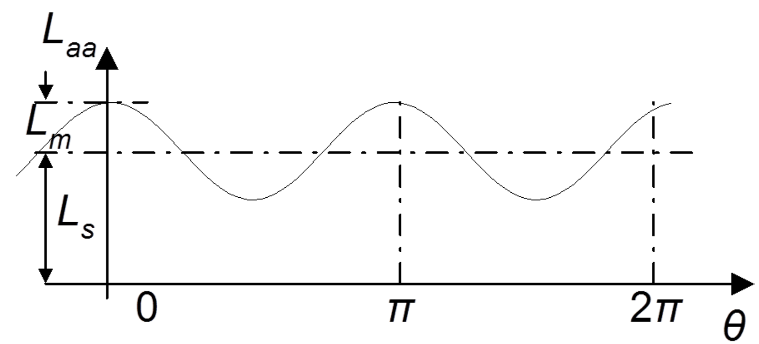
ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta, \qquad L_s > L_m > 0$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

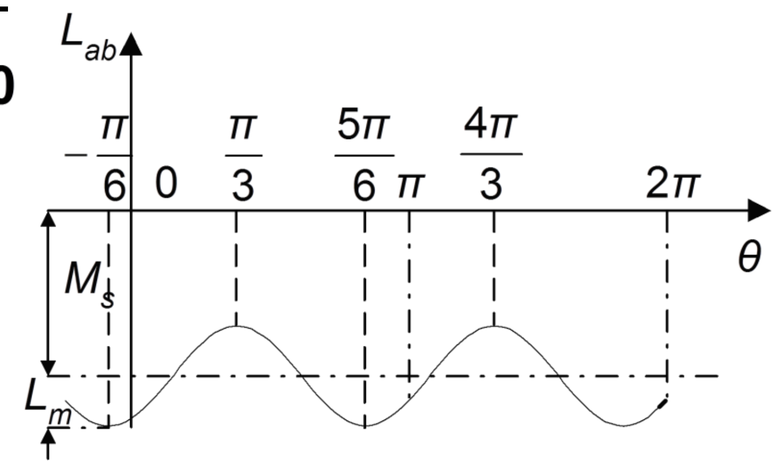


ΑΜΟΙΒΑΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΕΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ

$$L_{ab} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \frac{\pi}{6}), \quad M_s > L_m > 0$$

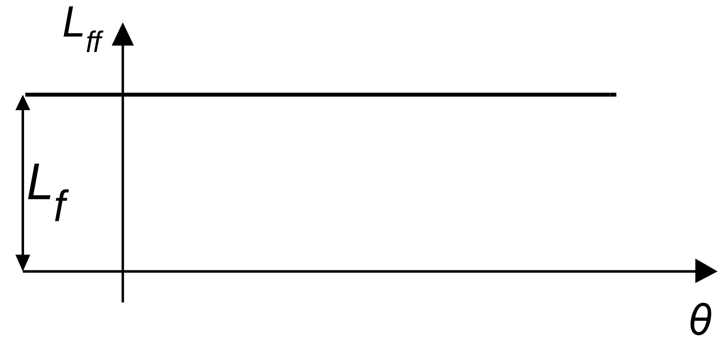
$$L_{bc} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \frac{\pi}{2})$$

$$L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \frac{5\pi}{6})$$



ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΕΑ

$$L_{ff} = L_f$$

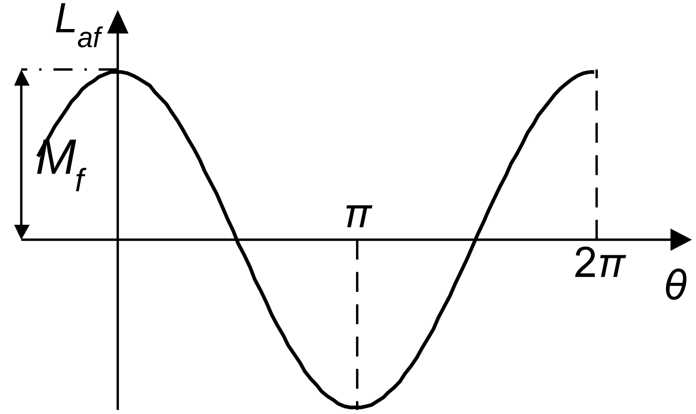


ΑΜΟΙΒΑΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΕΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΕΑ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ

$$L_{af} = M_f \cos\theta$$

$$L_{bf} = M_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cf} = M_f \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) = M_f \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})$$



Για μηχανή με κυλινδρικό δρομέα $L_m = 0$

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

$$v_a = -R_s i_a - \frac{d\lambda_a}{dt}$$

$$v_b = -R_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt}$$

$$v_c = -R_s i_c - \frac{d\lambda_c}{dt}$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

όπου

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f$$

$$\lambda_b = L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c + L_{bf} i_f$$

$$\lambda_c = L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c + L_{cf} i_f$$

$$\lambda_f = L_{fa} i_a + L_{fb} i_b + L_{fc} i_c + L_{ff} i_f$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ \hline -v_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} - \frac{d}{dt}\left\{ \left[\begin{array}{ccc|c} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ \hline L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \right\}$$

$$\boxed{v = -Ri - \frac{d\lambda}{dt} = -Ri - \frac{d}{dt}(L(\theta)i) = -Ri - L(\theta)\frac{di}{dt} - \frac{dL(\theta)}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}i}$$

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PARK

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

όπου

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$i_{dq0} = P i_s$$

$$v_{dq0} = P v_s$$

$$\lambda_{dq0} = P \lambda_s$$

$$\xrightarrow{\text{Αντίστροφος μετασχηματισμός}}$$

$$i_s = P^{-1} i_{dq0}$$

$$v_s = P^{-1} v_{dq0}$$

$$\lambda_s = P^{-1} \lambda_{dq0}$$

όπου $P^{-1} = P^T$

Επαυξημένος μετασχηματισμός

$$\mathbf{i_B} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{i_d} \\ \mathbf{i_q} \\ \mathbf{i_0} \\ \hline \mathbf{i_f} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{P} & 0 \\ \hline 0 & \mathbf{1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \mathbf{i_a} \\ \mathbf{i_b} \\ \mathbf{i_c} \\ \hline \mathbf{i_f} \end{array}\right] = \mathbf{Bi}$$

$$\mathbf{v_B} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{v_d} \\ \mathbf{v_q} \\ \mathbf{v_0} \\ \hline -\mathbf{v_f} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{P} & 0 \\ \hline 0 & \mathbf{1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \mathbf{v_a} \\ \mathbf{v_b} \\ \mathbf{v_c} \\ \hline -\mathbf{v_f} \end{array}\right] = \mathbf{Bv}$$

$$\lambda_{\mathbf{B}} = \left[\begin{array}{c} \lambda_{\mathbf{d}} \\ \lambda_{\mathbf{q}} \\ \lambda_{\mathbf{0}} \\ \hline \lambda_{\mathbf{f}} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{P} & 0 \\ \hline 0 & \mathbf{1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \lambda_{\mathbf{a}} \\ \lambda_{\mathbf{b}} \\ \lambda_{\mathbf{c}} \\ \hline \lambda_{\mathbf{f}} \end{array}\right] = \mathbf{B}\lambda$$

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΠΕΠΛΕΓΜΕΝΩΝ ΡΟΩΝ

$$\lambda = \mathbf{L}\mathbf{i}$$

$$\mathbf{B}\mathbf{B}^{-1}\lambda_{\mathbf{B}} = \mathbf{B}\mathbf{L}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{i}_{\mathbf{B}}$$

$$\boxed{\lambda_{\mathbf{B}} = \mathbf{L}_{\mathbf{B}}\mathbf{i}_{\mathbf{B}}}$$

όπου $$\mathbf{L}_{\mathbf{B}} = \mathbf{B}\mathbf{L}\mathbf{B}^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ \hline \sqrt{\frac{3}{2}}M_f & 0 & 0 & L_{ff} \end{array}\right]$$

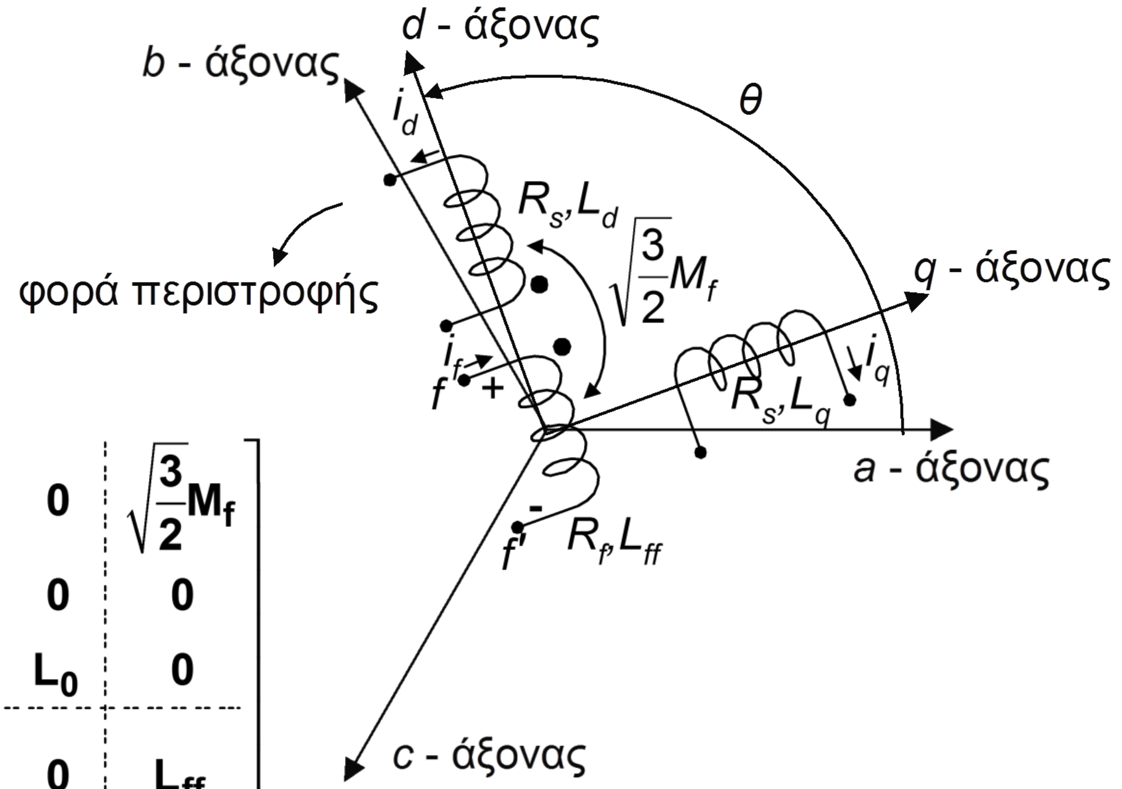
$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m$$

$$L_0 = L_s - 2M_s$$

ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ

ΚΑΤΑ ΤΟΥΣ d-,q- ΑΞΟΝΕΣ



$$\mathbf{L_B} = \left[\begin{array}{ccc|c} \mathbf{L_d} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sqrt{\frac{3}{2}}\mathbf{M_f} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L_q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L_0} & \mathbf{0} \\ \hline \sqrt{\frac{3}{2}}\mathbf{M_f} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L_{ff}} \end{array}\right]$$

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ

$$v = -Ri - \frac{d\lambda}{dt}$$

$$B\,B^{-1}v_B = -\underbrace{BRB^{-1}}_{R}i_B - B\underbrace{\frac{d}{dt}(B^{-1}\lambda_B)}_{\frac{dB^{-1}}{dt}\lambda_B + B^{-1}\frac{d\lambda_B}{dt}}$$

$$\frac{dB^{-1}}{dt}\underbrace{\lambda_B}_{L_B i_B} + B^{-1}\frac{d\lambda_B}{dt}$$

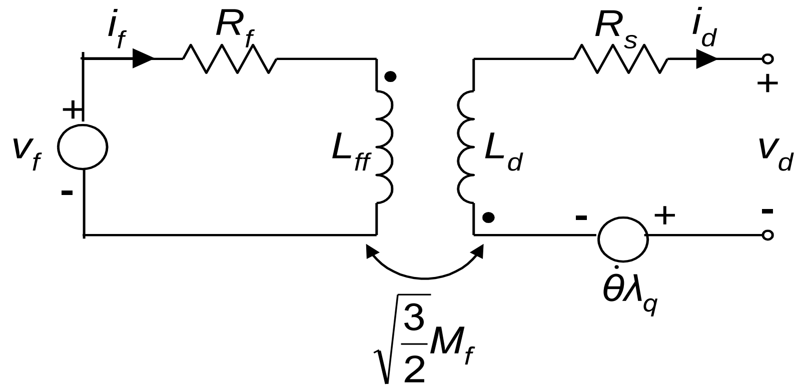
$$v_B = -Ri_B - \underbrace{B\frac{dB^{-1}}{dt}L_B}_{R'}i_B - L_B\frac{di_B}{dt}$$

$$\boxed{v_B = -(R + R')i_B - L_B\frac{di_B}{dt}}$$

και υπό αναλυτική μορφή

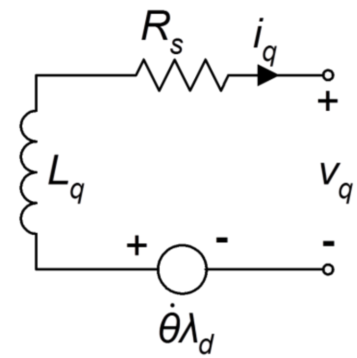
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ -v_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s & \dot{\theta} L_q & 0 & 0 \\ -\dot{\theta} L_d & R_s & 0 & -\dot{\theta}\sqrt{\frac{3}{2}} M_f \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_f \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} M_f & 0 & 0 & L_{ff} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix}$$

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

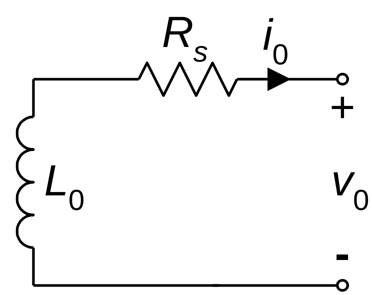


κύκλωμα ευθέος άξονα

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ -v_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s & \dot{\theta}L_q & 0 & 0 \\ -\dot{\theta}L_d & R_s & 0 & -\dot{\theta}\sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_f & 0 & 0 & L_{ff} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix}$$



κύκλωμα εγκάρσιου άξονα



κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

$$p_{3\Phi}(t) = i_a v_a + i_b v_b + i_c v_c$$

$$= \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$= i_s^T v_s$$

$$= (P^{-1} i_{dq0})^T P^{-1} v_{dq0}$$

$$= i_{dq0}^T P P^T v_{dq0}$$

$$= i_{dq0}^T v_{dq0}$$

$$= i_0 v_0 + i_d v_d + i_q v_q$$

d-,q-,0- ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ

$$i_a = \sqrt{2}\,|I|\cos(\omega t - \psi)$$

$$i_b = \sqrt{2}\,|I|\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \psi)$$

$$i_c = \sqrt{2}\,|I|\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \psi)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}\,|I|\sin(\psi + \delta) \\ \sqrt{3}\,|I|\cos(\psi + \delta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

δ είναι η γωνία του q άξονα τη χρονική στιγμή t=0

ΣΧΕΣΗ ΦΑΣΙΚΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ d- q- ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

$$i_a = \sqrt{\frac{2}{3}}[i_d \cos\theta + i_q \sin\theta]$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \mathrm{Re}[(i_d - j i_q) e^{j\theta}]$$

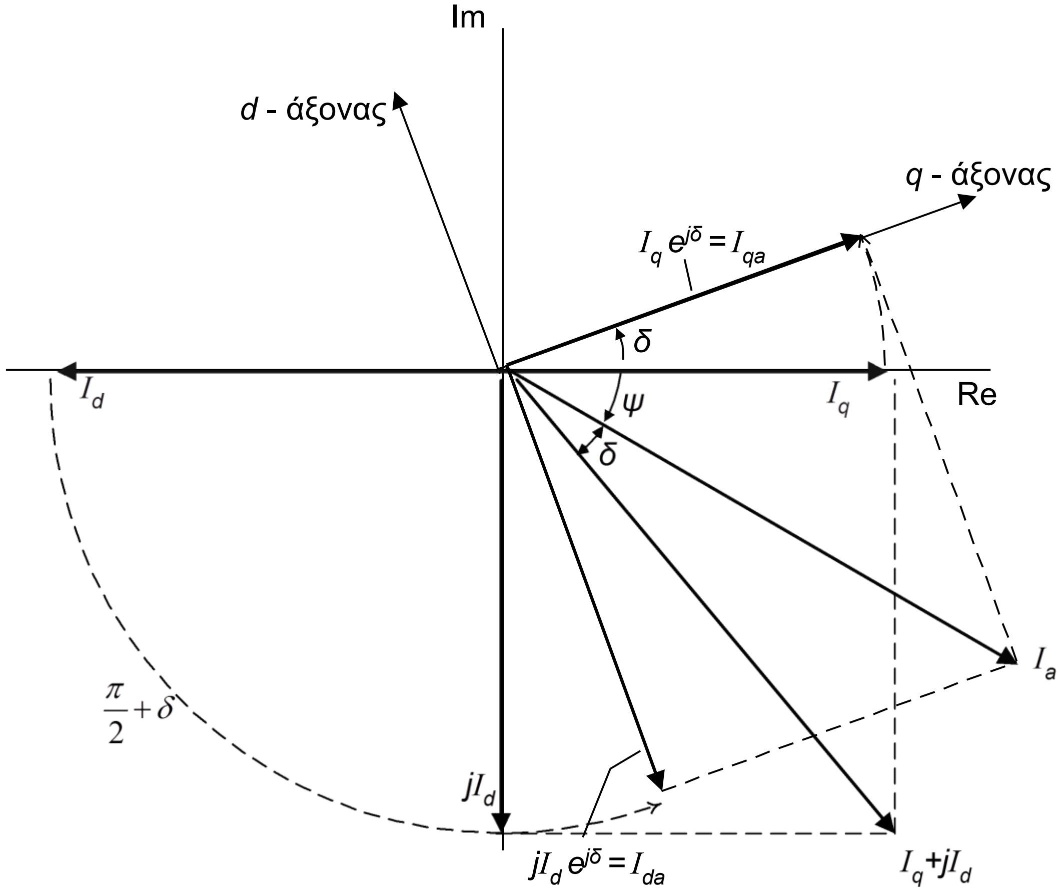
$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \mathrm{Re}[(i_d - j i_q) e^{j\frac{\pi}{2}} e^{j\delta} e^{j\omega t}]$$

$$= \mathrm{Re}[\sqrt{2} \underbrace{\left(\frac{i_q}{\sqrt{3}} + j\frac{i_d}{\sqrt{3}}\right)}_{I_a} e^{j\delta} e^{j\omega t}]$$

Ορίζοντας $\quad I_d = \frac{i_d}{\sqrt{3}}, \quad I_q = \frac{i_q}{\sqrt{3}}$

$$\longrightarrow \quad \boxed{I_a = (I_q + jI_d)e^{j\delta}}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{I_q + jI_d = I_a e^{-j\delta}}$$



Γραφική παράσταση μετασχηματισμού Park για μηχανή που λειτουργεί με τη σύγχρονη ταχύτητα

ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΟ

$$i_a = i_b = i_c = 0 \qquad i_f = i_f^o = \sigma\tau\alpha\theta. \qquad d\theta / dt = \omega = \sigma\tau\alpha\theta.$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ \hline -v_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} - \frac{d}{dt}\left\{ \left[\begin{array}{ccc|c} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ \hline L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{array}\right] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = -i_f^o \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{af} \\ L_{bf} \\ L_{cf} \end{bmatrix} = M_f \omega i_f^o \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$e_a = M_f \omega i_f^o \sin\theta = \omega M_f i_f^o \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \delta) = \omega M_f i_f^o \cos(\omega t + \delta)$$

$$e_a \longrightarrow \boxed{E_a = \frac{\omega M_f i_f^o}{\sqrt{2}} e^{j\delta} = |E| e^{j\delta}}$$

ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ -v_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_s & \dot{\theta}L_q & 0 & 0 \\ -\dot{\theta}L_d & R_s & 0 & -\dot{\theta}\sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f^{\circ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_f & 0 & 0 & L_{ff} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f^{\circ} \end{bmatrix}$$

$i_0 = 0$

$v_0 = 0$

$\dot{\theta} = \omega$

i_d = σταθ.

i_q = σταθ.

$$\left.\begin{aligned} v_d &= -R_s i_d - \omega L_q i_q && \longleftarrow \times j e^{j\delta} / \sqrt{3} \\ v_q &= -R_s i_q + \omega L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}}\omega M_f i_f^{\circ} && \longleftarrow \times e^{j\delta} / \sqrt{3} \end{aligned}\right\} +$$

$$\left(\frac{v_q}{\sqrt{3}} + j\frac{v_d}{\sqrt{3}}\right)e^{j\delta} = -R_s\left(\frac{i_q}{\sqrt{3}} + j\frac{i_d}{\sqrt{3}}\right)e^{j\delta} + \omega L_d \frac{i_d}{\sqrt{3}} e^{j\delta} - j\omega L_q \frac{i_q}{\sqrt{3}} e^{j\delta} + \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{3}{2}}\omega M_f i_f^{\circ} e^{j\delta}$$

$$\underbrace{(V_q + jV_d)e^{j\delta}}_{V_a} = -R_s \underbrace{(I_q + jI_d)e^{j\delta}}_{I_a} + \underbrace{\omega L_d}_{X_d} I_d e^{j\delta} - j\underbrace{\omega L_q}_{X_q} I_q e^{j\delta} + \underbrace{|E|\, e^{j\delta}}_{E_a}$$

$$\boxed{E_a = V_a + R_s I_a + jX_d I_{da} + jX_q I_{qa}} \qquad \boxed{I_a = I_{da} + I_{qa}}$$

$X_d = \omega L_d$: σύγχρονη αντίδραση d άξονα

$X_q = \omega L_q$: σύγχρονη αντίδραση q άξονα

ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ X_d ΚΑΙ X_q

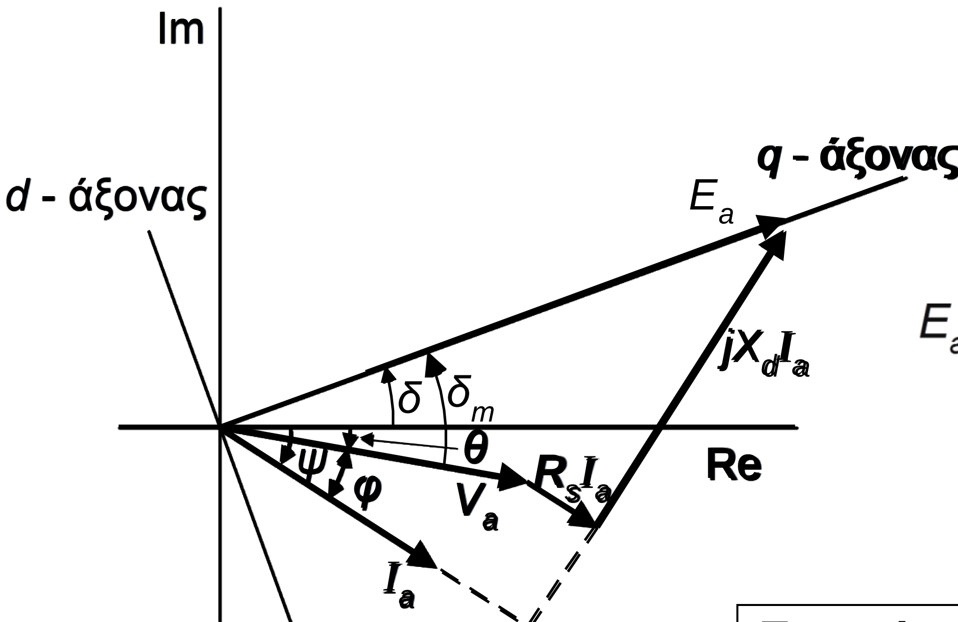
	Διπολικές στροβιλογεννήτριες	Γεννήτριες με έκτυπους πόλους
X_d	1.20	1.25
X_q	1.16	0.70

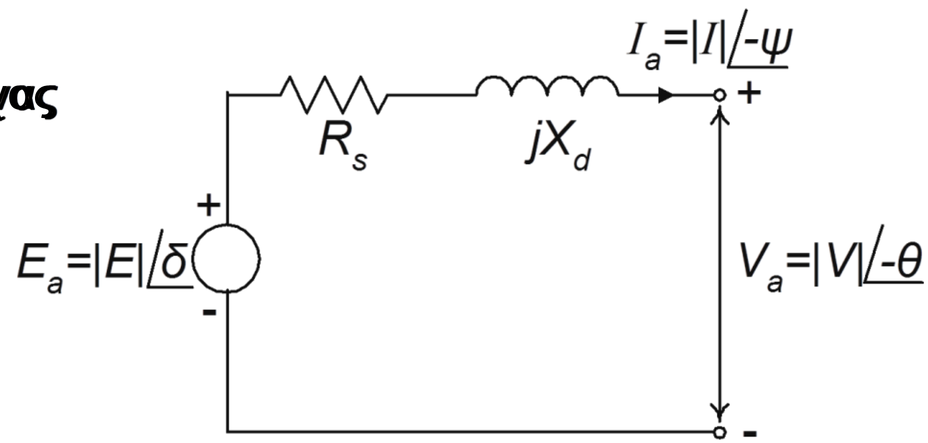
ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

$$\boxed{\mathbf{E_a = V_a + R_s I_a + jX_d I_{da} + jX_q I_{qa}}}$$

$$\mathbf{E_a = V_a + R_s I_a + jX_d (I_{da} + I_{qa})}$$
$$\mathbf{= V_a + R_s I_a + jX_d I_a}$$

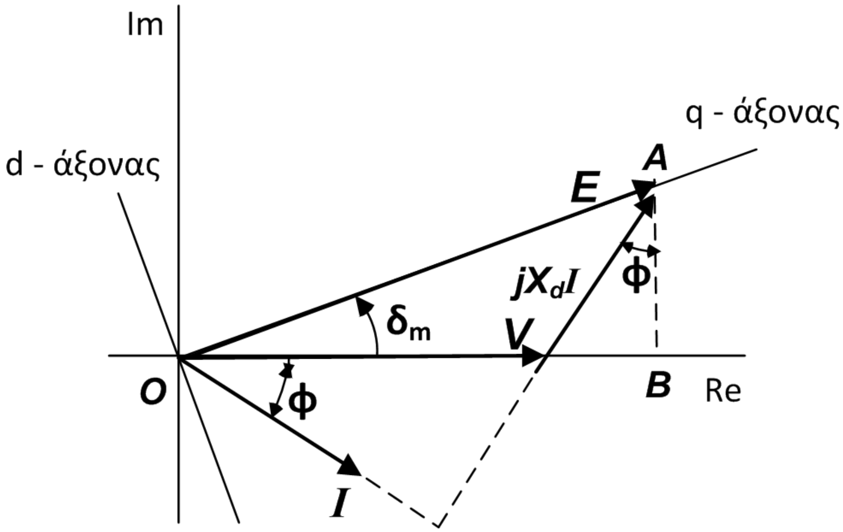




$$\boxed{\boldsymbol{\delta_m} = \underline{/\mathbf{E_a}} - \underline{/\mathbf{V_a}} = \boldsymbol{\delta + \theta} \quad \textit{Γωνία ισχύος}}$$

ΑΣΚΗΣΗ 4.1

Να βρεθεί η ΗΕΔ Ε που απαιτείται για να μπορεί μια γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα με αμελητέα αντίσταση τυλιγμάτων στάτη να εξυπηρετήσει φορτίο P_G+jQ_G υπό τάση $|V|$



$$OA^2 = AB^2 + OB^2$$

$$|E|^2 = (X_d |I| \cos\varphi)^2 + (|V| + X_d |I| \sin\varphi)^2$$

$$|E|^2 = \left(X_d \frac{P_G}{|V|}\right)^2 + \left(|V| + X_d \frac{Q_G}{|V|}\right)^2$$

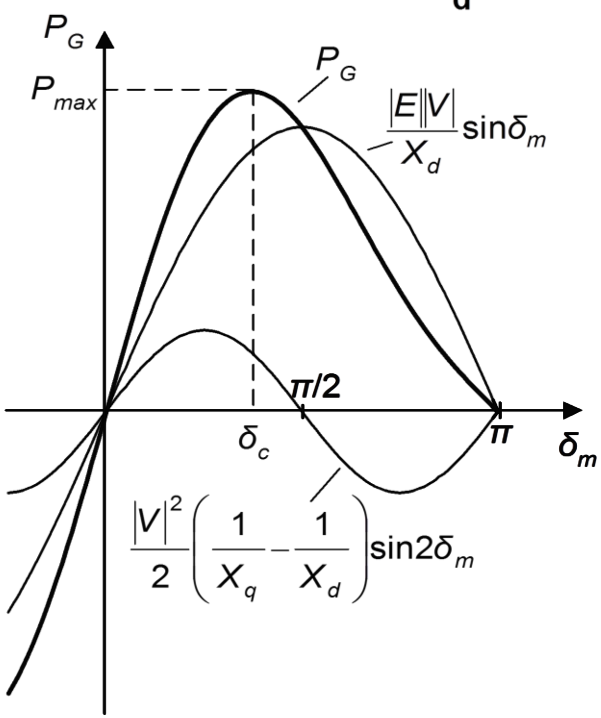
$$|E| = \sqrt{\left(X_d \frac{P_G}{|V|}\right)^2 + \left(|V| + X_d \frac{Q_G}{|V|}\right)^2}$$

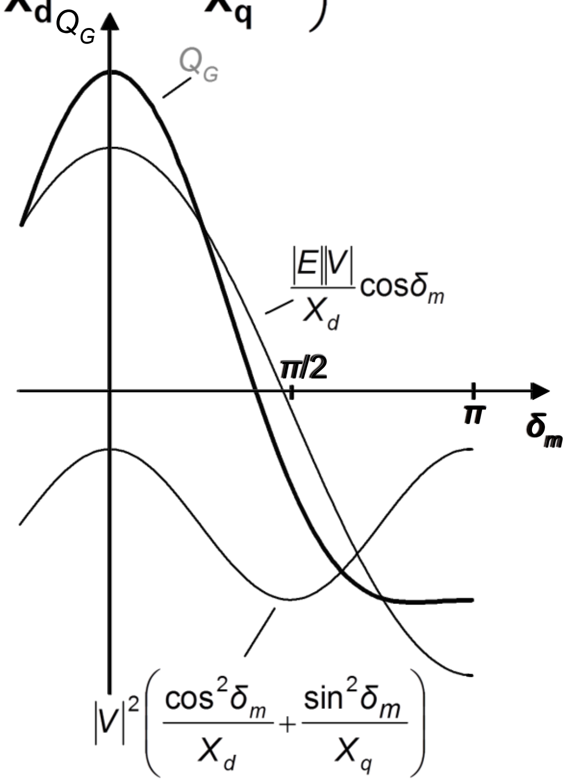
$$\delta_m = \tan^{-1}\frac{AB}{OB} = \tan^{-1}\frac{P_G X_d}{|V|^2 + Q_G X_d}$$

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΕΚΤΥΠΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ

$$\mathbf{P_G = \frac{|E||V|}{X_d}\sin\delta_m + \frac{|V|^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta_m}$$

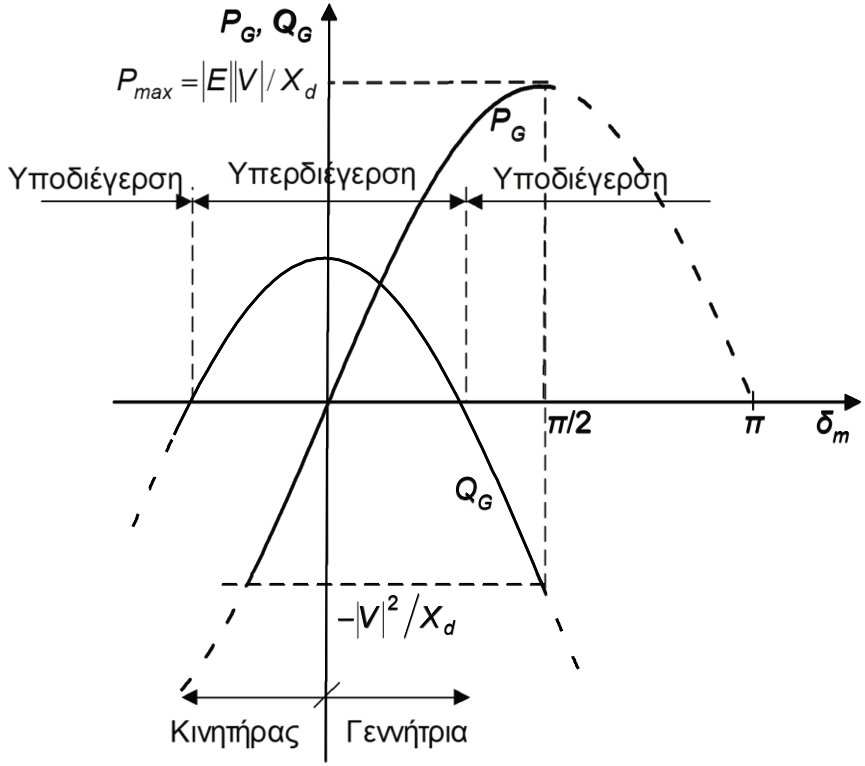
$$\mathbf{Q_G = \frac{|E||V|}{X_d}\cos\delta_m - |V|^2\left(\frac{\cos^2\delta_m}{X_d} + \frac{\sin^2\delta_m}{X_q}\right)}$$





ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΡΟΜΕΑ

$$P_G = \frac{|E||V|}{X_d}\sin\delta_m \qquad Q_G = \frac{|V|(|E|\cos\delta_m - |V|)}{X_d}$$



ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΕΣ

$$P_G = 0 \longrightarrow \delta_m = 0$$

$$\boxed{Q_G = \frac{|V|(|E| - |V|)}{X_d}}$$

. $|E| > |V|$: υπερδιέγερση $\longrightarrow$ $Q_G > 0$

. $|E| < |V|$: υποδιέγερση $\longrightarrow$ $Q_G < 0$

ΑΣΚΗΣΗ 4.2 (Ι)

Σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα με ονομαστικά χαρακτηριστικά 150 MVA, 15 kV, 50 Hz, αμελητέα αντίσταση τυλιγμάτων στάτη και X_d =1.8 pu συνδέεται σε πολύ μεγάλο σύστημα.

α) Αν η γεννήτρια τροφοδοτεί ονομαστική ισχύ υπό ΣΙ=0.8 επαγ., να βρεθεί: η πραγματική ισχύς, η άεργος ισχύς και το ρεύμα που παρέχει η γεννήτρια καθώς και η ΗΕΔ σε ανά μονάδα τιμές.

$$\left|S_b\right|_{3\Phi} = 150 \ \ MVA, \ \ \left|V_b\right|_{3\Phi} = 15 \ \ kV$$

$$\alpha) \quad P_G = |S_G| \cos\varphi = 1 \times 0.8 = 0.8 \ \ pu$$

$$Q_G = \sqrt{|S_G|^2 - P_G^2} = \sqrt{1^2 - 0.8^2} = 0.6 \ \ pu$$

$$I = |I| \angle(-\cos^{-1} \Sigma I) = \frac{|S_G|}{|V|} \angle -\cos^{-1} 0.8 = 1\angle -36.86^\circ \ \ pu$$

$$E = V + jX_d I = 1\angle 0^\circ + j1.8 \times 1\angle -36.86^\circ = 2.53\angle 34.7^\circ \ \ pu$$

ΑΣΚΗΣΗ 4.2 (ΙΙ)

β) Αν η γεννήτρια παρέχει στο σύστημα 51 MW και 34 MVar ,
να βρεθεί το ρεύμα και η ΗΕΔ της γεννήτριας σε πραγματικές τιμές.

$$\beta)\quad |S_G| = \sqrt{P_G{}^2 + Q_G^2} = \sqrt{51^2 + 34^2} = 61.3\ \ MVA$$

$$|S_G| = \sqrt{3}\,|V|\,|I| \quad \Rightarrow \quad |I| = \frac{|S_G|}{\sqrt{3}\,|V|} = \frac{61.3}{\sqrt{3}\times 15} = 2.36\ \ kA$$

$$\varphi = tan^{-1}\frac{Q_G}{P_G} = tan^{-1}\frac{34}{51} = 33.72^\circ$$

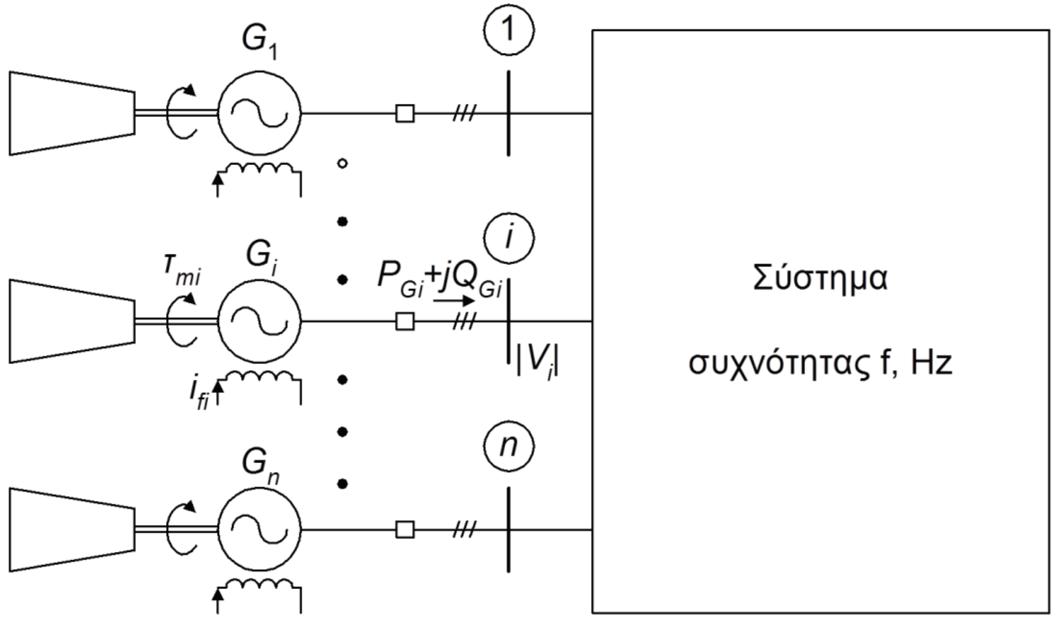
$$I = |I|\angle -\varphi = 2.36\angle -33.72^\circ\ \ kA$$

$$|Z_b|_{3\Phi} = \frac{|V_b|_{3\Phi}^2}{|S_b|_{3\Phi}} = \frac{15^2}{150} = 1.5\ \ \Omega = |Z_b|_{1\Phi}$$

$$X_d = 1.8\times 1.5 = 2.7\ \ \Omega$$

$$E = V + jX_d I = \frac{15}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ + j2.7\times 2.36\angle -33.72^\circ = 13.31\angle 23.46^\circ\ \ kV$$

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ



Παράλληλη λειτουργία γεννητριών

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ: τ_m, i_f

ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ: P_G, Q_G, $|V|$, f

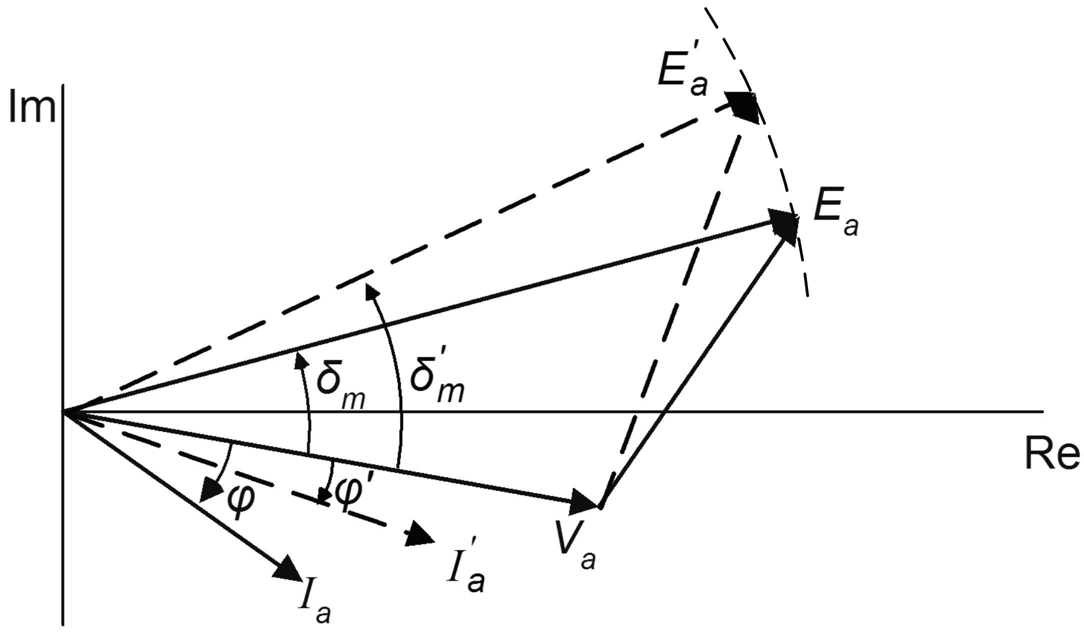
ΓΙΑ ΑΠΕΙΡΩΣ ΙΣΧΥΡΟ ΔΙΚΤΥΟ: $|V|$, f : σταθερά

$\boxed{\tau_m \rightarrow P_G}$ $\boxed{i_f \rightarrow Q_G}$

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΕΥΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

i_f =σταθ. $\longrightarrow$ |E|= σταθ.

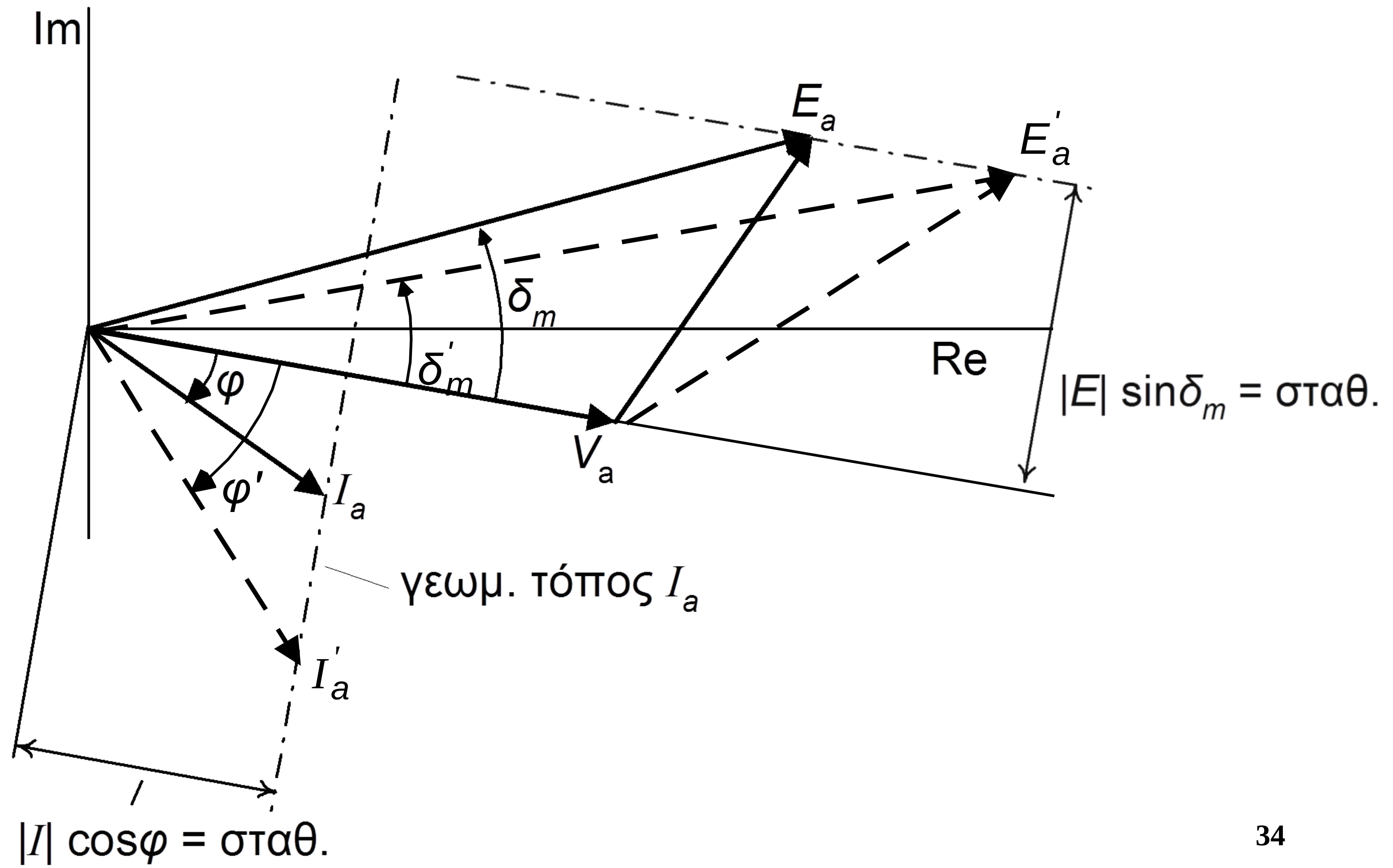
$\uparrow \tau_m \longrightarrow \uparrow P_G \longrightarrow \uparrow \sin\delta_m \longrightarrow \uparrow \delta_m$



ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΟΠΗ

$\tau_m = \sigma\tau\alpha\theta. \longrightarrow P_G = \sigma\tau\alpha\theta.$ $\quad P_G = \frac{|E||V|}{X_d}\sin\delta_m = \sigma\tau\alpha\theta. \longrightarrow |E|\sin\delta_m = \sigma\tau\alpha\theta.$

$\uparrow i_f \longrightarrow \uparrow |E| \longrightarrow \downarrow \sin\delta_m \longrightarrow \downarrow \delta_m$ $\quad P_G = |V||I|\cos\varphi = \sigma\tau\alpha\theta. \longrightarrow |I|\cos\varphi = \sigma\tau\alpha\theta.$



ΑΣΚΗΣΗ 4.3 (I)

Σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα συνδέεται σε άπειρο ζυγό στον οποίον τροφοδοτεί ρεύμα 0.8 pu, υπό ΣΙ=0.9 επαγ. Η γεννήτρια λειτουργεί υπό ονομαστική τάση, έχει αμελητέα αντίσταση τυλιγμάτων στάτη και σύγχρονη αντίδραση X_d =1.7241 pu.

α) Να βρεθεί η πραγματική και άεργος ισχύς που παρέχει η γεννήτρια.

$$\alpha)\quad V = |V|\angle 0^\circ = 1\angle 0^\circ \ \ pu$$

$$I = |I|\angle -\cos^{-1}(0.9) = 0.8\angle -25.84^\circ \ \ pu$$

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I = 0 - (-25.84^\circ) = 25.84^\circ$$

$$P_G = |V||I|\cos\varphi = 1\times 0.8\times \cos 25.84^\circ = 0.72 \ \ pu$$

$$Q_G = |V||I|\sin\varphi = 1\times 0.8\times \sin 25.84^\circ = 0.3487 \ \ pu$$

ΑΣΚΗΣΗ 4.3 (ΙΙ)

β) Αν η πραγματική ισχύς που παρέχει η γεννήτρια παραμένει σταθερή, αλλά το ρεύμα διέγερσης (i) αυξάνεται κατά 20% και (ii) μειώνεται κατά 20%, να βρεθεί η άεργος ισχύς της γεννήτριας σε κάθε περίπτωση.

$$(\beta)\quad E = V + jX_d I = 1\angle 0^\circ + j1.7241 \times 0.8\angle -25.84^\circ = 2.0261\angle 37.78^\circ \;\; pu$$

$$|E| = 2.0261 \;\; pu\,, \quad \delta_m = 37.78^\circ$$

$$(i)\quad |E'| = 1.2\,|E| = 1.2 \times 2.0261 = 2.4313 \;\; pu$$

$$|E|\sin\delta_m = |E'|\sin\delta'_m \Rightarrow$$

$$\delta'_m = \sin^{-1}\frac{|E|\sin\delta_m}{|E'|} = \sin^{-1}\frac{2.0261 \times \sin 37.78^\circ}{2.4313} = 30.7^\circ$$

$$Q'_G = \frac{|V|\left(|E'|\cos\delta'_m - |V|\right)}{X_d} = \frac{1 \times \left(2.4313 \times \cos 30.7^\circ - 1\right)}{1.7241} = 0.6325 \;\; pu$$

ΑΣΚΗΣΗ 4.3 (III)

$$(ii) \quad |E''| = 0.8\,|E| = 0.8 \times 2.0261 = 1.6209 \;\; pu$$

$$\delta''_m = sin^{-1}\frac{|E|\,sin\,\delta_m}{|E''|} = sin^{-1}\frac{2.0261 \times sin\,37.78^\circ}{1.6209} = 50^\circ$$

$$Q''_G = \frac{|V|\left(|E''|\,cos\,\delta''_m - |V|\right)}{X_d} = \frac{1 \times \left(1.6209 \times cos\,50^\circ - 1\right)}{1.7241} = 0.0245 \;\; pu$$

ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ

Η τάση γεννήτριας Ε και η τάση συστήματος V πρέπει:

- ***Να έχουν την ίδια συχνότητα***
- ***Να είναι της ίδιας φασικής ακολουθίας***
- ***Να έχουν το ίδιο μέτρο,δηλ. |E|=|V|***
- ***Να έχουν τις ίδιες φασικές γωνίες,δηλ.*** $\delta=\delta_b$

ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

$$|\mathbf{S_G}| < |\mathbf{S_G}|_{\mathbf{max}} = |\mathbf{V}||\mathbf{I}|_{\mathbf{max}}$$

$$\mathbf{P_G} = \frac{|\mathbf{V}||\mathbf{E}|_{\mathbf{max}}}{\mathbf{X_d}} \sin\delta_{\mathbf{m}}$$

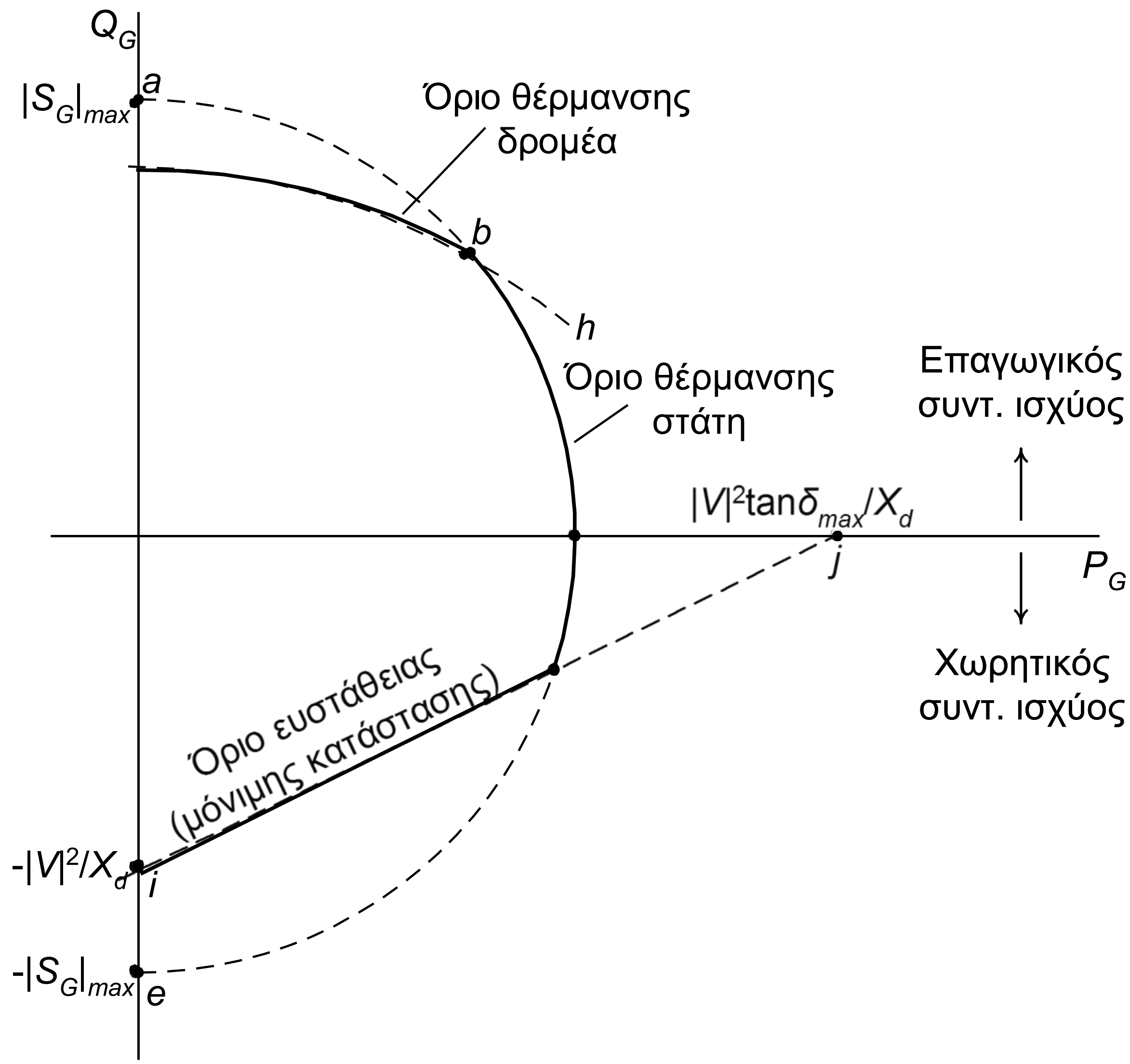
$$\mathbf{Q_G} + \frac{|\mathbf{V}|^2}{\mathbf{X_d}} = \frac{|\mathbf{V}||\mathbf{E}|_{\mathbf{max}}}{\mathbf{X_d}} \cos\delta_{\mathbf{m}}$$

$$\mathbf{P_G^2} + \left(\mathbf{Q_G} + \frac{|\mathbf{V}|^2}{\mathbf{X_d}}\right)^2 = \left(\frac{|\mathbf{V}||\mathbf{E}|_{\mathbf{max}}}{\mathbf{X_d}}\right)^2$$

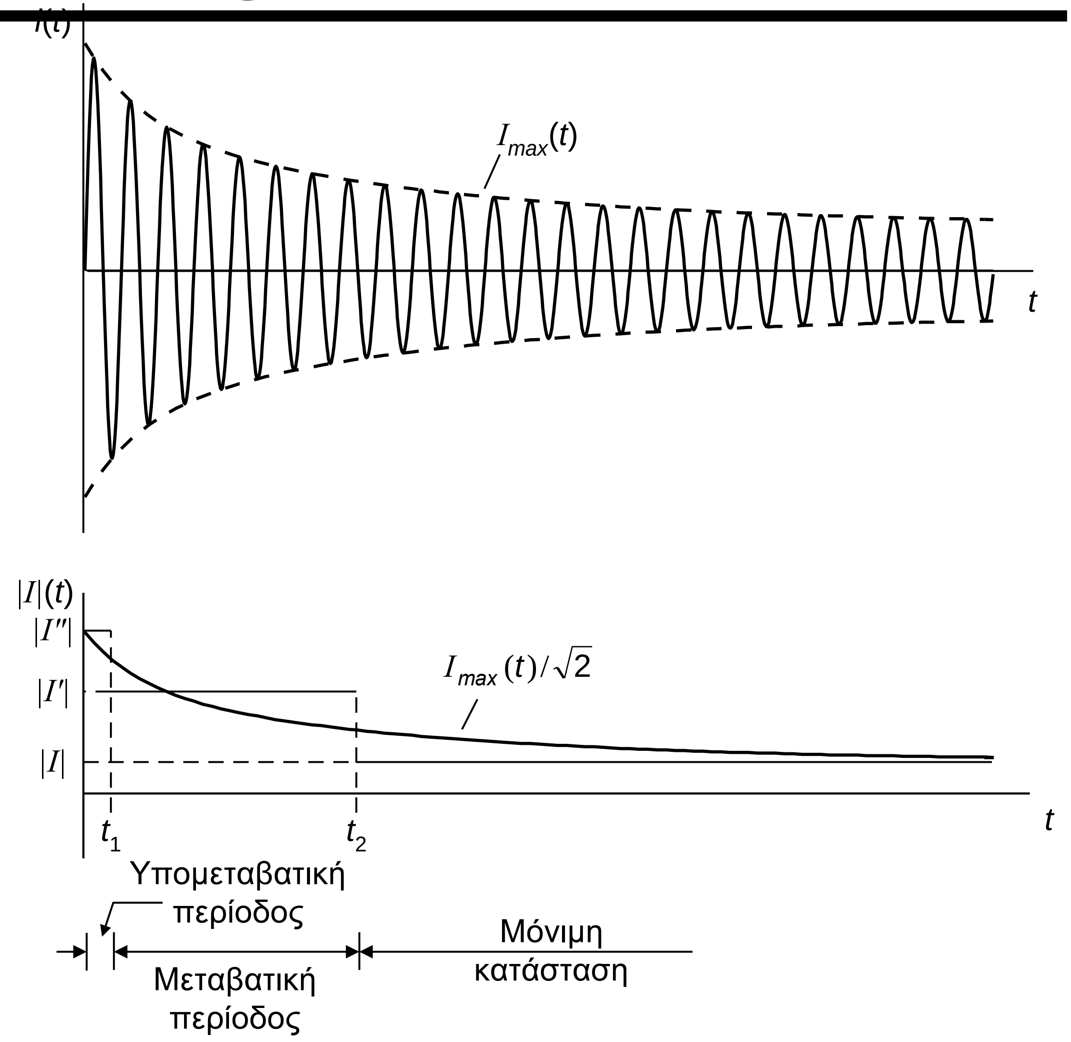
$$\mathbf{Q_G} = \frac{|\mathbf{V}||\mathbf{E}|}{\mathbf{X_d}} \cos\delta_{\mathbf{max}} - \frac{|\mathbf{V}|^2}{\mathbf{X_d}}$$

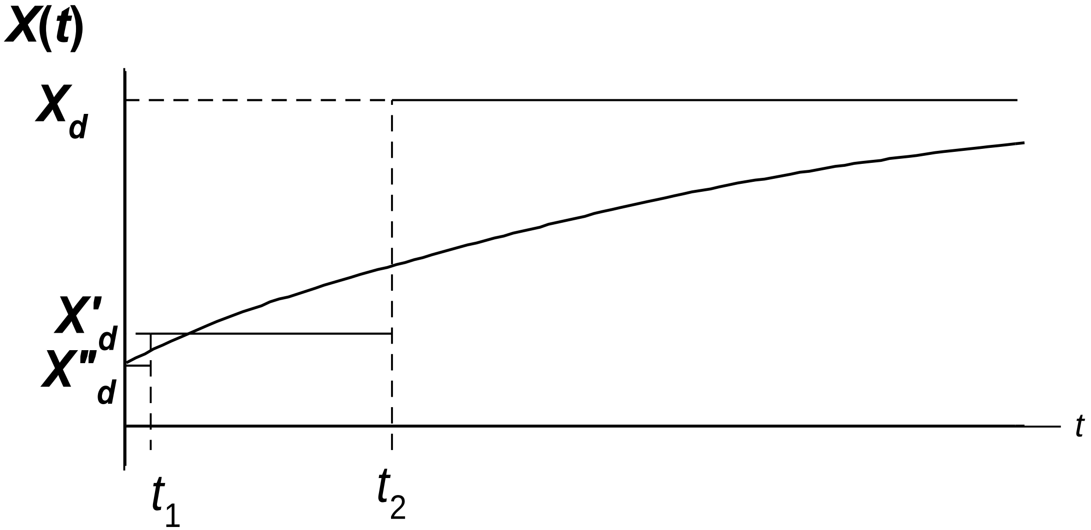
$$= \frac{\mathbf{P_G}}{\sin\delta_{\mathbf{max}}} \cos\delta_{\mathbf{max}} - \frac{|\mathbf{V}|^2}{\mathbf{X_d}}$$

$$= \frac{1}{\tan\delta_{\mathbf{max}}} \mathbf{P_G} - \frac{|\mathbf{V}|^2}{\mathbf{X_d}}$$



ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ



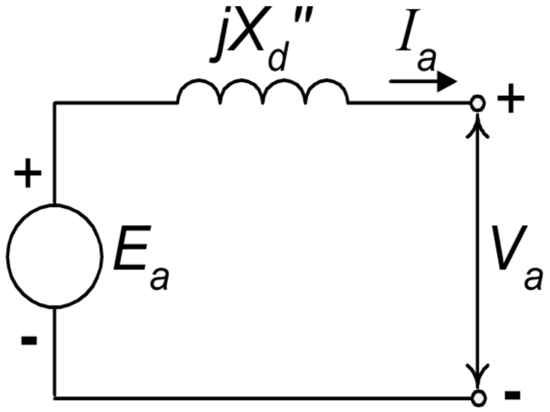


$$X_d'' = \frac{|E|}{|I''|} \qquad X_d' = \frac{|E|}{|I'|} \qquad X_d = \frac{|E|}{|I|}$$

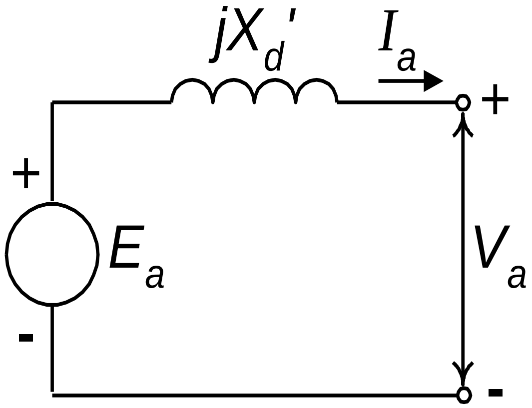
ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ $X_d^{'}, X_d^{''}$

	Διπολικές στροβιλογεννήτριες	Γεννήτριες με έκτυπους πόλους
$X_d^{'}$	0.15	0.3
$X_d^{''}$	0.09	0.2

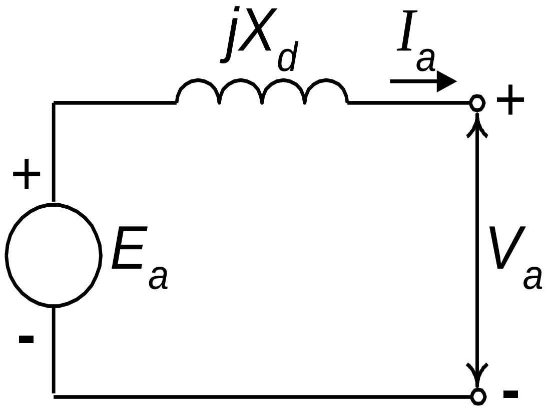
ΑΝΑ ΦΑΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΑΡΧΙΚΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ



Ισοδύναμο υπομεταβατικής περιόδου



Ισοδύναμο μεταβατικής περιόδου



Ισοδύναμο μόνιμης κατάστασης

Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα είναι από το βιβλίο «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Γ.Β. Γιαννακόπουλος, Ν.Α. Βοβός, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης