
Mașina sincronă

Regimul de generator sincron

Exemple de calcul

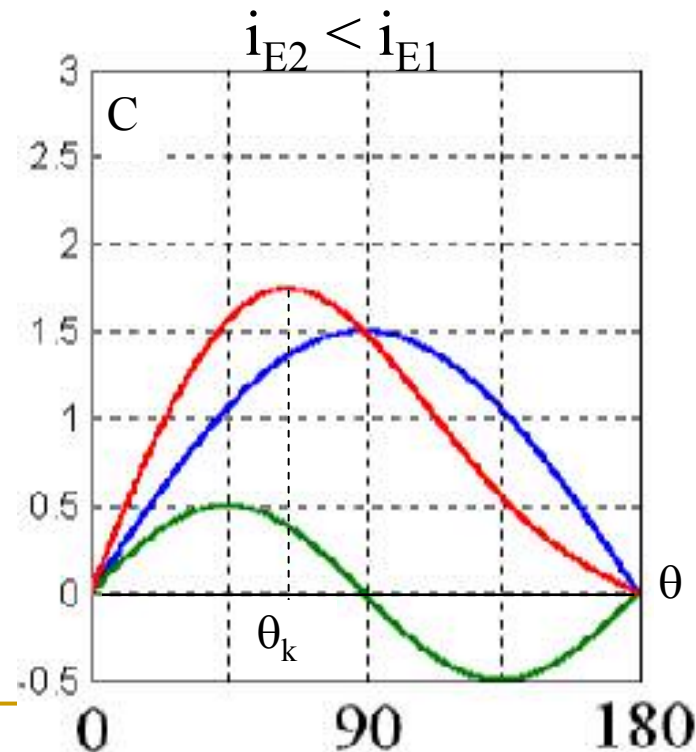
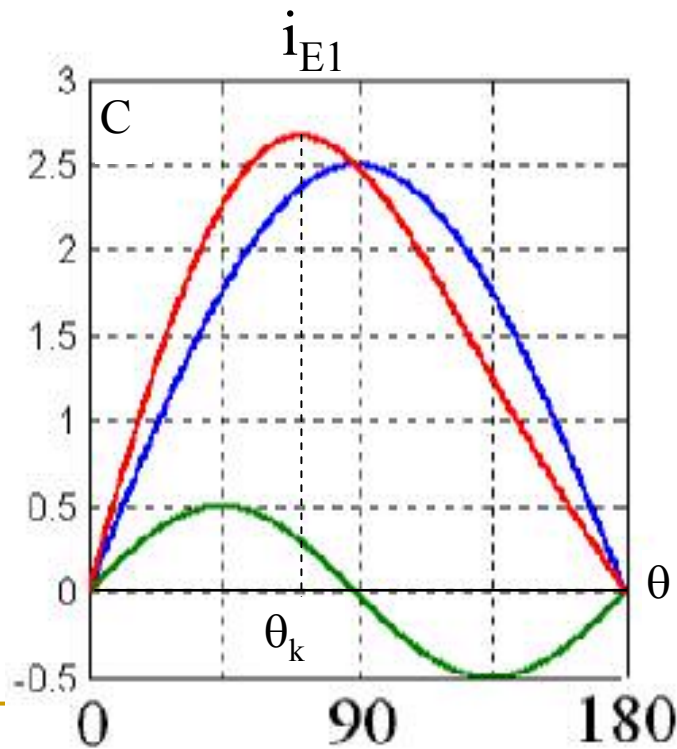
Regimul de generator .

Caracteristica cuplului

$$C_{si} = \frac{p \cdot m_S}{\omega_s} \cdot \left(\frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \cos \theta + U_S^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(2\theta) \right) = 0$$

$$\cos^2 \theta_k + \frac{1}{2} \frac{E_p}{U_s} \frac{X_q}{X_d - X_q} \cos \theta_k - \frac{1}{2} = 0$$

Unghiul intern critic θ_k



Regimul de generator independent

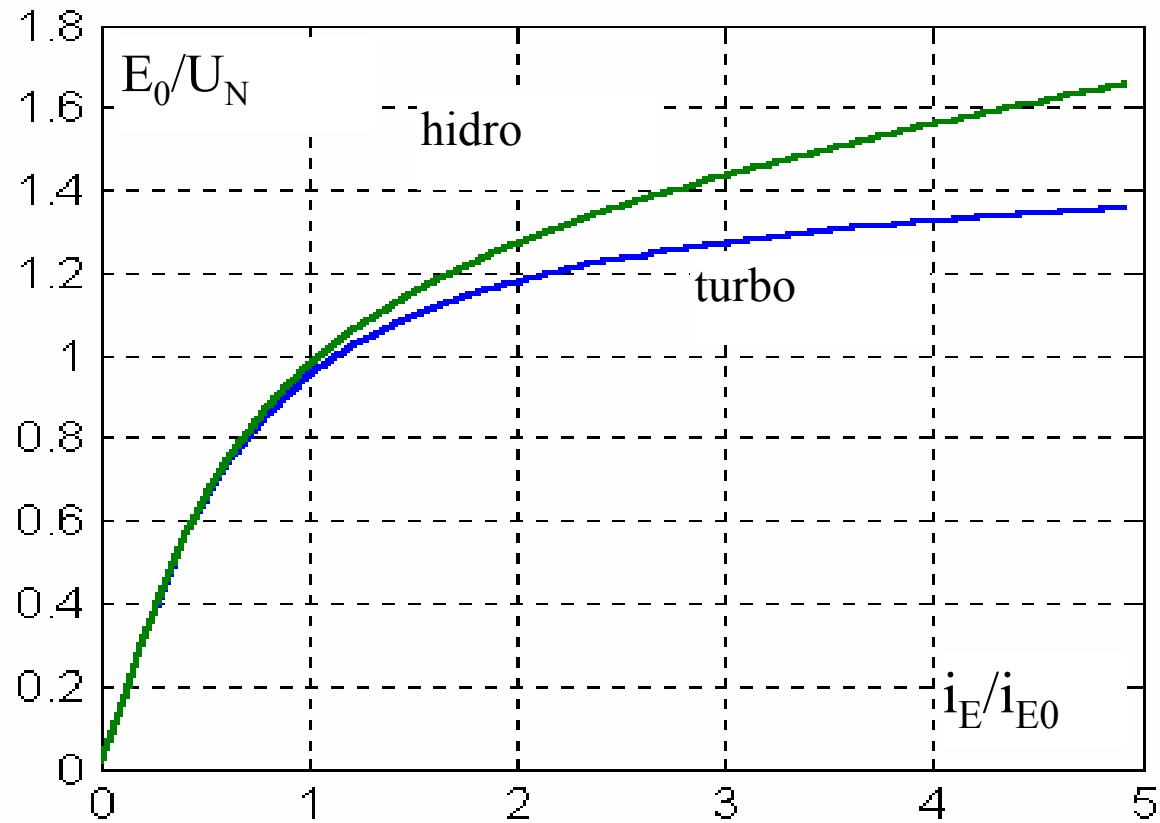
- Nu este cuplat la rețea,
- unghiul intern nu are importanța,
- se presupune viteza de antrenare constantă.

Caracteristicile generatoarelor electrice :

- de mers în gol,
 - de mers în scurtcircuit staționar,
 - de mers în sarcină,
 - externă,
 - de reglare.
-

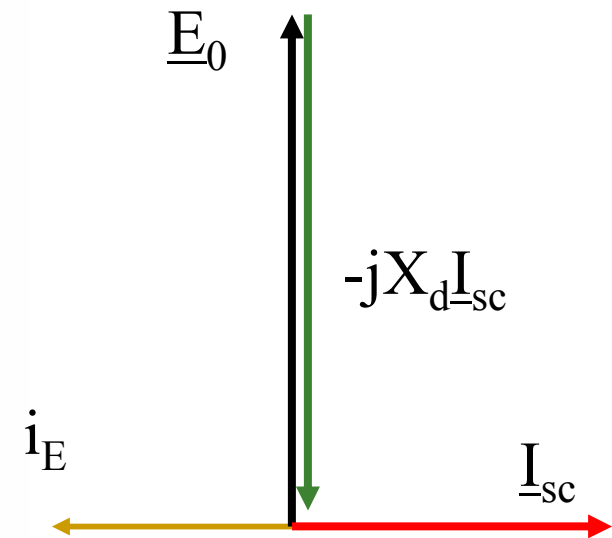
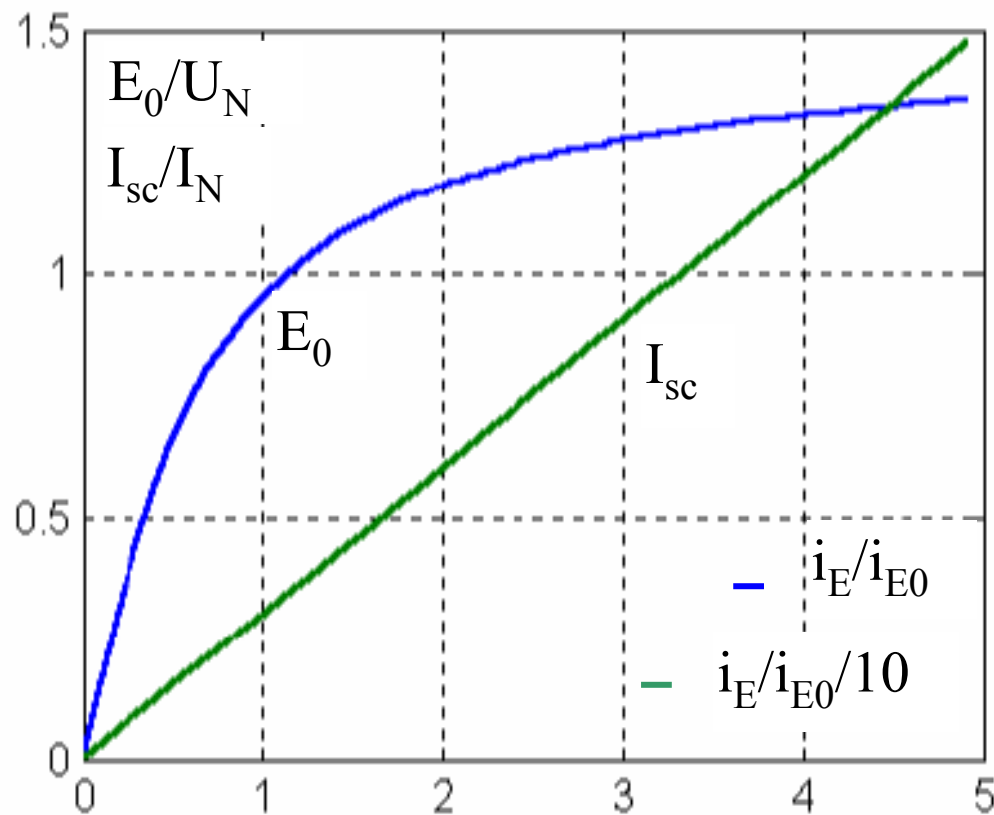
Caracteristica de mers în gol.

$$E_0 = f(i_E) \quad \text{la} \quad I = 0$$



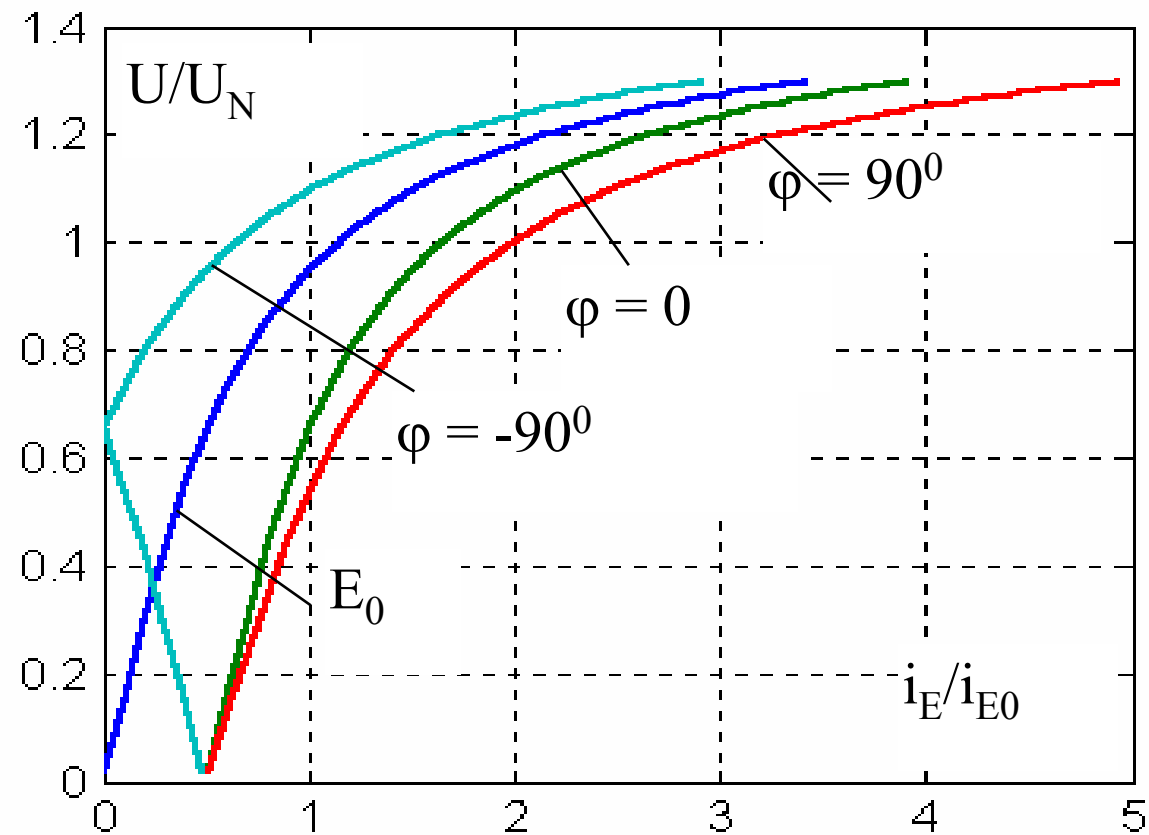
Caracteristica de mers în scurtcircuit staționar

$$I_{sc} = f(i_E) \quad \text{la } U = 0$$



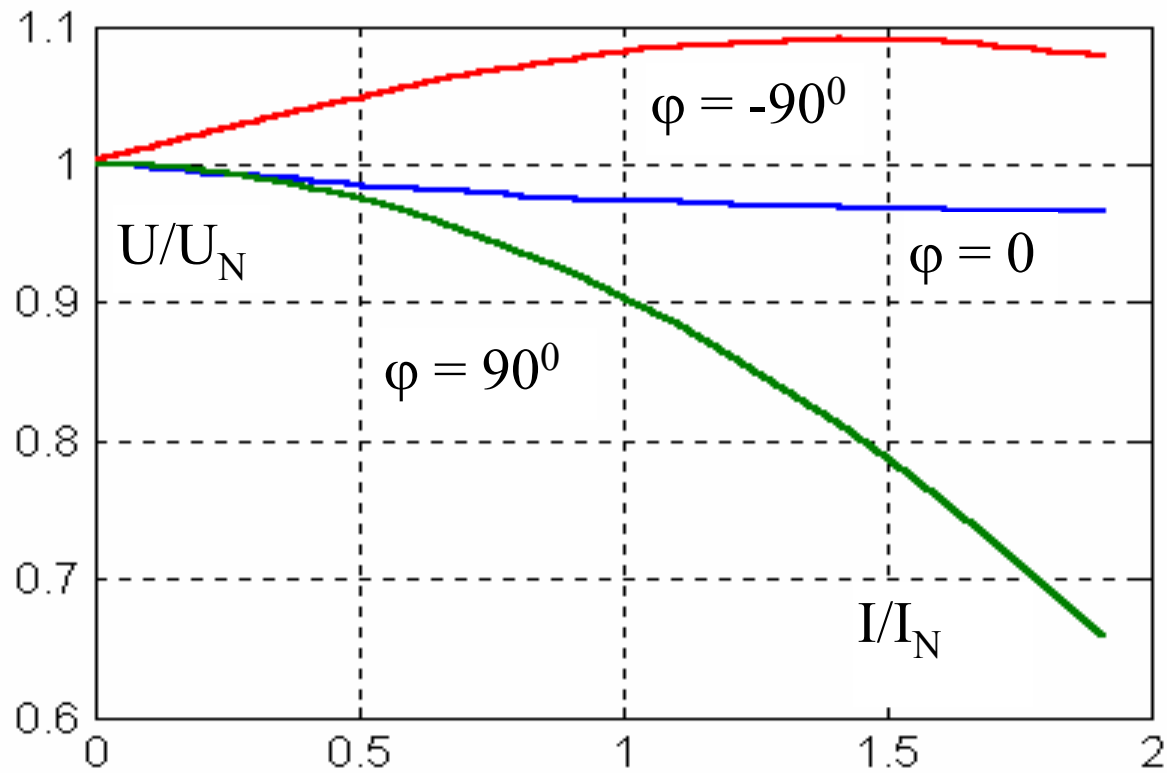
Caracteristica de mers în sarcină

$$U = f(i_E) \quad \text{la} \quad I = ct. \quad \cos \varphi = ct.$$



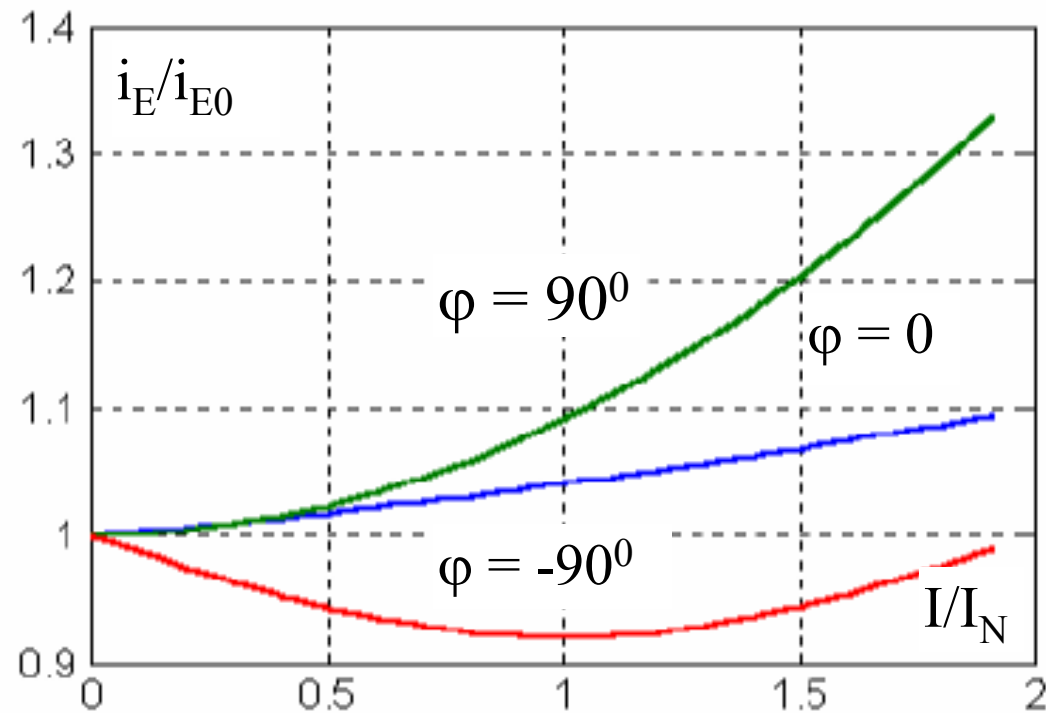
Caracteristica externă

$$U = f(I) \quad \text{la} \quad i_E = ct. \quad \cos \varphi = ct.$$



Caratteristica de reglare

$$i_E = f(I) \quad \text{la} \quad U = ct. \quad \cos \varphi = ct.$$



Generator sincron cuplat la rețea.

Condiții de cuplare la rețea a generatorului :

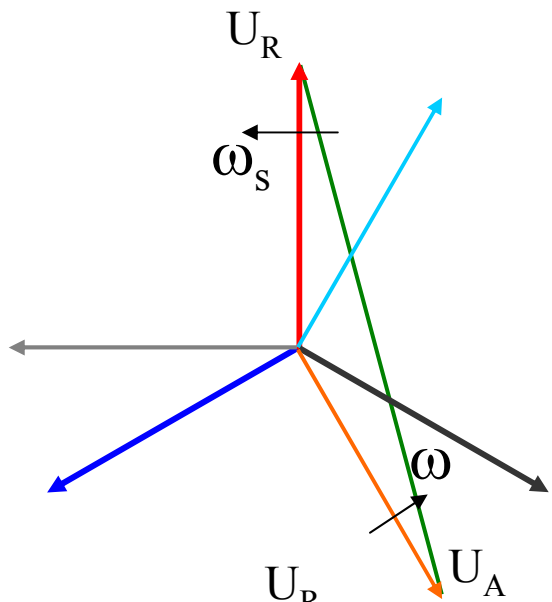
Tensiuni egale în orice moment !

- tensiuni sinusoidale,
- tensiuni egale,
- aceeași frecvență,
- aceeași succesiune a fazelor,
- tensiuni în fază.

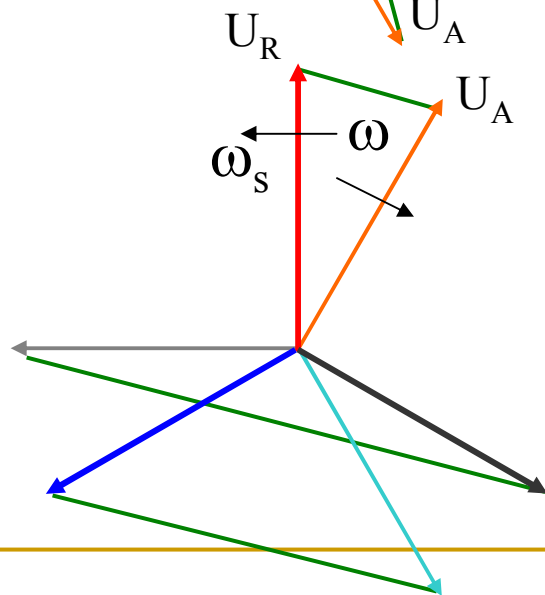
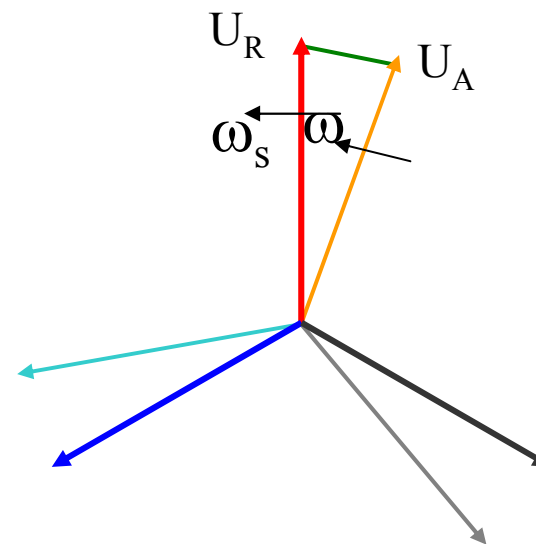
Verificarea condițiilor:

- sincronoscop
 - cu lămpi,
 - electromagnetic
-

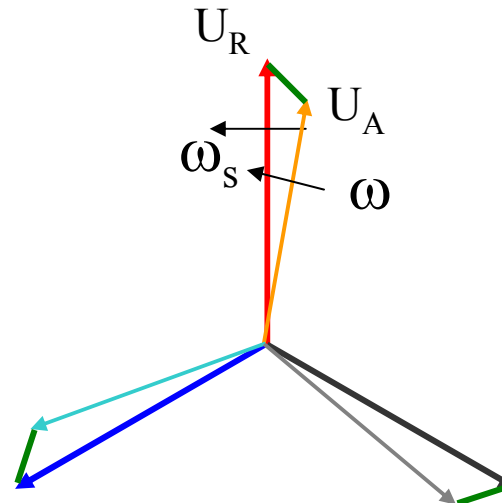
Sincronizare



Tensiuni defazate



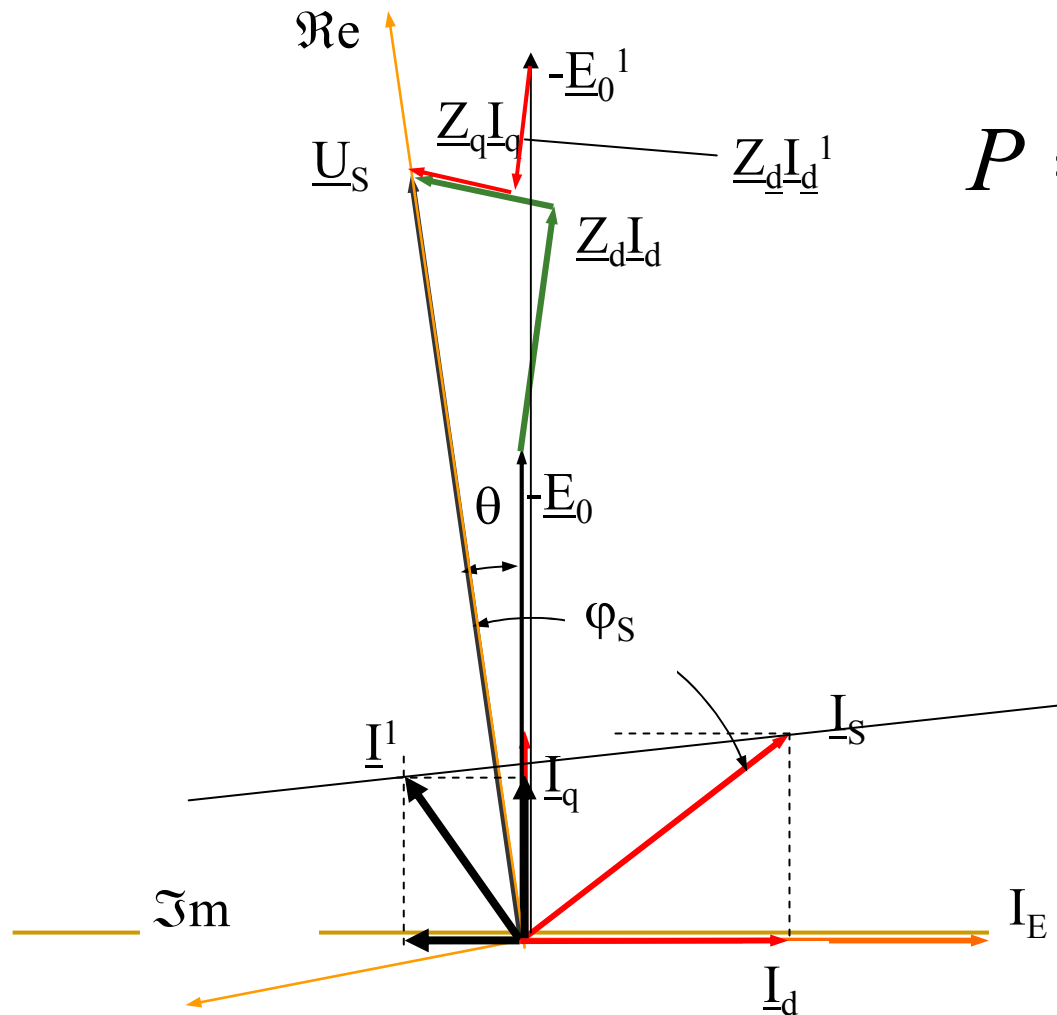
Sucesiune diferită



Tensiuni diferite

Încărcarea generatorului cuplat la rețea

Încărcare cu putere reactivă. Puterea activă constantă.



$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = ct$$

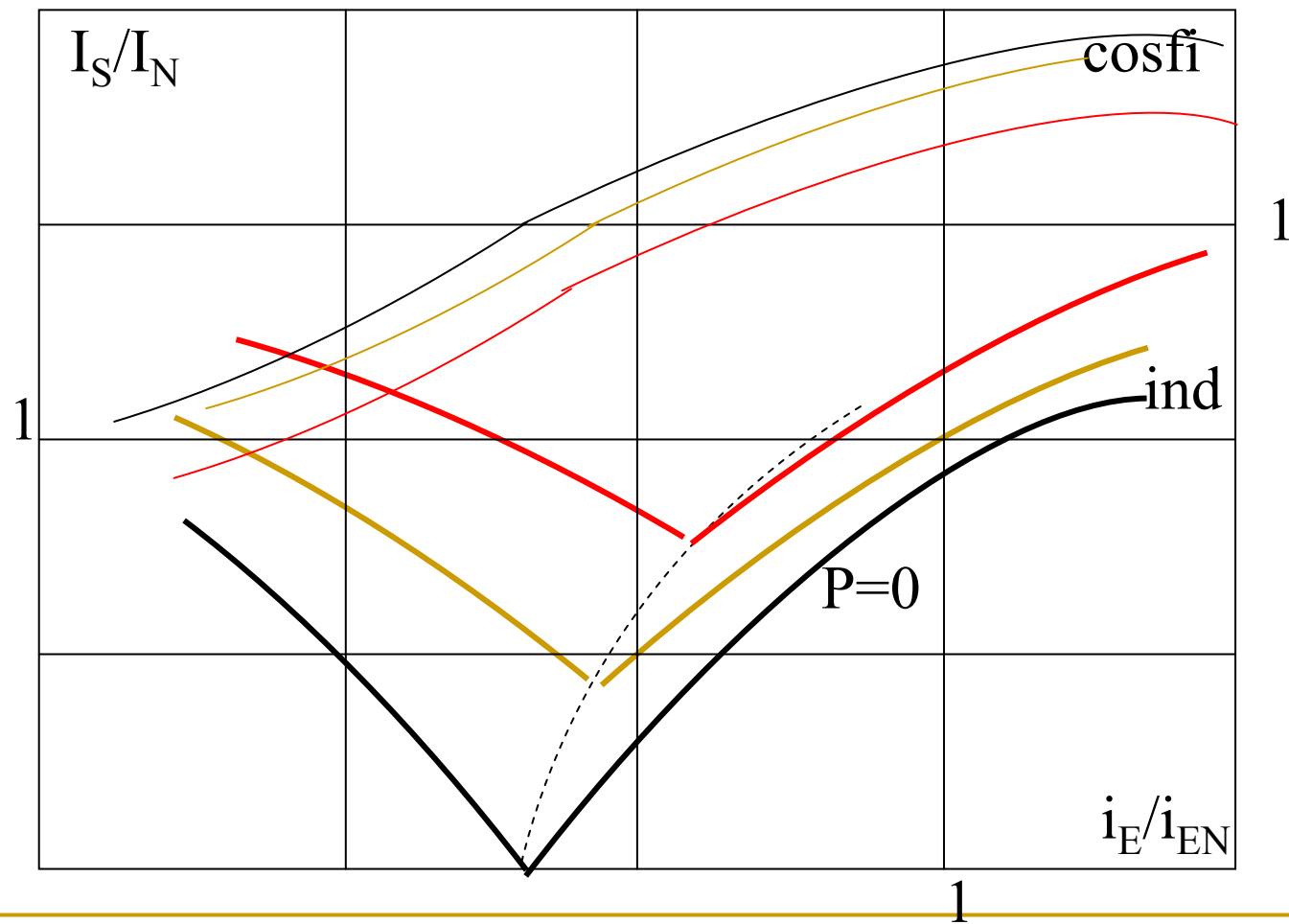
Se modifică i_E

Se schimbă :

- curenții I_s ,
- $\cos \varphi$.

Curbele in V

Curbele in V

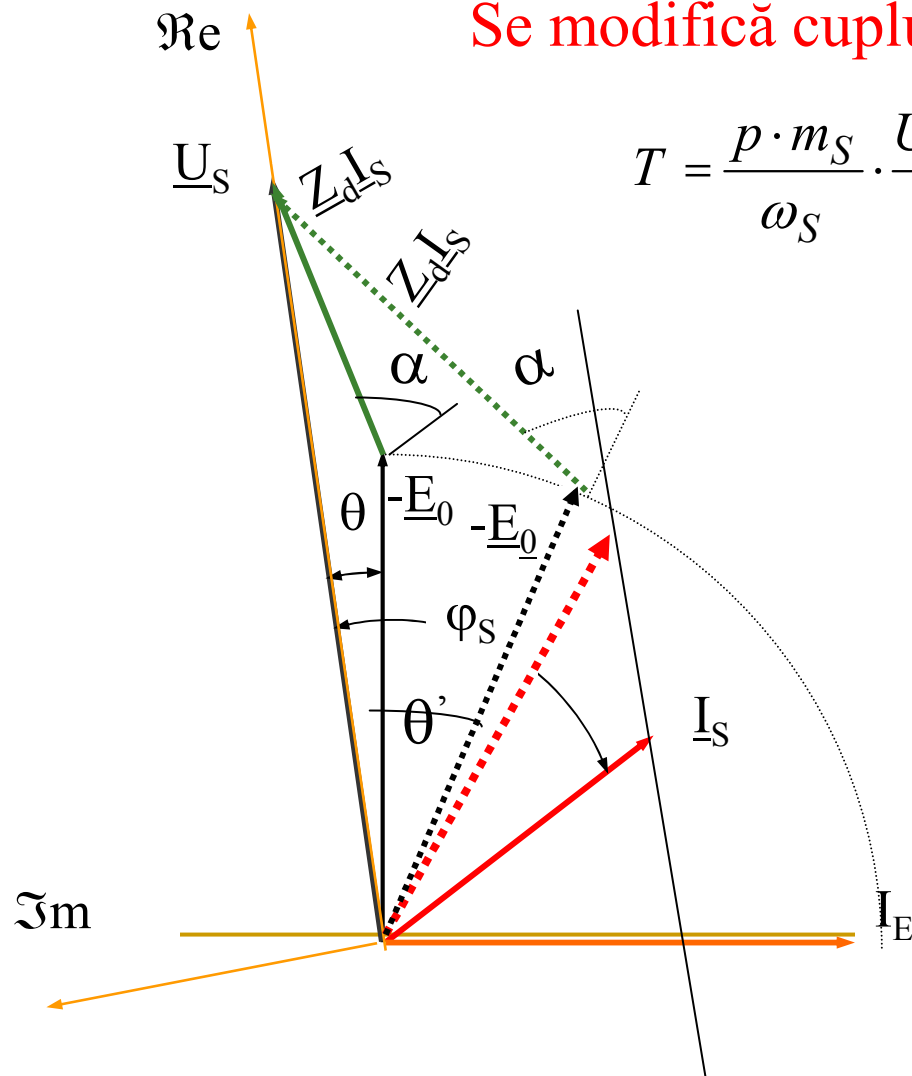


Încărcarea generatorului cuplat la rețea

Încărcare cu putere activă

Se modifică cuplul de antrenare T

$$T = \frac{p \cdot m_S}{\omega_S} \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \sin \theta + m_S \cdot \frac{U_S^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \theta)$$



Se schimbă :

- unghiul intern θ ,
- curentul de sarcina I_S ,
- $\cos \varphi$.

Masina sincrona

Exemple de calcul

Date

O mașină sincronă având datele :

- puterea nominală $S_N = 2,5 \text{ MVA}$;
- tensiunea $U_{SN} = 6,3 \text{ kV}$;
- conexiunea înfășurărilor statorice : în stea ;
- factorul de putere $\cos \varphi_N = 0,8 \text{ ind}$
- numărul de poli $2p = 10$
- parametrii : $X_d = 9,5 \ \Omega$; $X_q = 6,25 \ \Omega$; $R_s = 0,5 \ \Omega$;

lucrează ca :generator la sarcina nominală ,

fiind excitată astfel ca unghiul intern de sarcină este $\theta = 15^\circ$.

Să se determine: a. t.e.m. indusă de fluxul de excitație,

b. capacitatea de supraîncărcare.

Parametrii

-curentul nominal

$$I_N = \frac{S_N}{3U_s} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 3,5} = 238 A$$

- impedanța longitudinală

$$Z_d = \sqrt{X_d^2 + R_s^2} = \sqrt{9,5^2 + 0,5^2} = 9,513 \Omega$$

$$\alpha_d = \arctg(9,5/0,5) = 86,99^\circ$$

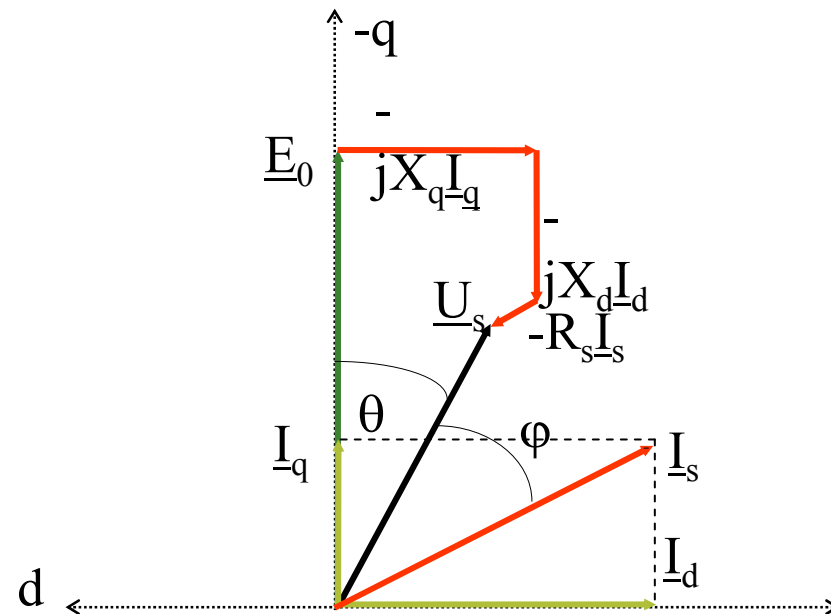
- impedanța transversală

$$Z_q = \sqrt{X_q^2 + R_s^2} = \sqrt{6,25^2 + 0,5^2} = 6,27 \Omega$$

$$\alpha_q = \arctg(6,25/0,5) = 85,43^\circ$$

Diagrama vectorială

- diagrama vectoriala a generatorului



$$E_0 = X_d I_d + R_s I_q + U_s \cos \theta$$

$$U_s \sin \theta = X_q I_q - R_s I_d$$

$$I_d = I \sin(\theta + \varphi) = I(\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi)$$

$$I_q = I \cos(\theta + \varphi) = I(\cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi)$$

$$I_d = 238 \cdot 0,7866 = 180,21 \text{ A}$$

$$I_q = 238 \cdot 0,6175 = 141,5 \text{ A}$$

- t.e.m. indusă $E_0 = X_d \cdot I_d + R \cdot I_q + U_s \cdot \cos \theta = 9,5 \cdot 180,2 + 0,5 \cdot 141,5 + 6300 \cdot 0,9659 / \sqrt{3}$

$$E_0 = 5296 \text{ V}$$

Puterea electromagnetică

- puterea activă debitată

$$P_u = 3 \cdot U_s I_s \cos \varphi = 3 \cdot 3,5 \cdot 0,238 \cdot 0,8 = 2,000 \quad MW$$

- puterea reactivă este debitată

$$Q = 3 \cdot U I_s \sin \varphi = 3 \cdot 3,5 \cdot 0,238 \cdot 0,6 = 1,500 \quad MVAr$$

- puterea aparentă a generatorului

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2,00^2 + 1,50^2} = 2,50 \quad MVA$$

- puterea electromagnetica in cazul neglijarii rezistentei statorului

$$P = mU_s \left[\frac{E_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right] =$$
$$= 3 \cdot 3637 \left[\frac{5232,7}{9,5} 0,25882 + \frac{3637}{2} \left(\frac{1}{6,25} - \frac{1}{9,5} \right) 0,5 \right] = 2,118 \quad MW$$

Puterea electromagnetică

- valoarea exactă a puterii electromagnetice se poate calcula cu relația

$$P = m E_p I_q = 3 \cdot 5,296 \cdot 141,5 = 2248 \text{ kW}$$

sau cu relația:

$$P = m \cdot \frac{U_s}{\cos \Delta \alpha} \left[\frac{\cos \theta}{Z_q} \left(U_s \cdot \cos(\alpha_d - \theta) + E_0 \cdot \cos \alpha_q \right) - \frac{\sin \theta}{Z_d} \left(U_s \cdot \sin(\alpha_q - \theta) - E_0 \cdot \sin \alpha_q \right) \right]$$

unde $\cos(\Delta \alpha) = \cos(\alpha_q - \alpha_d) = 0,9996$ rezultă:

$$P = 2,91 \text{ Mw}$$

- unghiul intern pentru care cuplul este maxim, în cazul neglijării rezistenței statorice, rezultă din condiția de cuplu sincronizant nul, care conduce la o ecuație de gradul doi

$$\cos^2 \theta_m + \frac{1}{2} \frac{E_0}{U_s} \frac{X_q}{X_d - X_q} \cos \theta_m - \frac{1}{2} = 0$$

Puterea maximă

Rezultă:

$$\cos \theta_m = -3,76535 + \sqrt{3,76535^2 + 0,5} = 0,295 \quad \theta \cong 72^{\circ}51'$$

- puterea maximă

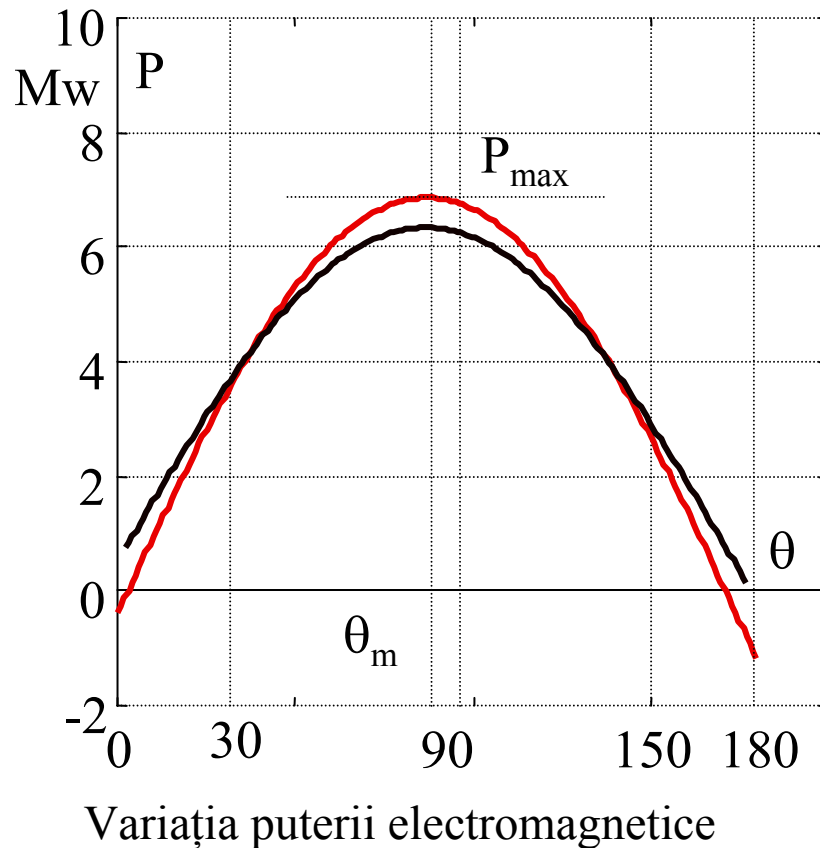
$$P_{\max} = 3U_s \left[\frac{E_0}{X_d} \sin \theta_m + \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta_m \right] =$$
$$= 3 \cdot 6,3 / \sqrt{3} \left[\frac{5,296}{9,5} 0,9961 + \frac{6,3}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1}{6,25} - \frac{1}{9,5} \right) 0,1751 \right] = 6,425 \text{ MW}$$

sau în cazul considerării rezistenței statorice

$$\theta_m = 69^{\circ} 37'$$

$$P_{\max} = 6,886 \text{ Mw}$$

Caracteristica cuplului



Se constată că există o diferență destul de mare între mărimile calculate cu relațiile simplificate (în cazul neglijării rezistenței) și exacte, deși puterea mașinii nu este prea mică.

- capacitatea de supraincarcare

$$\lambda = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{6,425}{2,118} = 3,034$$

$$\lambda = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{6.886}{2,91} = 2,367$$

Exemplul 2

O mașină sincronă având datele:

- puterea nominala $S = 10$ MVA;
- tensiunea $U_s = 11$ kV;
- conexiunea înfășurărilor statorice: în stea;
- $\cos\varphi = 0,8$
- și parametrii: $X_s = 16,5 \Omega$; $R_s = 1 \Omega$;
- $2p = 2$;
- caracteristica de mers în gol este dată în tabela:

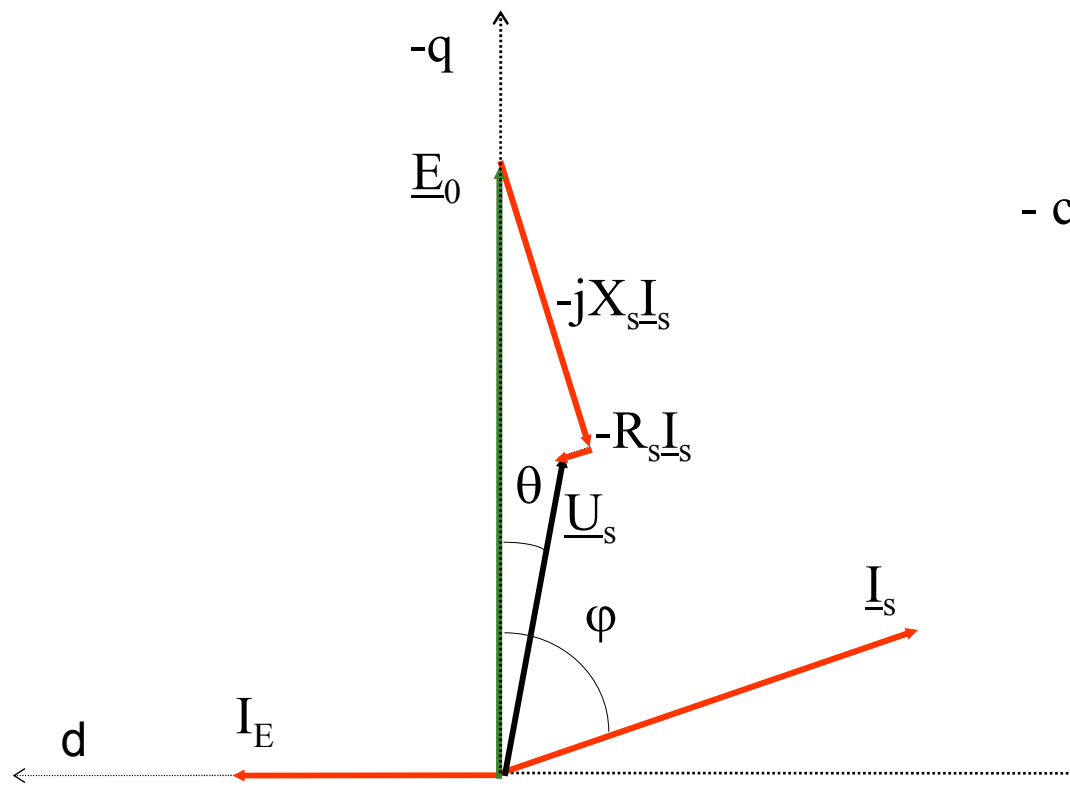
E_0	4.8	7.2	8.8	9.6	10.4	11.2	12	13	[kV]
I_E	22	33	42	49	60	86	134	200	[A]

Lucrează ca generator în sarcină debitând o putere $P = 8$ MW și $Q = 5$ MVar.
Să se calculeze: curentul de excitație, capacitatea de supraîncărcare.

Până la ce valoare trebuie redus i_E pentru ca generatorul să aibă factor de putere unitar. Care sunt parametrii energetici în acest caz.

Diagrama vectorială

- diagrama vectorială a generatorului



- factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{8}{\sqrt{8^2 + 5^2}} = 0,848$$

$$\varphi = 32^\circ$$

- curentul de sarcină al generatorului

$$I = \frac{P}{3U_s \cos \varphi} = \frac{8 \cdot 10^3}{3 \frac{11}{\sqrt{3}} 0,848} = 495,2 \text{ A}$$

- ecuațiile de tensiuni

$$E_0 \cos(\theta + \varphi) = U_s \cos \varphi + R_s I$$

$$E_0 \sin(\theta + \varphi) = U_s \sin \varphi + X_s I$$

Unghiul intern

- unghiul intern de sarcină

$$\operatorname{tg}(\theta + \varphi) = \frac{U_s \sin \varphi + X_s I}{U_s \cos \varphi + R_s I} = \frac{6350 \cdot 0,530 + 16,5 \cdot 495,2}{6350 \cdot 0,848 + 1 \cdot 495,2} = 1,962$$

$$\sin(\theta + \varphi) = \frac{\operatorname{tg}(\theta + \varphi)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\theta + \varphi)}} = 0,8909$$

$$\cos(\theta + \varphi) = 0,4541$$

- t.e.m. indusă de fluxul inductor

$$E_0 = \frac{U_s \cos \varphi + R_s I}{\sin(\theta + \varphi)} = \frac{6350 \cdot 0,53 + 16,5 \cdot 495,2}{0,8909} = 12.949V$$

din tabel, prin aproximare liniară rezultă $I_E = 196,6$ A

E_0	4.8	7.2	8.8	9.6	10.4	11.2	12	13	[kV]
I_E	22	33	42	49	60	86	134	200	[A]

Puterea electromagnetică

impedanța mașinii sincrone

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{1^2 + 16,5^2} = 16,53 \Omega$$

$$\alpha = \arctg(16,5/ 1) = 86^\circ 30'$$

- puterea electromagnetică in cazul neglijarii rezistentei

$$P_{em} = m \frac{U_s E_0}{Z_s} \sin \theta = 3 \frac{6,35 \cdot 12,949}{16,53} 0,5657 = 7,696 \text{ MW}$$

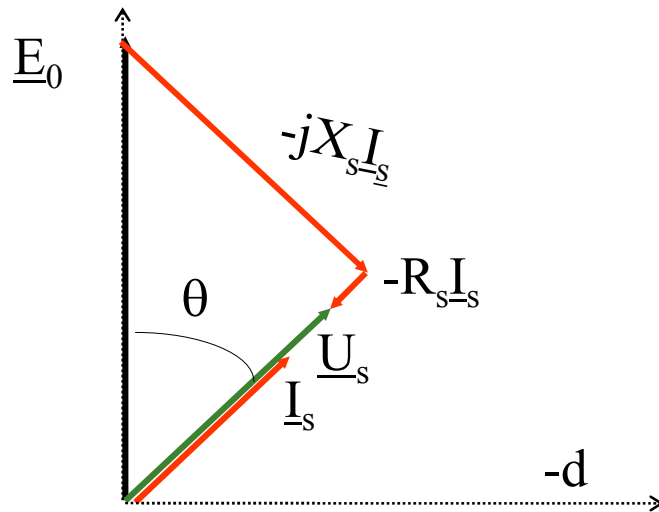
- capacitatea de supraîncărcare $\lambda = \frac{1}{\sin \theta} = \frac{1}{0,53} = 1,887$

- puterea electromagnetică

$$P_{em} = m \left[\frac{U_s E_0}{Z_s} \cos(\alpha - \theta) + \frac{U_s^2}{Z_s} \cos \alpha \right] = 3 \left[\frac{6,35 \cdot 12,949}{16,53} 0,5657 + \frac{6,35^2}{16,53} 0,0605 \right] = 8,886 \text{ MW}$$

Diagrama vectorială

- diagrama vectorială la factor de putere unitar



- rezultă din curentul de sarcină:

$$I = \frac{p}{mU_s} = \frac{8 \cdot 10^3}{3 \cdot 6,35} = 403,98 \text{ A}$$

- ecuațiile de tensiune în acest caz

$$E_0 \sin \theta = X_s I$$

$$E_0 \cos \theta = U + RI$$

- considerând aceeași putere debitată $P = 8 \text{ MW}$

- unghiul intern de sarcină

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X_s I}{U + RI} = \frac{16,5 \cdot 404}{6350 + 1 \cdot 404} = 1,151$$

$$\sin \theta = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}} = 0,755$$

$$\cos \theta = 0,656$$

$$\theta \cong 49^{\circ} 04'$$

Puterea electromagnetică

- t.e.m. indusă

$$E_0 = \frac{E_0 \sin \theta}{\sin \theta} = \frac{6,9291}{0,755} \cdot 10^3 = 8829 \quad V$$

rezultă curentul de excitație $i_E = 50,2 \text{ A}$

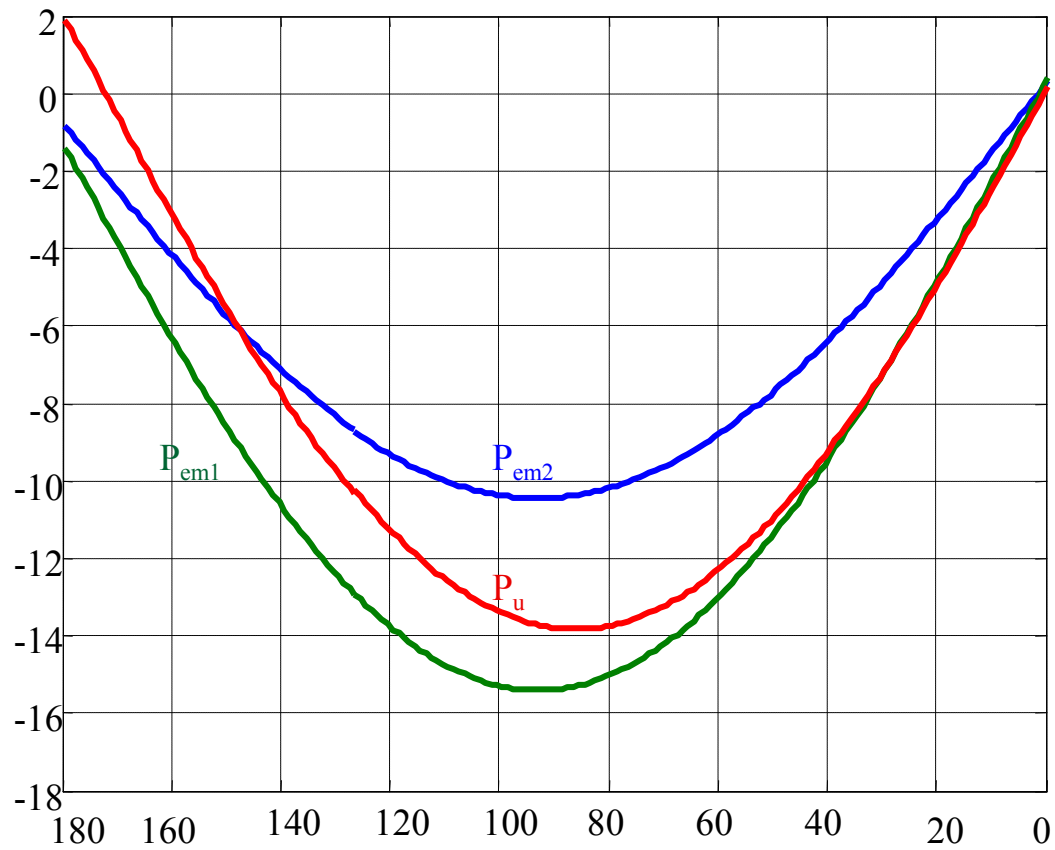
-puterea electromagnetică la $\alpha - \theta = 30^\circ 50'$

$$P_{em} = 3 \left[\frac{6,35 \cdot 8,829}{16,53} 0,775 + \frac{6,35^2}{16,53} 0,0605 \right] = 8,515 \quad MW$$

- puterea electromagnetică maximă pentru $\alpha = \theta$

$$P_{em \max} = 3 \left[\frac{6,35 \cdot 8,829}{16,53} + \frac{6,35^2}{16,53} 0,0605 \right] = 10,6 \quad MW$$

Caracteristica cuplului



$I_E=196,6 \text{ A}$

$i_E=50,2 \text{ A}$

Caracteristica cuplului în cele două cazuri

Exemplul 3

Un motor sincron trifazat cu 8 poli, având înfășurările statorice legate în stea și impedanța

$$\underline{Z}_s = 0,7 + j6,6 \Omega$$

Este excitat astfel încât

$$E_p = 4500 \text{ V}$$

Motorul este alimentat de la o rețea având :

$$U_s = 6 \text{ kV}$$

și $f = 50\text{Hz}$ și absoarbe $P_a = 2500 \text{ kW}$.

Să se calculeze: cuplul electromagnetic, factorul de putere, randamentul dacă pierderile mecanice și de excitație sunt :

$$p_m + p_E = 45 \text{ kW}$$

Ce t.e.m. trebuie să aibe motorul pentru a avea la $I = 150 \text{ A}$ factor de putere unitar.

Diagrama vectorială

Impedanța motorului

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{0,7^2 + 6,6^2} = 6,632 \quad \Omega$$

$$\alpha_s = \arctg\left(\frac{0,7}{6,6}\right) = 0,106 \text{ rad} = 6^\circ 3'$$

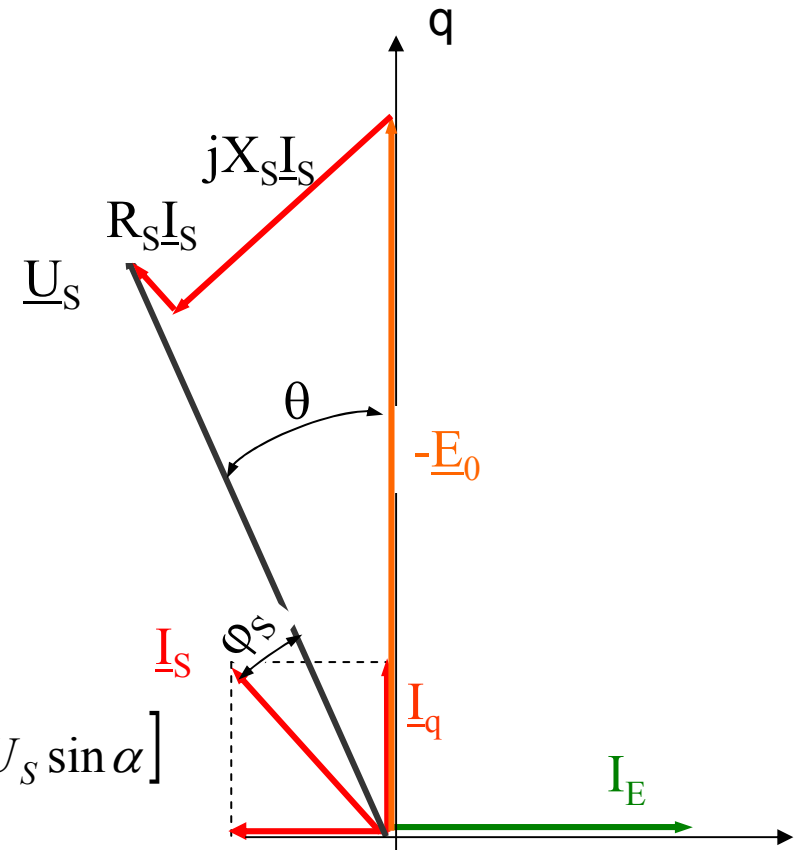
Puterea absorbită se poate calcula, în cazul considerării rezistenței satorice cu relația:

$$P = mU_s (I_q \cos \theta - I_d \sin \theta) = m \frac{U_s}{Z_s} [E_p \sin(\theta + \alpha) - U_s \sin \alpha]$$

Rezultă:

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{PZ_s}{mU_s E_p} - \frac{U_s}{E_p} \sin \alpha = \frac{2500 \cdot 6,637}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 4500} - \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 4500} 0,10547 = 0,27361$$

$$\theta = 0,383 \text{ rad} = 21^\circ 56'$$



Curentul și factorul de putere

Puterea electromagnetă

$$P_{em} = mE_p \cdot I_{sq} = mE_p \left[\frac{U_S}{Z_S} \sin(\theta + \alpha) - \frac{E_p}{Z_S} \sin \alpha \right]$$

$$P = 3 \frac{4,5}{6,637} [3,464 \cdot \sin(0,383 + 0,106) - 4,5 \cdot \sin(0,106)] = 2,341 \text{ Mw}$$

Din triunghiul tensiunilor rezultă:

$$\underline{I}_S = \frac{\underline{U}_S - \underline{E}_p e^{-j\theta}}{\underline{Z}_S} = \frac{U_S - E_p \cos \theta + jE_p \sin \theta}{R_S + jX_S}$$

$$\underline{I}_S = \frac{(3,464 - 4,5 \cdot \cos(0,383)) + j4,5 \cdot \sin(0,383)}{(0,7 + j6,6)} = 0,241 + j0,133 \text{ A}$$

Factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{\Re \{ \underline{I} \}}{I} = \frac{240,5}{274,8} = 0,875 \quad \cos \varphi \text{ capacitiv}$$

Bilanțul puterilor

Puterea activă

$$P = mU_s I \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 240,5 = 2499,3 \text{ kW} \cong 2,5 \text{ Mw}$$

Puterea reactivă

$$Q = mU_s I \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 133 = 1382,1 \text{ kVAr}$$

Puterea utilă

$$P_u = P - (p_m + p_E) = 2342,5 - 45 = 2297,5 \text{ kW}$$

randamentul

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{2297,5}{2500} = 91,9\%$$

Diagrama pentru factor de putere unitar

Din diagrama vectorială la $\cos\varphi=1$ rezultă

$$U_S = E_p \cos\theta + R_S \cdot I$$

$$E_p \sin\theta = X_S \cdot I$$

Se poate determina unghiul de sarcină la curentul dat

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{X_S}{\frac{U_S}{I} - R_S} = \frac{6,6}{\frac{6}{0,15 \cdot \sqrt{3}} - 0,7} = 0,295$$

$$\theta = 0,287 \text{ rad} = 16^{\circ}25'$$

T.e.m.indusă de fluxul de excitație

$$E_p = \frac{X_S I}{\sin\theta} = \frac{6,6 \cdot 150}{0,287} = 3502 \text{ V}$$

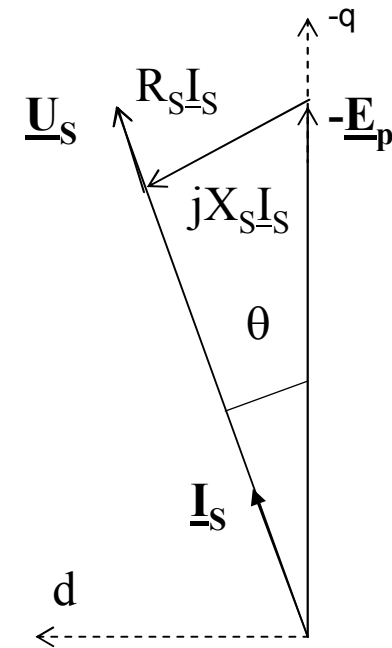


Diagrama vectorială
la $\cos\varphi = 1$.

Puterea absorbită și electromagnetică

Puterea absorbită

$$P_a = mU_S I_S \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 150 = 1559 \text{ kW}$$

$$P_a = m \frac{U_S}{Z_S} [E_p \sin(\theta - \alpha) + U_S \sin \alpha] = 3 \frac{3,464}{6,67} [3,502 \cdot \sin(0,287 - 0,106) + 3,464 \cdot \sin(0,106)] = 1,559 \text{ Mw}$$

Puterea electromagnetică

$$P_{em} = mE_p \left[\frac{U_S}{Z_S} \sin(\theta + \alpha) - \frac{E_p}{Z_S} \sin \alpha \right]$$

$$P_{em} = 3 \frac{3,502}{6,637} [3,464 \cdot \sin(0,287 + 0,106) - 3,5 \cdot \sin(0,106)] = 1,512 \text{ Mw}$$

$$P_{em} = m \cdot E_p \cdot I \cdot \cos(\theta) = 3 \cdot 3,502 \cdot 0,15 \cdot \cos(0,287) = 1,512 \text{ Mw}$$