

---

# MAȘINA SINCRONĂ

---

Construcția și funcționarea

---

## Tipuri constructive

Hidrogenatoare                      600 MVA                       $p_{\max} = 44$                        $n = 50/44$  r/sec

Turbogeneratoare                      1500 MVA                       $p = 1..2$

Generatoare sincrone pentru grupuri electrogene                      100 MVA

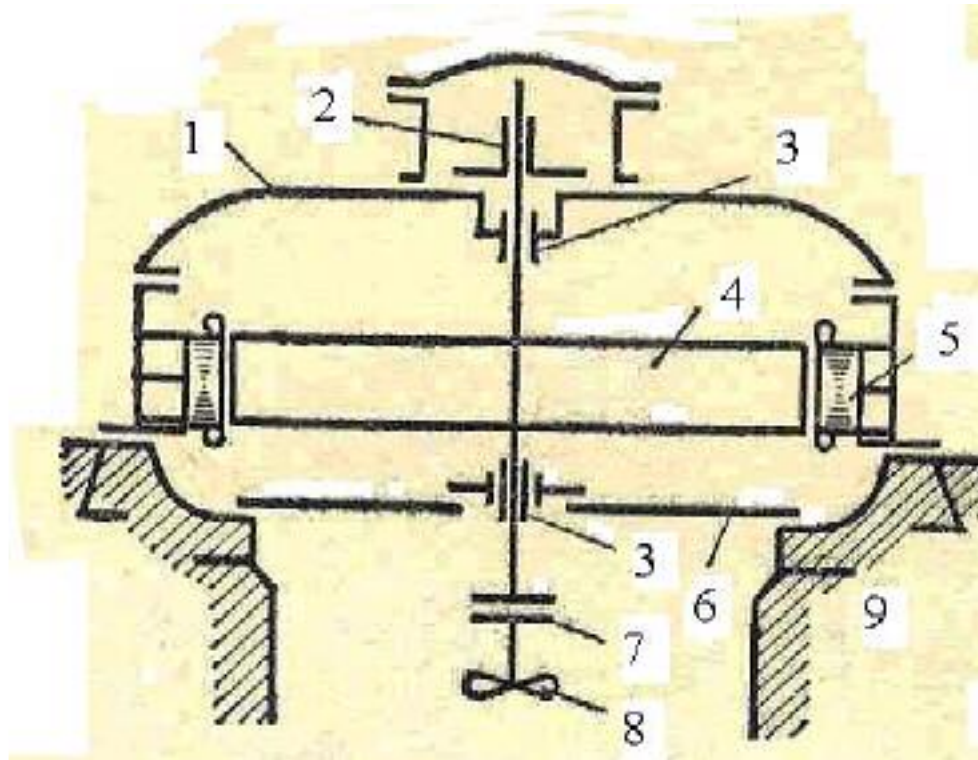
Motoare sincrone                      10 MVA

Alte tipuri constructive

---

# Tipuri de hidrogenatoare

## Suspendat



1- carcasa

2- lagăr de susținere

3- lagăr de ghidare

4- rotor

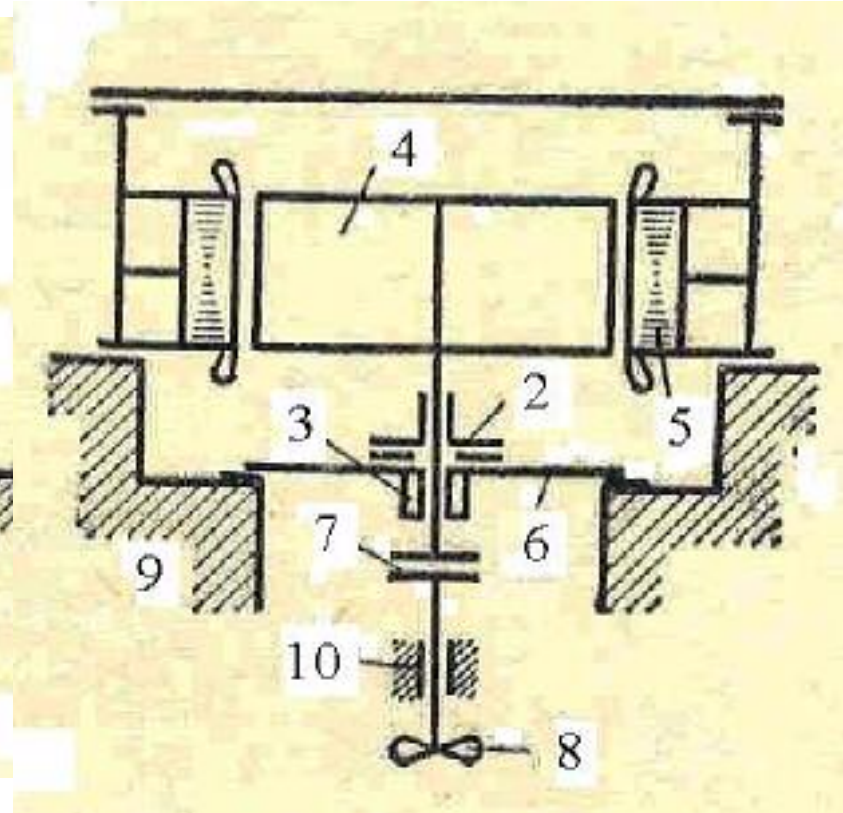
5- stator

6- planseu de separare

7- cuplaj

8- turbina

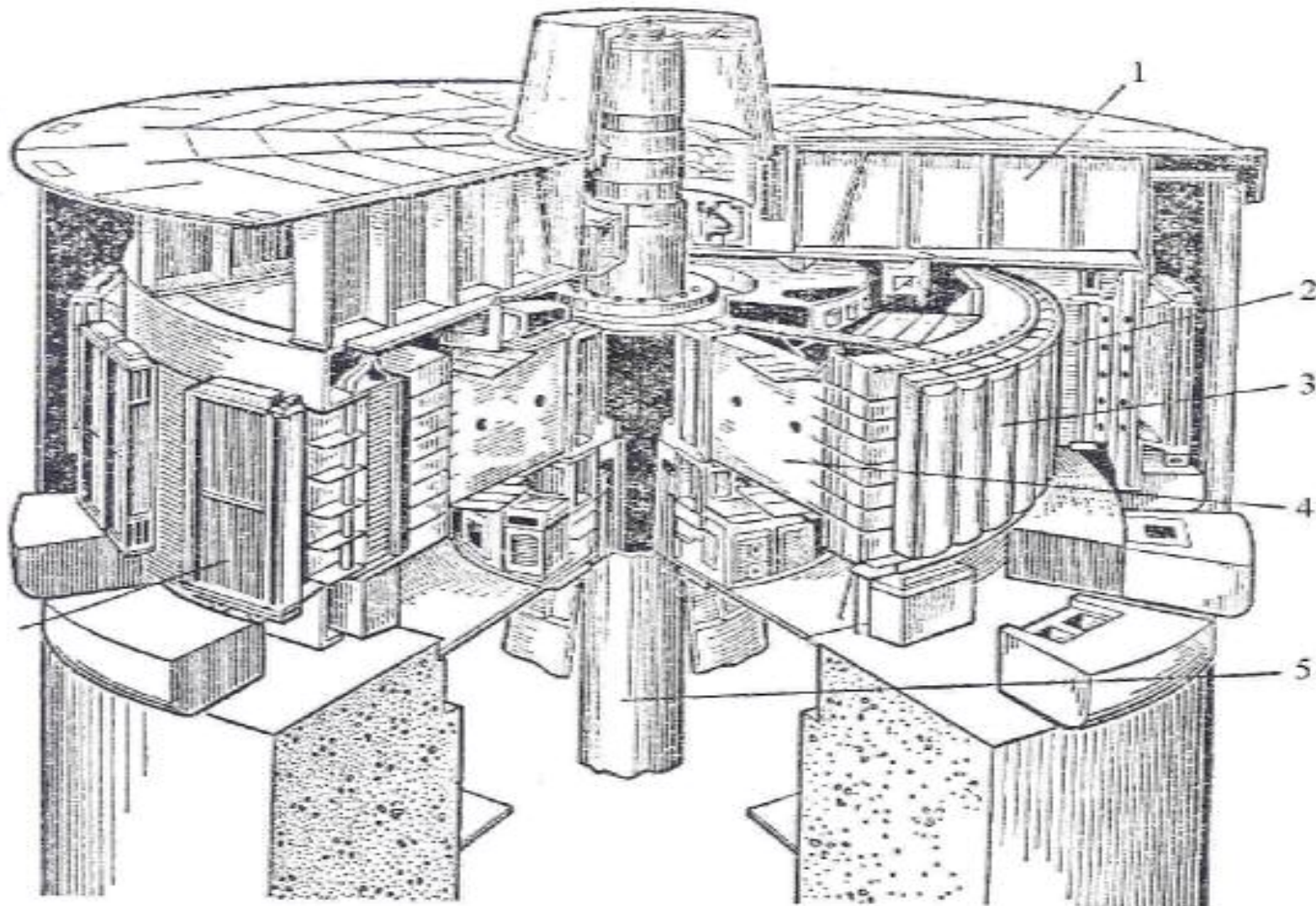
## Umbrelă



9- fundația

10- lagărul turbinei

## Hidrogenerator cu ax vertical tip umbrelă



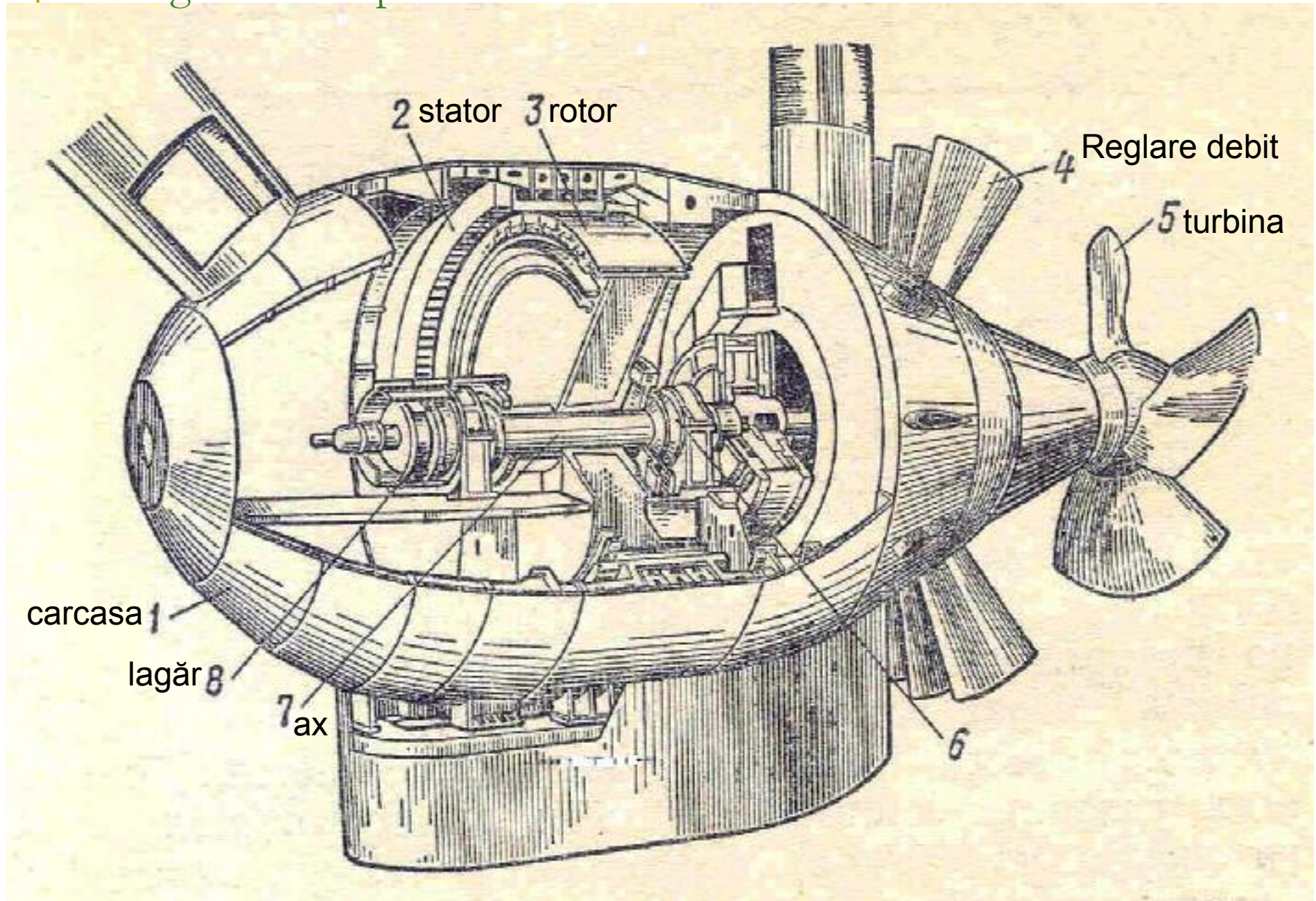
1- sistem de ventilație,  
4- butuc,

2- statorul(indusul),  
5- axul,

3- polii rotorului

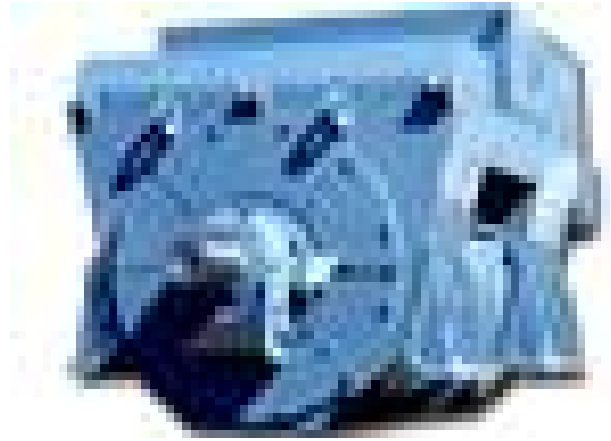


# Hidrogenator tip bulb



---

## Generatoare sincrone pentru grupuri electrogene



Generator sincron actionat  
cu motor Diesel sau cu gaz

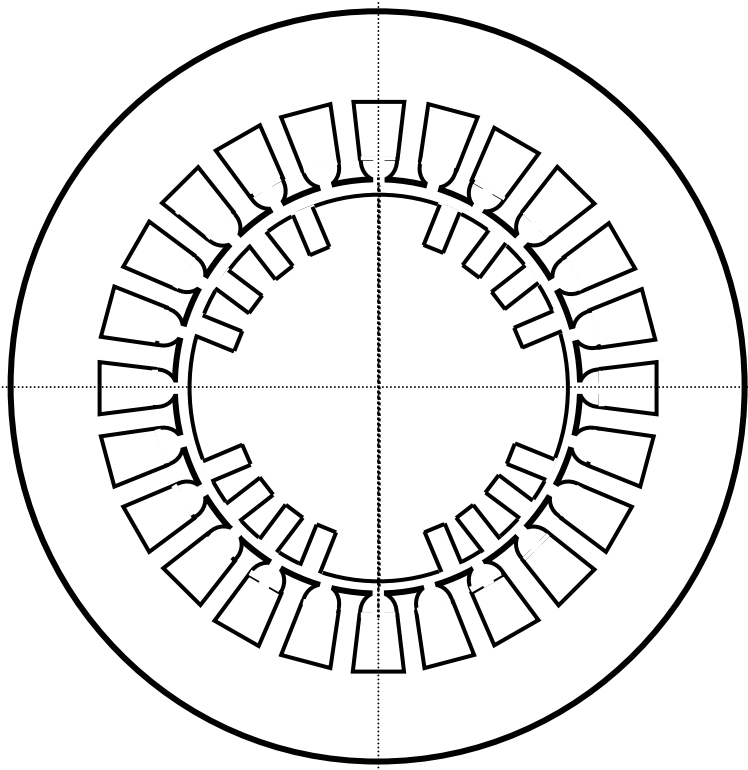


Generator sincron actionat  
cu turbina cu gaz



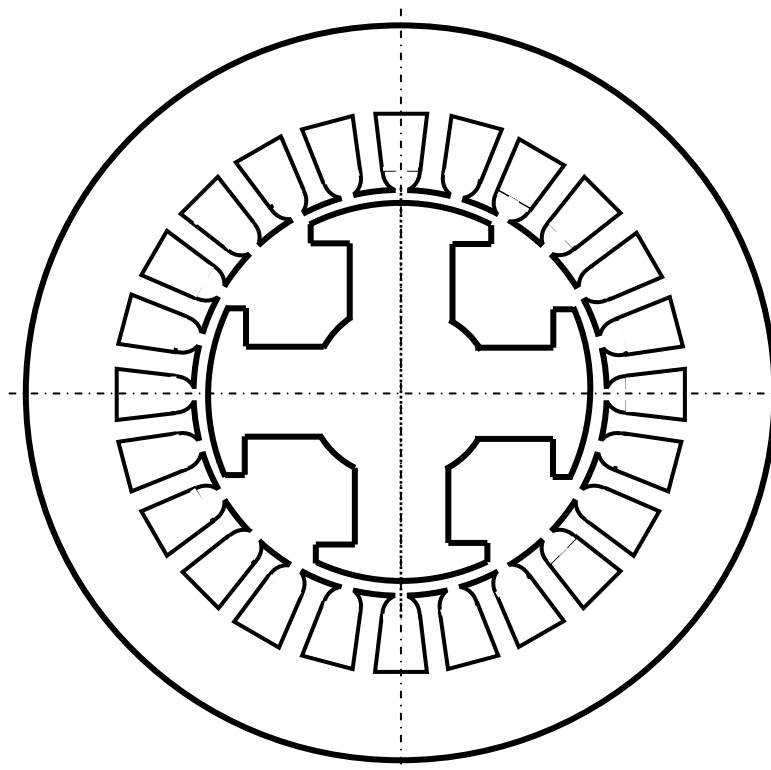
# Tipul circuitului magnetic

Cu întrefier constant



Cu poli înecați

Cu întrefier variabil

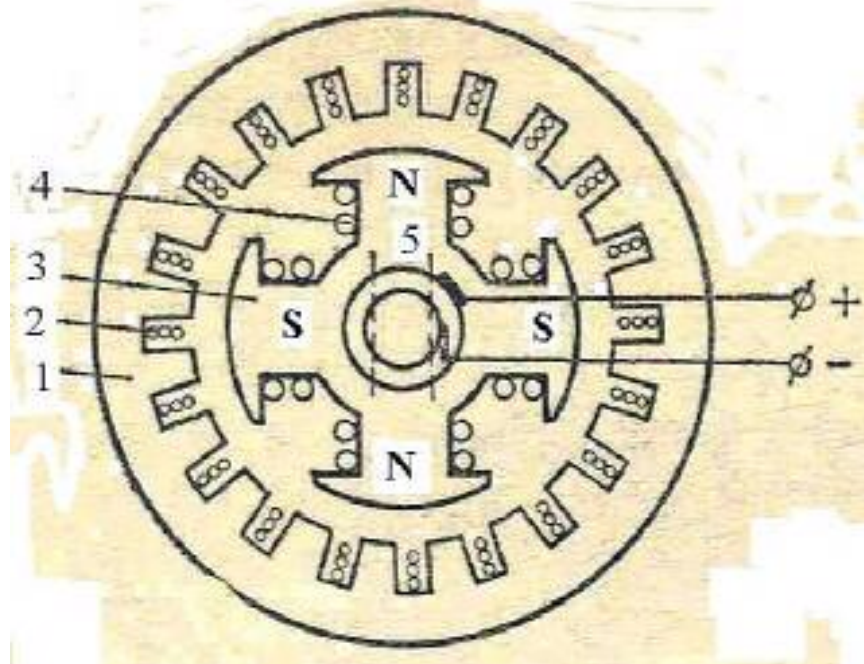


Cu poli aparenti

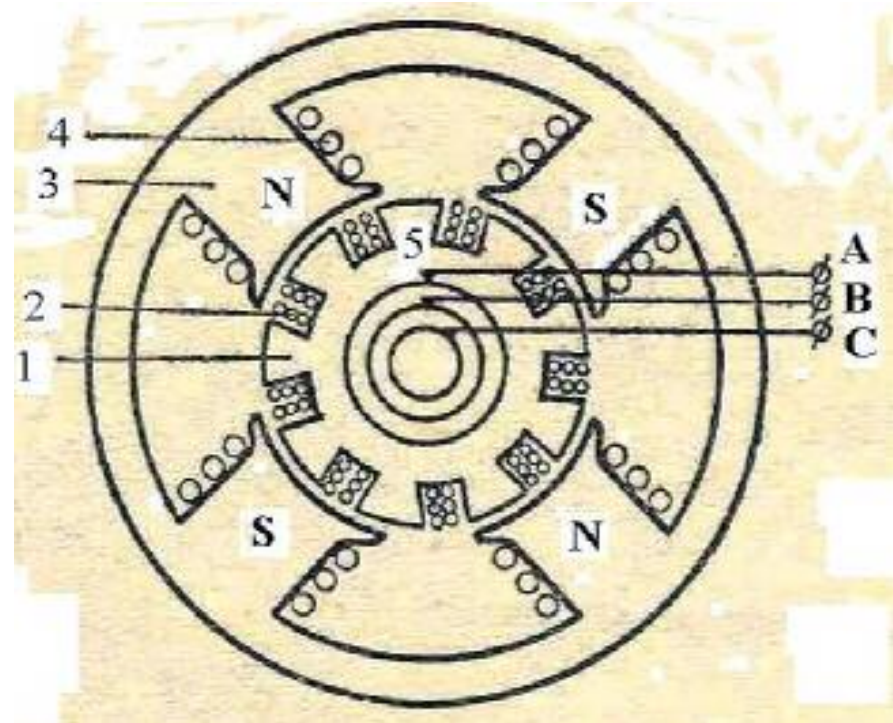


# Tipuri constructive

## Cu poli aparenti



Pe rotor



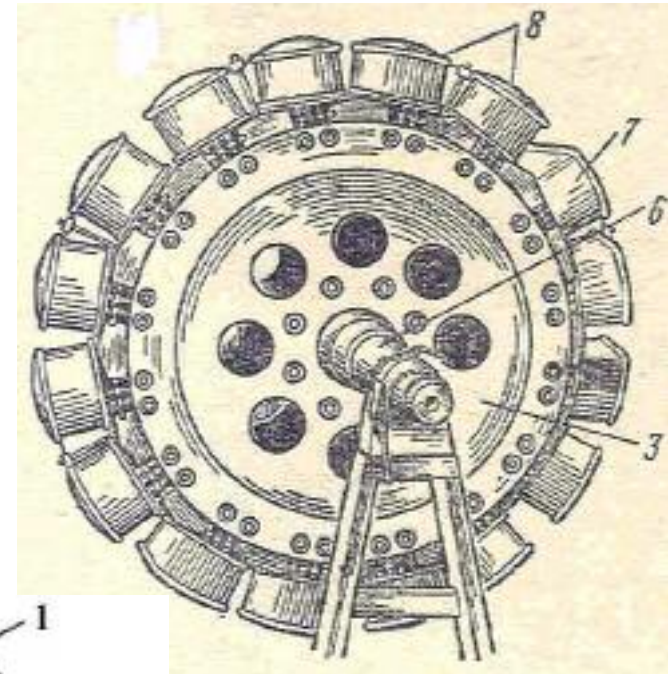
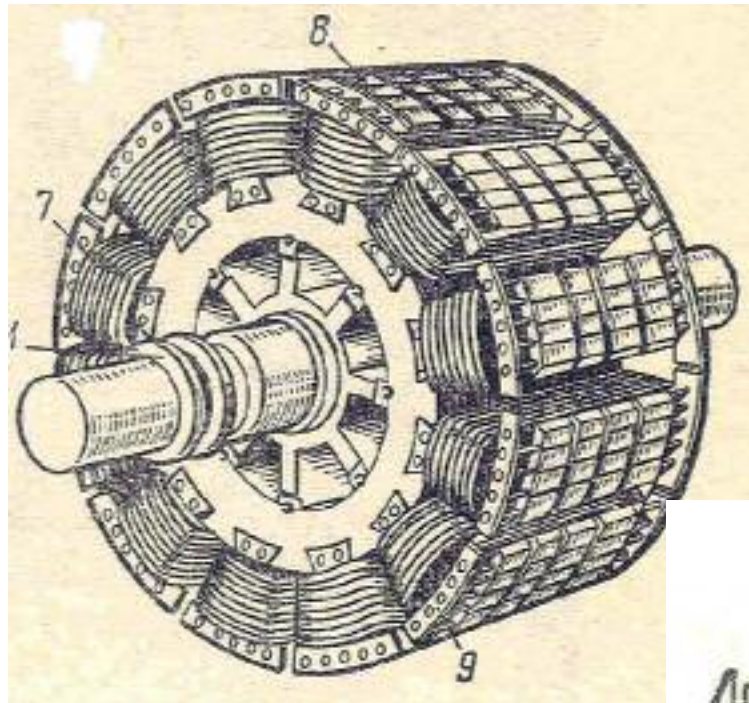
Pe stator

1-indus; 2- înfășurare indusă; 3- poli; 4- înfășurare inductoare (excitație)

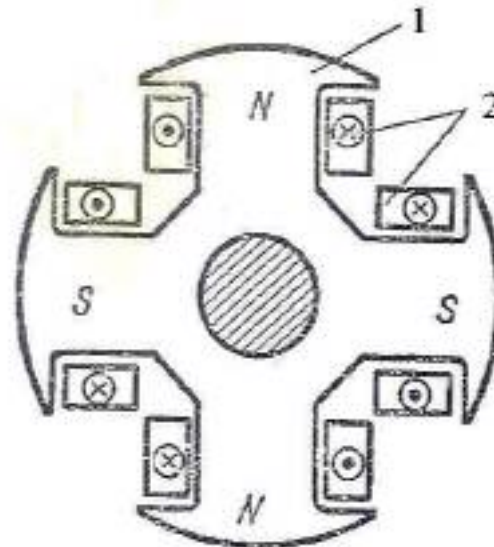


# Tipuri de rotoare de generator sincron

Cu poli aparenti



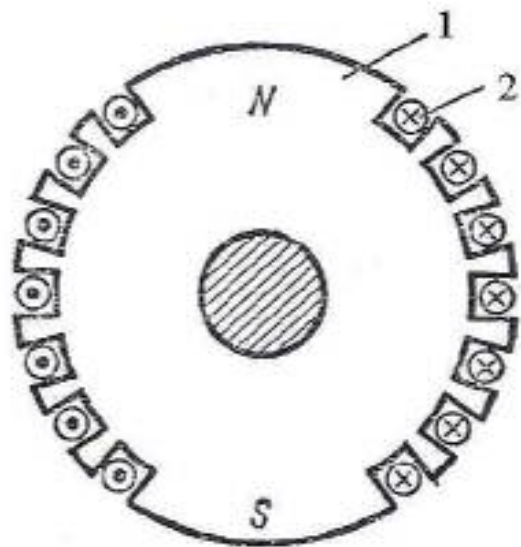
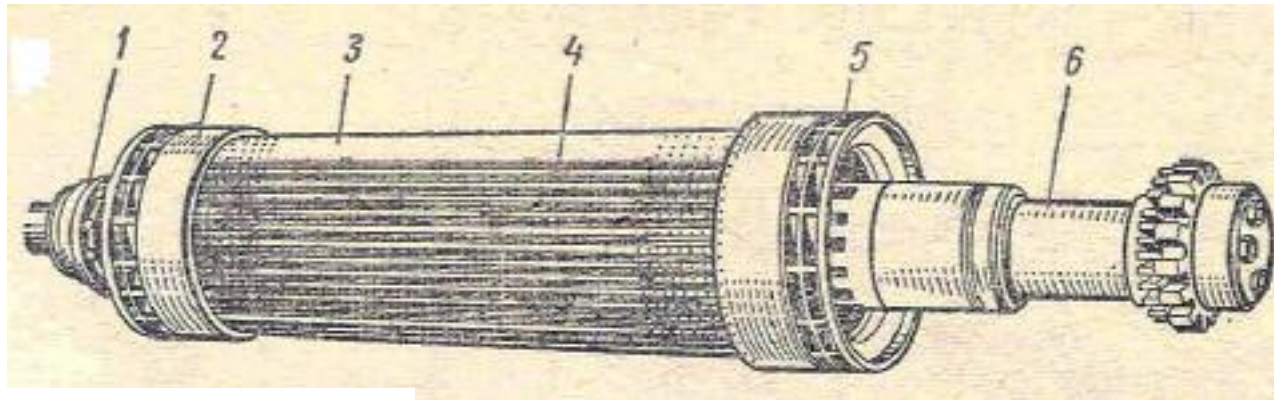
- 1- inele
- 3- butuc
- 6- ax
- 7- înfășurare excitație
- 8- bare
- 9- segmente de inel



- 1- pol ;
- 2 - înfășurare

# Tipuri de rotoare de generator sincron

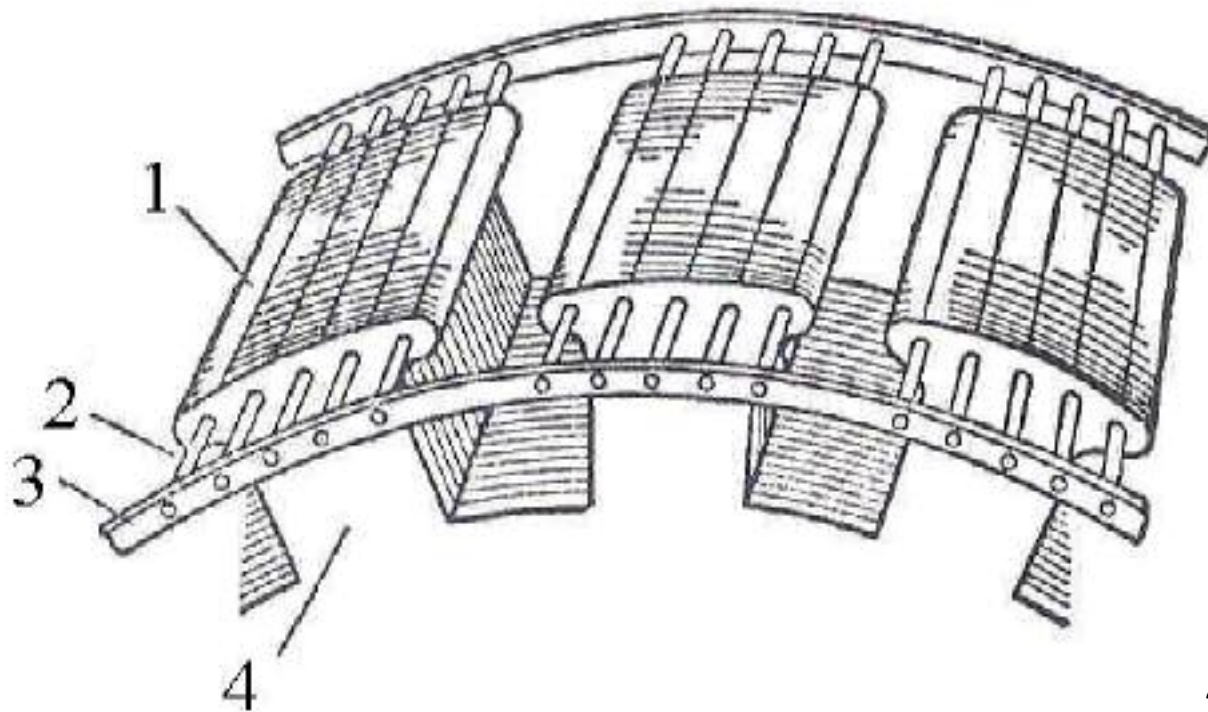
Cu poli înecați



- 1- inele
- 2- bandaj
- 3- dinte mare
- 4- crestături
- 5- capete de bobină excitație
- 6- ax

1 – dinte mare ; 2 - înfășurare

## Înfășurarea de amortizare



1 – talpa polului

2 - bara

3 – inel de scurtcircuitare

Înfășurare în colivie de obicei **nesimetrică**

4 - polul



---

## Sistemele de excitație

Cerințe :

- Variația în limite largi a curentului de excitație
- Variația rapidă a curentului de excitație
- Reglajul automat al curentului de excitație

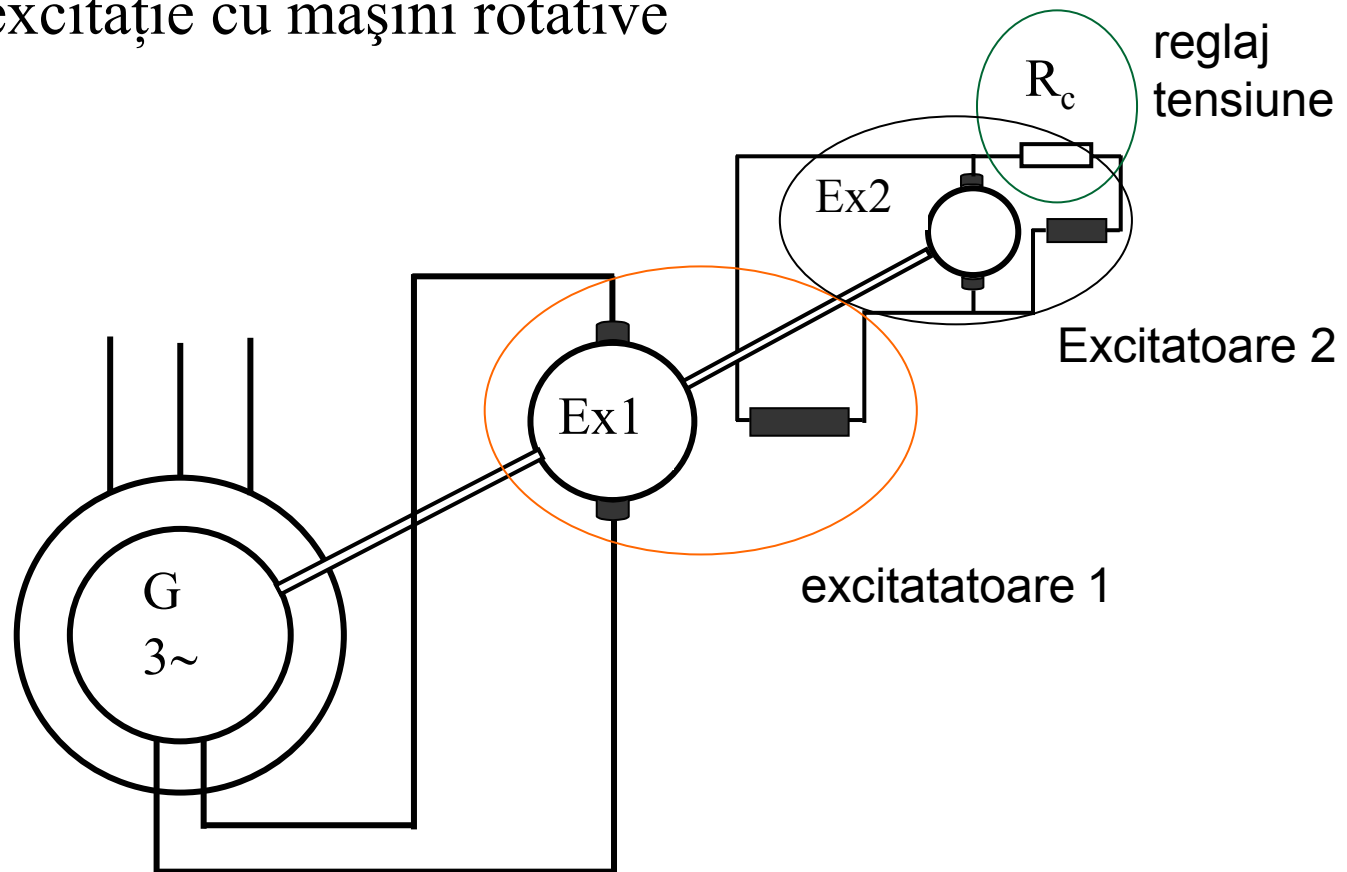
Posibilități de realizare :

- \* Mașini rotative - excitatoare
  - \* Mașini rotative și elemente statice
  - \* Elemente statice
-

# Sistemele de excitație

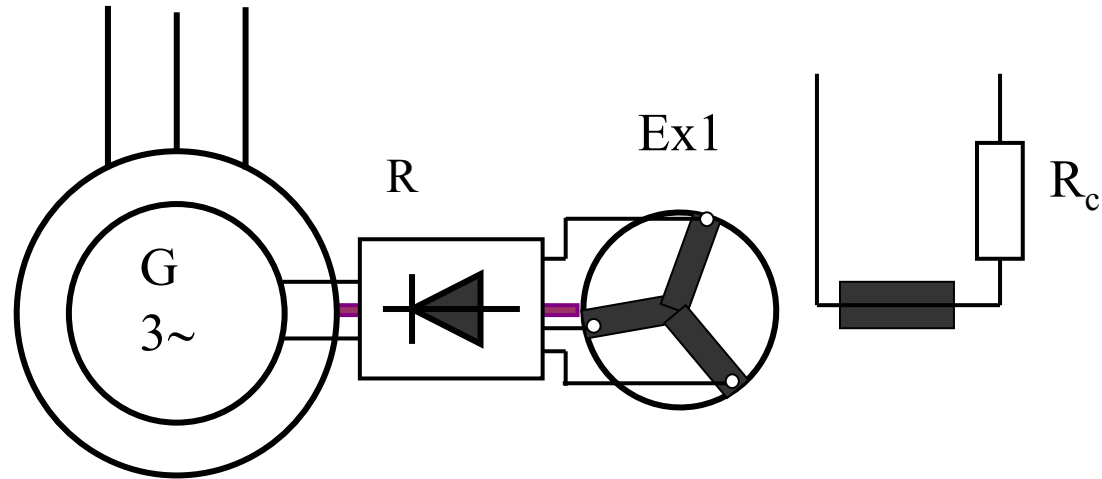
## Scheme de excitație cu mașini rotative

$$P = k^{n+1} \cdot P_r$$

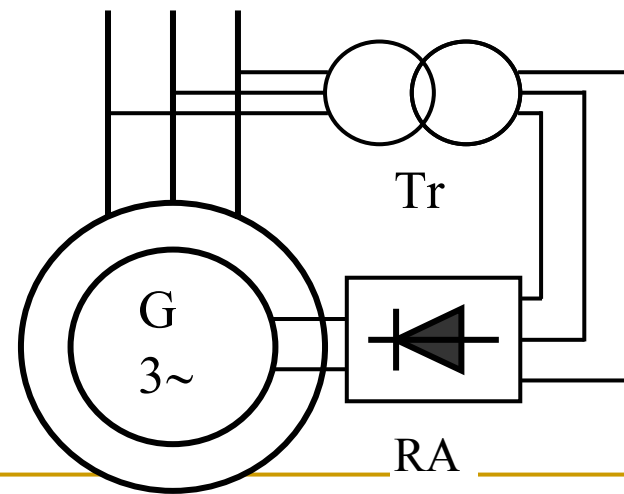


## Sistemele de excitație

Schema de excitație cu mașini rotative și elemente statice



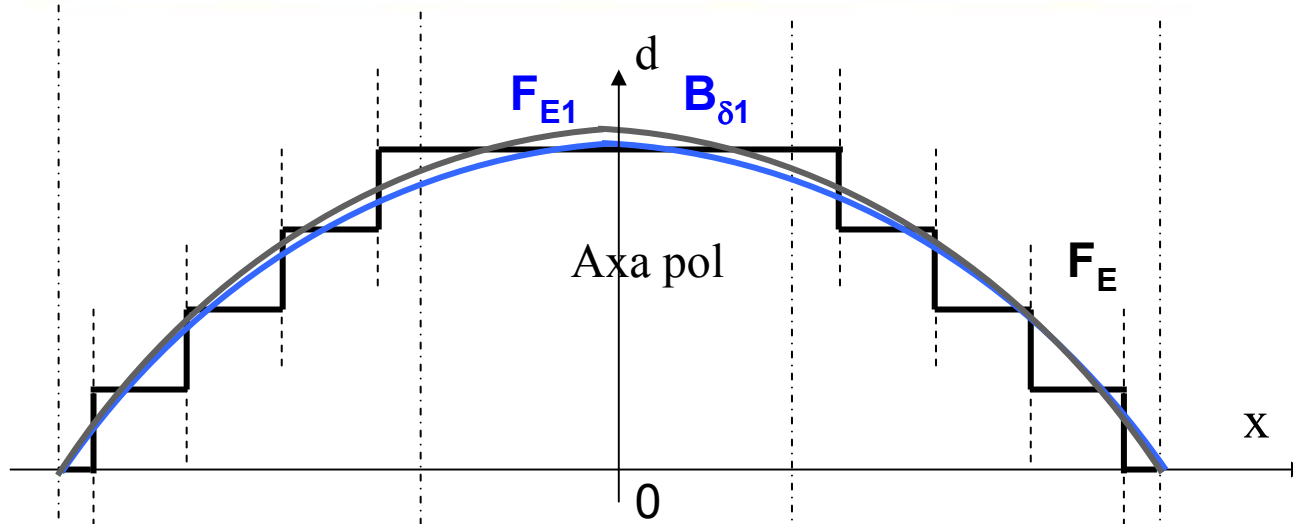
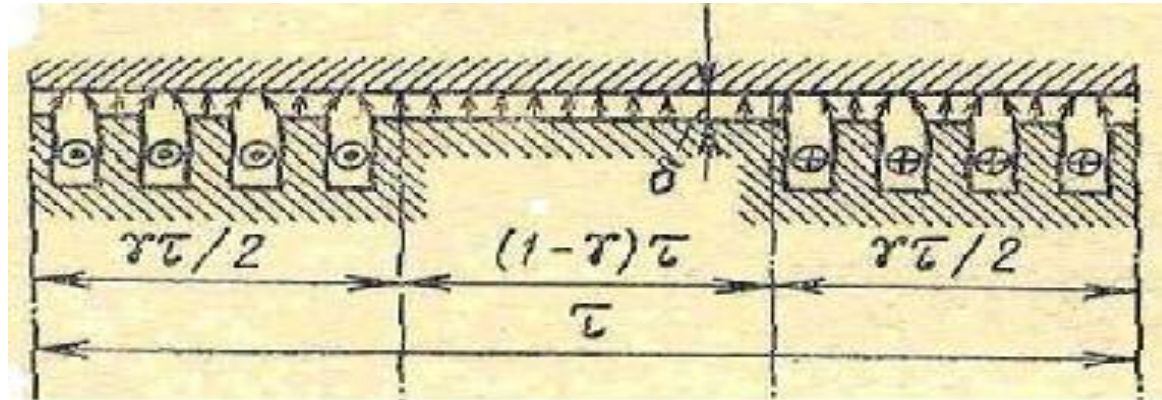
Schema de excitație cu elemente statice





# Câmpul magnetic în întrefierul mașinii cu poli plini

Câmpul de excitație



Prima armonică a inducției magnetice  $B_{\delta 1}$

Înfășurarea de excitație repartizată în crestături este parcursă de curent continuu  $I_E$

Spațiul ocupat de crestături  $\gamma\tau$

Solenanța produsă  $F_E$  variază în dreptul crestăturilor.

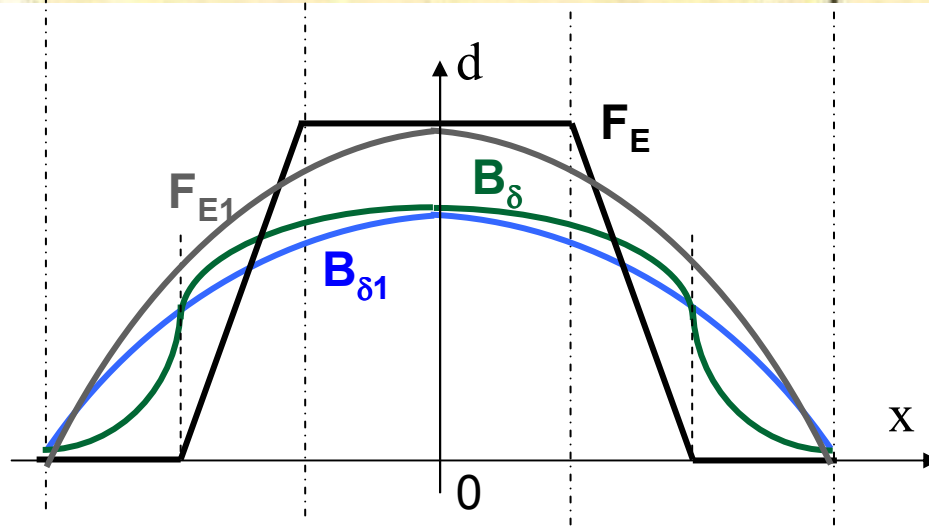
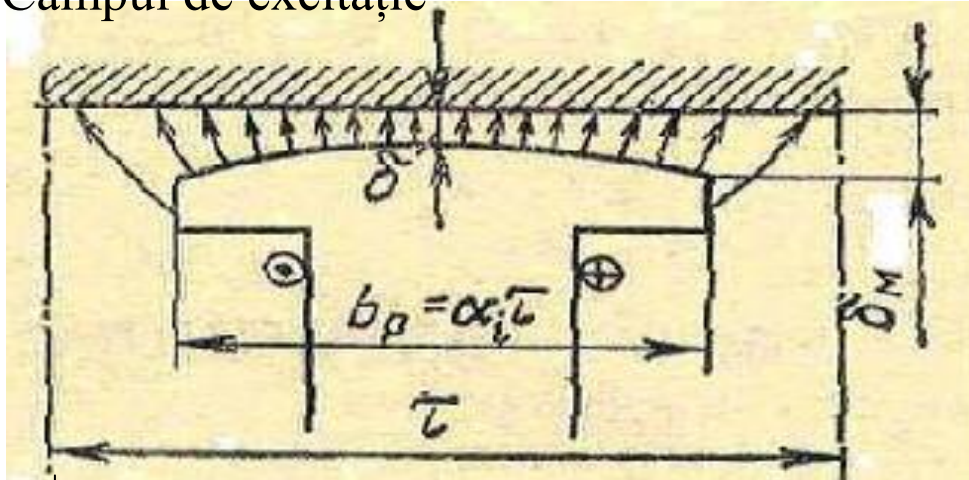
Are valoare maximă pe axa înfășurării de excitație.

$$\delta = \text{constant}$$

$$B_{\delta} = \mu_0 \frac{F_E}{\delta'}$$

# Câmpul magnetic în întrefierul mașinii cu poli aparenti

Câmpul de excitație



Înfășurarea de excitație concentrată pe poli este parcursă de curent continuu  $I_E$

Solenția produsă  $F_E$  variază în dreptul înfășurării.

Are valoare maximă pe axa înfășurării de excitație.

Prima armonică a solenției  $F_{E1}$

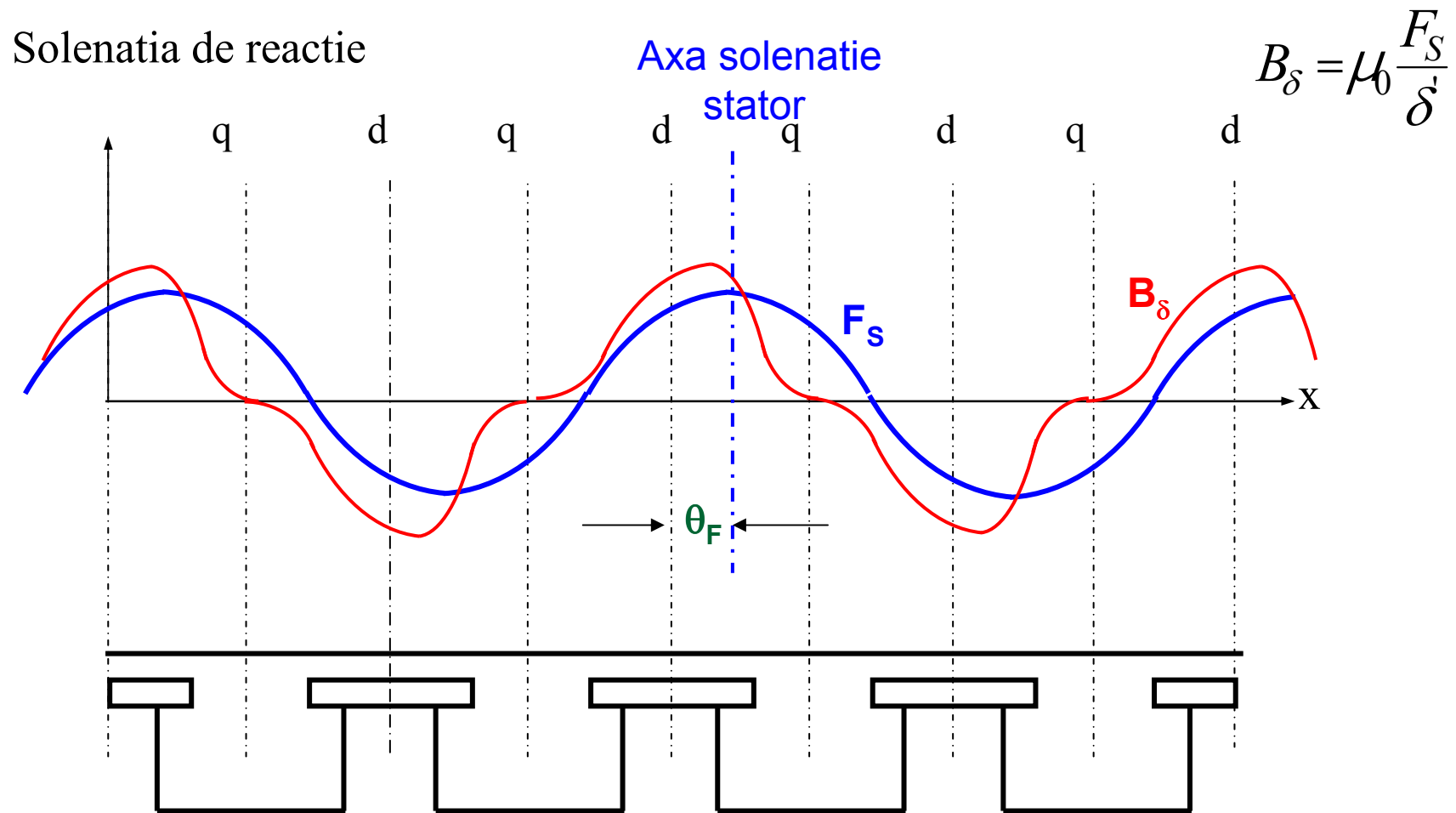
$\delta = \text{variabil}; \delta_m \text{ și } \delta_M$

Inducția magnetică

$$B_\delta = \mu_0 \frac{F_E}{\delta'}$$

Prima armonică a inducției magnetice

## Câmpul magnetic la mașinile cu poli aparenti.



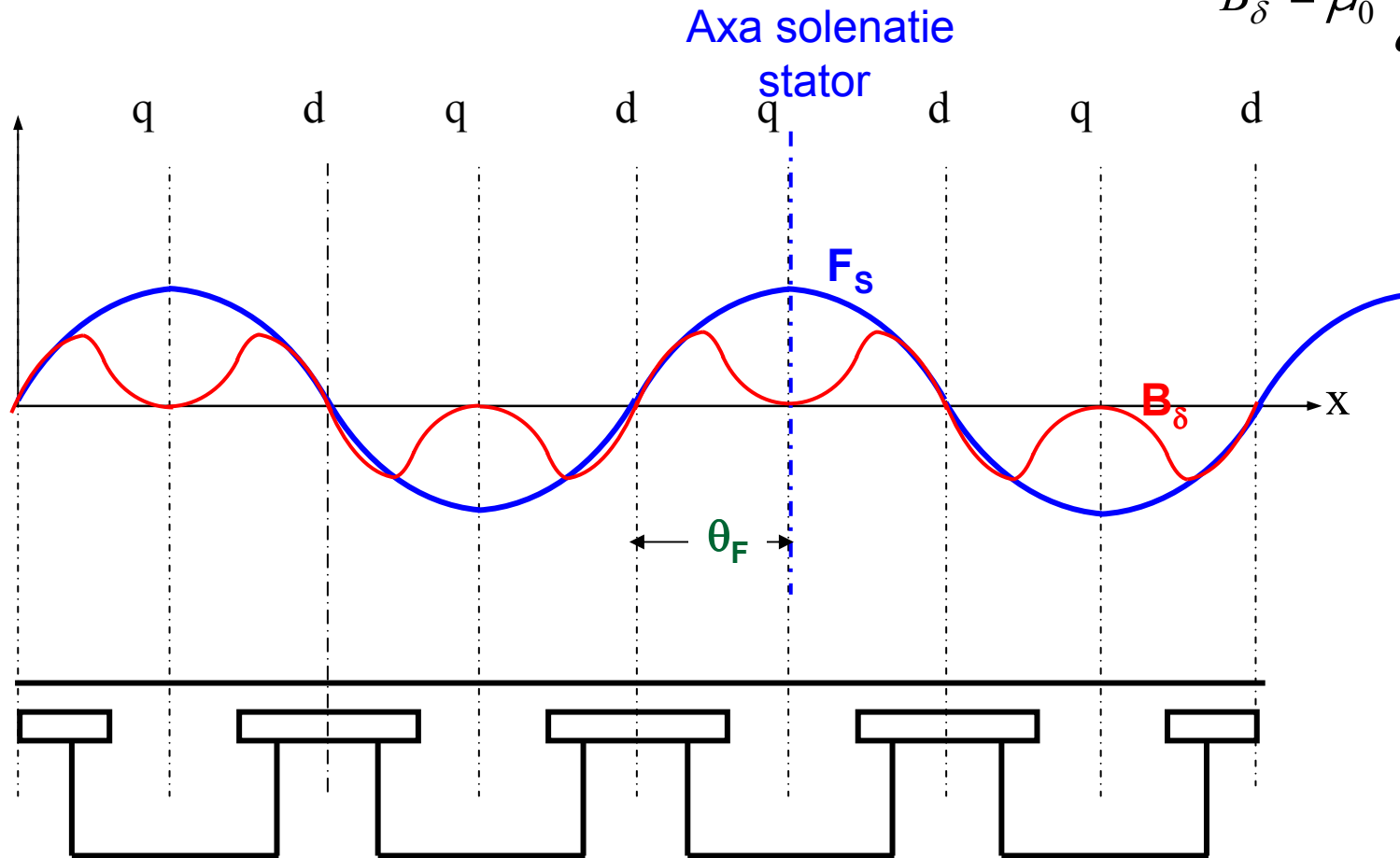
Câmpul magnetic determinat de solenația de reacție **nu variază sinusoidal**



## Câmpul magnetic la mașinile cu poli aparenti.

Solenția de reacție la  $\theta_F = \pi/2$

$$B_\delta = \mu_0 \frac{F_S}{\delta'}$$

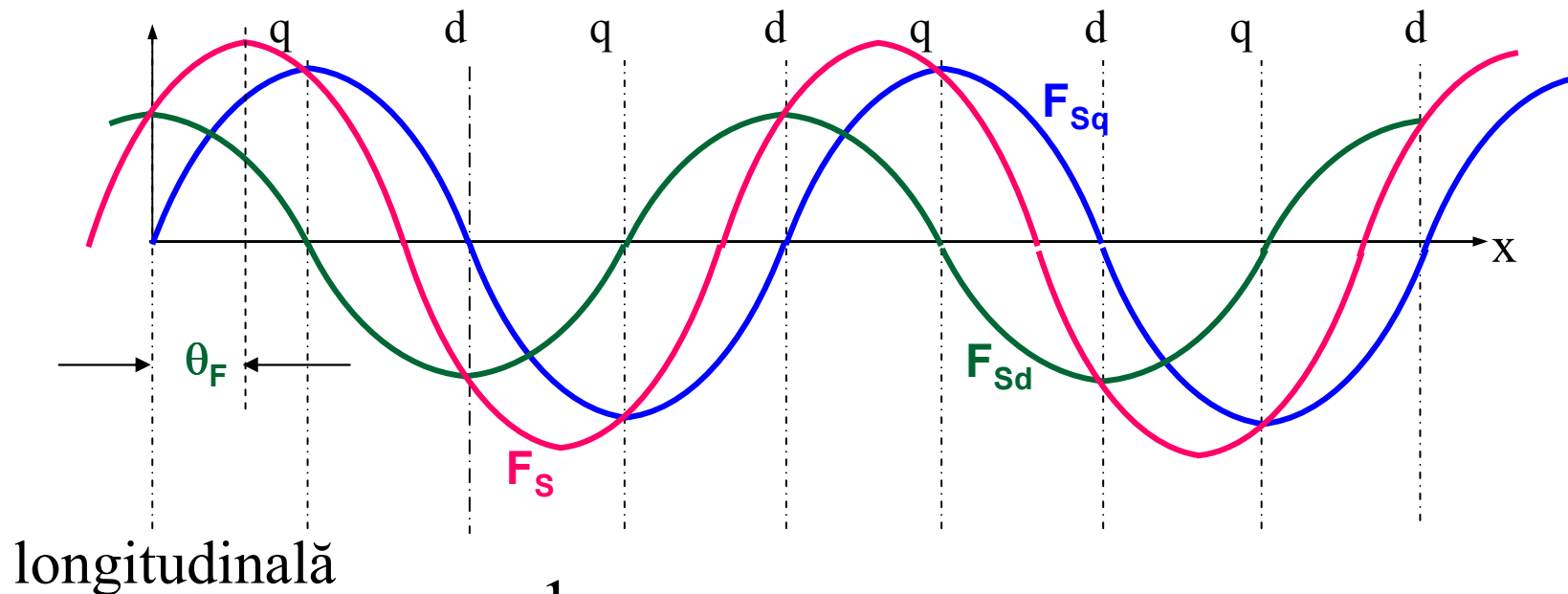


Forma inducției magnetice variază cu unghiul  $\theta$

## Solenatiile mașinii sincrone

Se poate defini solenația de reacție : transversală

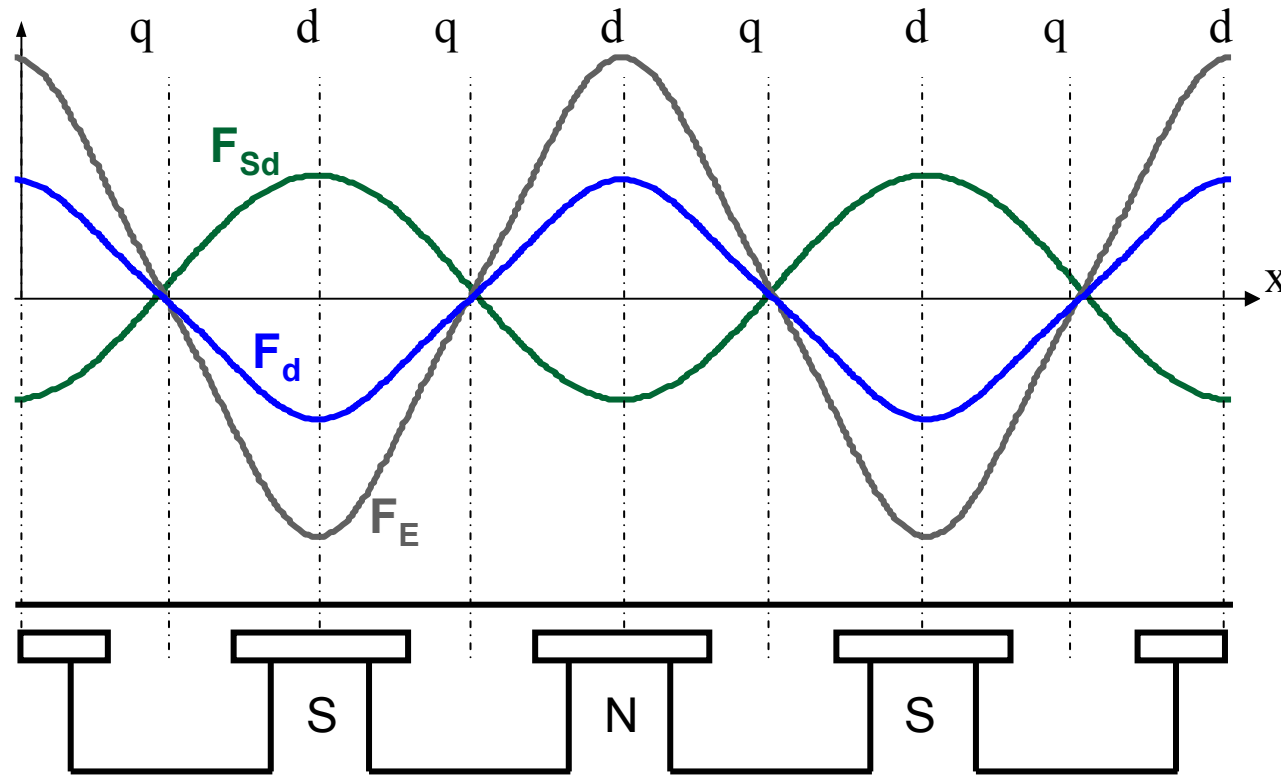
$$F_{Sq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_S \cdot k_{bS} \cdot k_q \cdot \sin \theta_F$$



$$F_{Sd} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_S \cdot k_{bS} \cdot k_d \cdot \cos \theta_F$$

## Solenaua longitudinală rezultantă

$$F_d = \frac{m_E}{2} \omega_E \cdot I_E \cdot k_{bE} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} \omega_S \cdot I_S \cdot k_{bS} \cdot k_d \cdot \cos \theta_F$$



Reacua indusului modifică câmpul magnetic al excitaiei

## Solenauia de reacie transversal

### Raportare la stator

Se poate defini un curent de magnetizare  $I_{md}$

$$F_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_{md} \cdot k_{bS}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_{md} \cdot k_{bS} = \frac{m_E}{2} w_E \cdot I_E \cdot k_{bE} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_S \cdot k_{bS} \cdot k_d \cdot \cos \theta_F$$

$$I_d = I_S \cdot k_d \cdot \cos \theta_F \quad I'_E = \sqrt{2} \cdot \frac{m_E}{m_S} \frac{w_E \cdot k_{bE}}{w_S \cdot k_{bS}} I_E$$

$$I_{md} = I_d + I'_E$$

curentul de magnetizare  $I_{mq}$

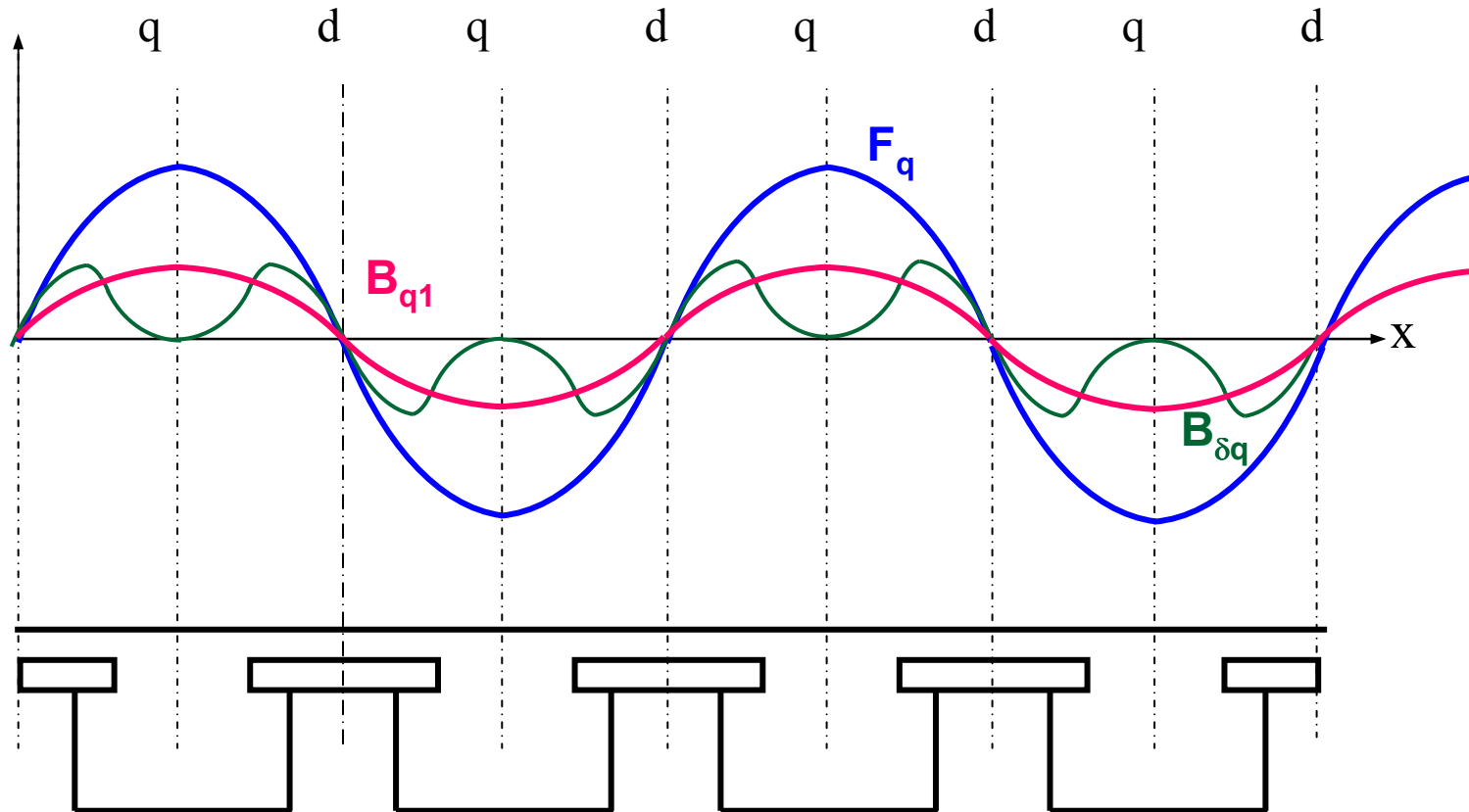
$$F_q = F_{Sq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_{mq} \cdot k_{bS}$$

$$F_{Sq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_S}{2} w_S \cdot I_S \cdot k_{bS} \cdot k_q \cdot \sin \theta_F$$

$$I_{mq} = I_q = I_S \cdot k_q \cdot \sin \theta_F$$



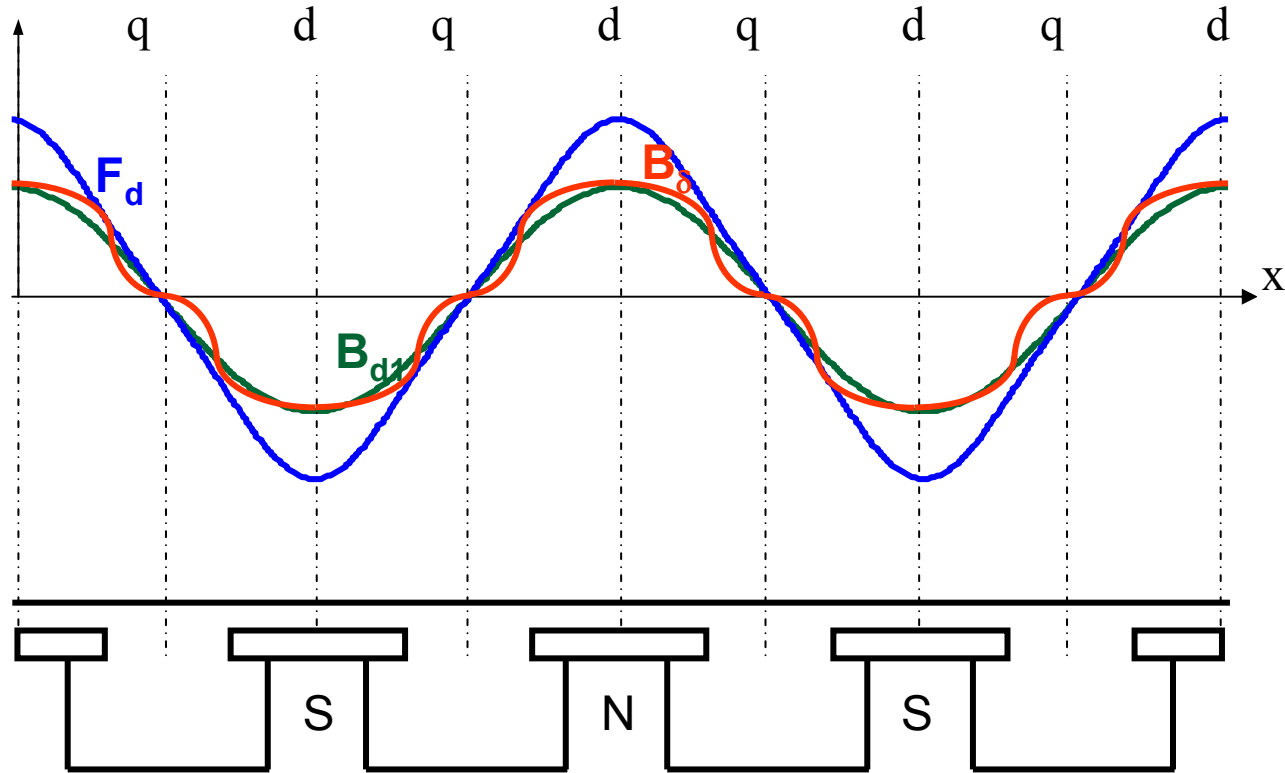
## Câmpul magnetic produs de solenația transversală



Câmpul magnetic nu variază sinusoidal.

Se consideră numai armonica fundamentală.

## Câmpul magnetic produs de solenația longitudinalală

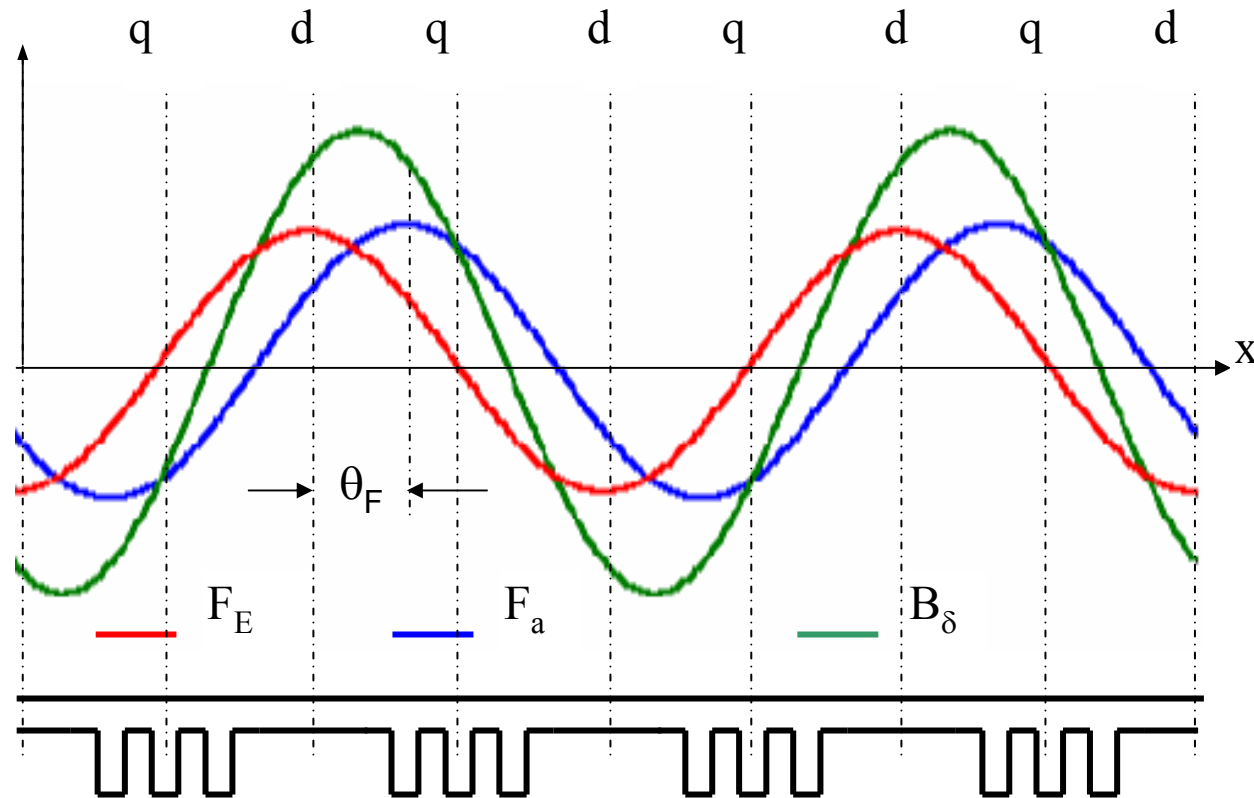


Solenația rezultantă este sinusoidală

Câmpul magnetic în întrefier variază aproape sinusoidal

# Câmpul magnetic în întrefierul mașinii

## Câmpul magnetic la mașinile cu poli plini



Toate mărimile au o variație apropiată de variația sinusoidală

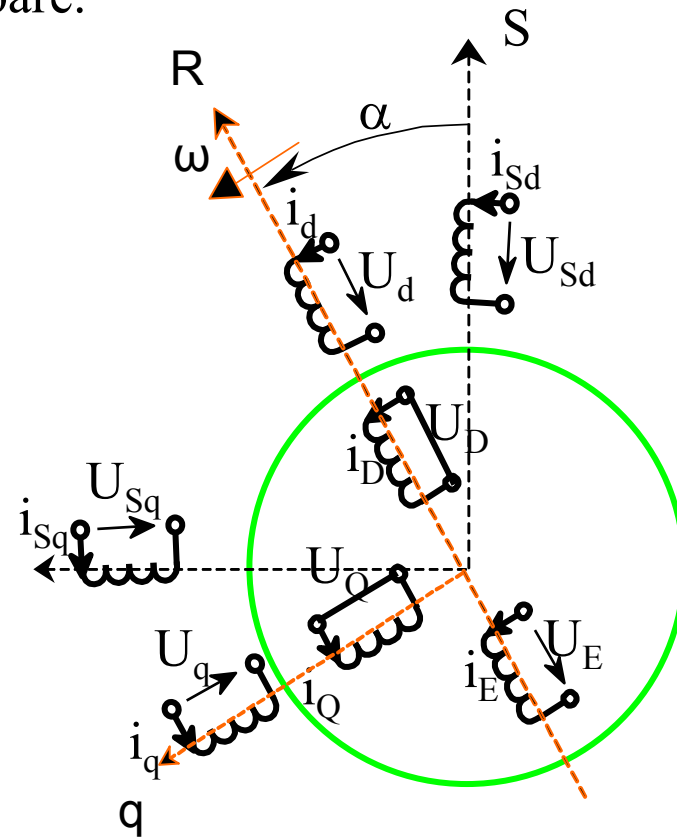
## Modelul de circuit al mașinii sincrone

Înfășurarea statorului se consideră bifazată, simetrică, parcursă de curenții  $i_{Sd}$  respectiv  $i_{Sq}$  care produc o solenație învârtitoare.

Înfășurarea de excitație este așezată pe axa rotorului este monofazată

Înfășurarea de amortizare este o înfășurare închisă. Se poate înlocui cu două înfășurări echivalente raportate la stator, așezate pe axe perpendiculare. Dacă colivia este simetrică înfășurările D și Q sunt identice

Aceeași solenație poate fi produsă de două înfășurări care se rotesc împreună cu rotorul. Și sunt parcursi de curenți  $i_d$  respectiv  $i_q$ , având frecvențe diferite față de  $i_{Sd}$  respectiv  $i_{Sq}$ .





## Raportarea la stator

Înfășurarea de excitație este monofazată solenația produsă este :

$$F_E = \frac{m_E}{2} w_E \cdot I_E \cdot k_{bE} \quad \text{Constantă și fixă față de rotor}$$

Coeficienții de raportare la stator:

$$U'_E = U_E \frac{w_S \cdot k_{bS}}{w_E \cdot k_{bE}} \quad I'_E = \sqrt{2} \cdot \frac{m_E}{m_S} \frac{w_E \cdot k_{bE}}{w_S \cdot k_{bS}} I_E \quad k_Z = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{m_S}{m_E} \left( \frac{w_S \cdot k_{bS}}{w_E \cdot k_{bE}} \right)^2$$

În cazul unei înfășurări de amortizare simetrice.

Se raportează înfășurarea în colivie ( cu bare și inele) la o înfășurare formată numai din bare apoi aceasta la stator.( la fel ca în cazul mașinii de inducție).

$$I'_D = \frac{N_{crRd} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{bR}}{m_S \cdot w_S \cdot k_{bS}} \cdot I_D \quad \longrightarrow \quad k_Z = \frac{4 \cdot m_S \cdot (w_S \cdot k_{bS})^2}{N_{crR} \cdot k_{bR}^2}$$

# Fluxurile mașinii sincrone

Astfel pe axa **d** solenația este produsă de:

$$i_{md} = i_d + i'_E + i'_D$$

Fluxul de magnetizare:

$$\Psi_{md} = M_d \cdot i_{md}$$

Fluxurile totale în înfășurări

$$\Psi_d = L_{S\sigma} \cdot i_d + \Psi_{md}$$

$$\Psi_D = L_{D\sigma} \cdot i_D + \Psi_{md}$$

$$\Psi_E = L_{E\sigma} \cdot i_E + \Psi_{md}$$

pe axa **q** solenația este produsă de:

$$i_{mq} = i_q + i'_Q$$

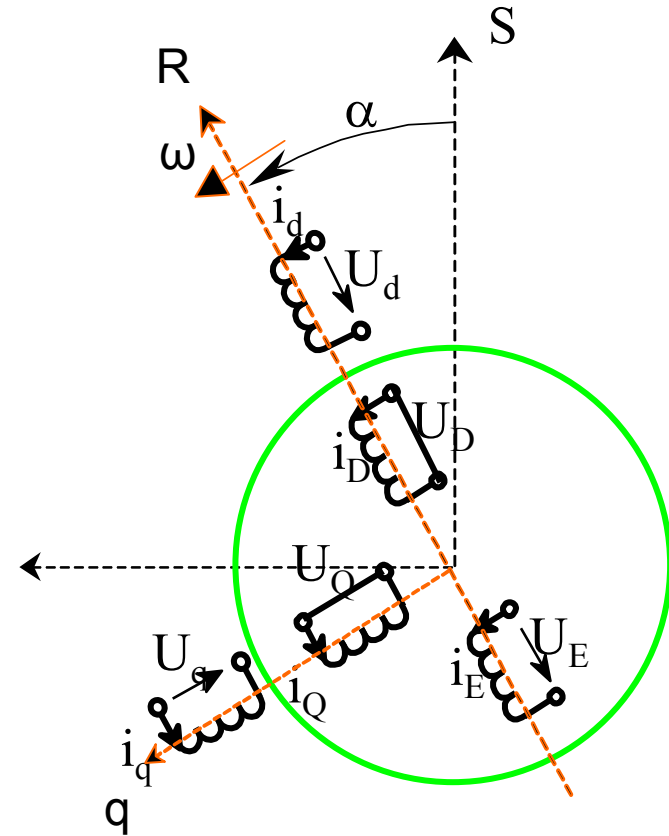
Fluxul de magnetizare:

$$\Psi_{mq} = M_q \cdot i_{mq}$$

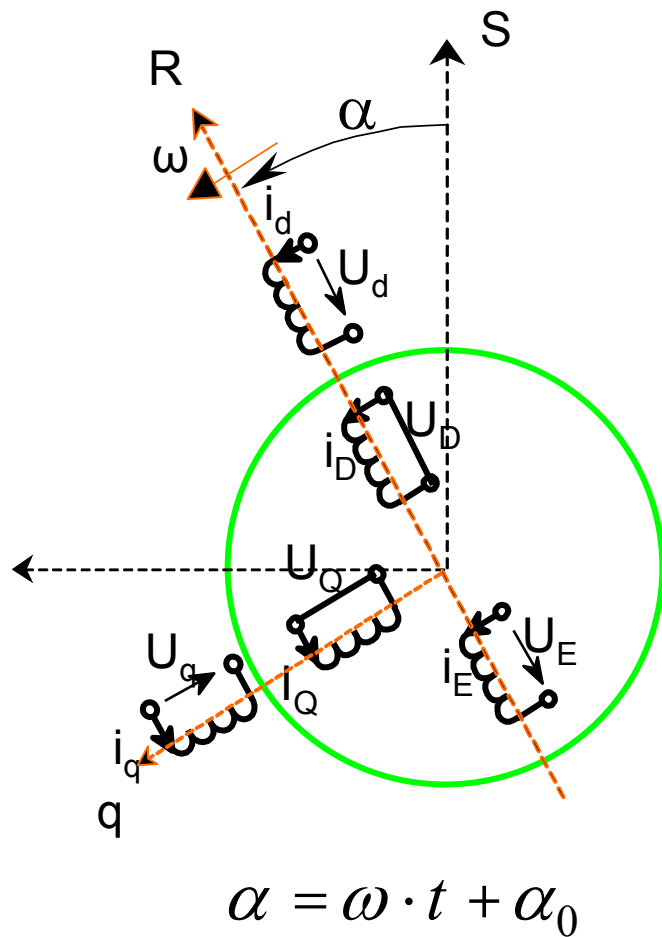
Fluxurile totale în înfășurări

$$\Psi_q = L_{S\sigma} \cdot i_q + \Psi_{mq}$$

$$\Psi_Q = L_{Q\sigma} \cdot i_Q + \Psi_{mq}$$



# Ecuatiile mașinii sincrone



Ecuatiile de tensiuni, considerând toate înfășurările receptoare

$$u_d = R_S \cdot i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \frac{d\alpha}{dt} \cdot \Psi_q$$

t.e.m. statică

$$u_q = R_S \cdot i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \frac{d\alpha}{dt} \cdot \Psi_d$$

t.e.m. de rotație

$$u_D = R_D \cdot i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D = 0$$

$$u_E = R_E \cdot i_E + \frac{d}{dt} \Psi_E$$

$$u_Q = R_Q \cdot i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q = 0$$

## Scheme echivalente în regim sinusoidal

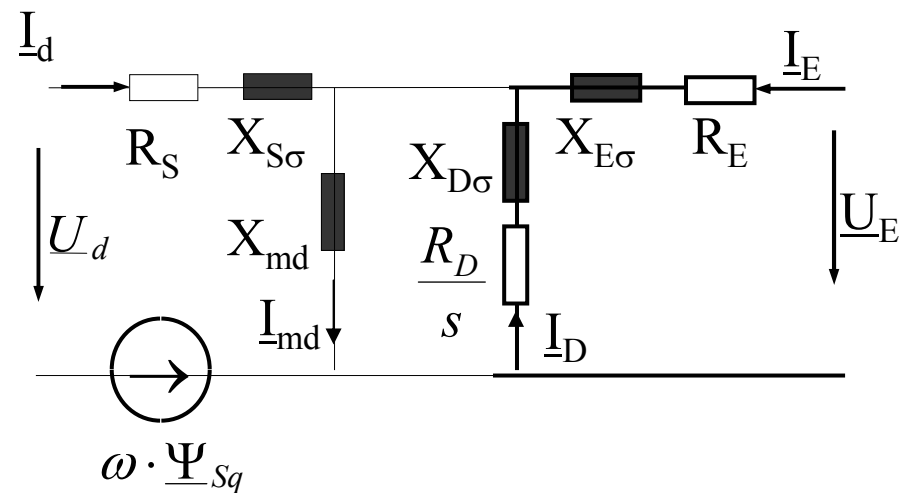
Schema echivalentă longitudinală

$$\underline{U}_d = R_S \cdot \underline{I}_d + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_d + j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_{md} - \omega \cdot \underline{\Psi}_{Sq}$$

$$0 = R_D \cdot \underline{I}_D + j \cdot s \cdot X_{D\sigma} \cdot \underline{I}_D + j \cdot s \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_{md}$$

$$\underline{U}_E = R_E \cdot \underline{I}_E + j \cdot X_{E\sigma} \cdot \underline{I}_E + j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_{md}$$

$$\underline{I}_{md} = \underline{I}_{Sd} + \underline{I}_E + \underline{I}_D$$





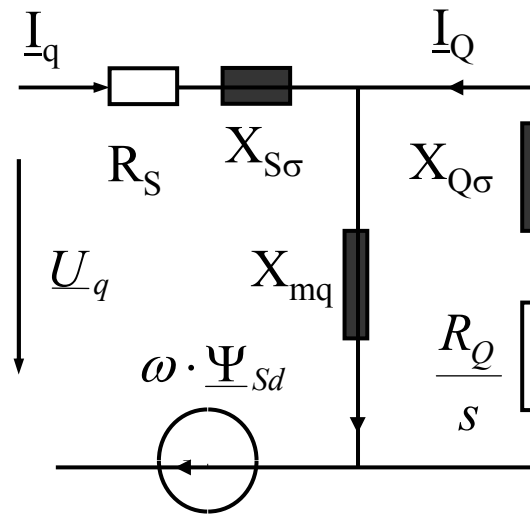
## Scheme echivalente în regim sinusoidal

Schema echivalentă transversală

$$\underline{U}_q = R_S \cdot \underline{I}_q + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_q + j \cdot X_{mq} \cdot \underline{I}_{mq} + \omega \cdot \underline{\Psi}_{Sd}$$

$$0 = R_Q \cdot \underline{I}_Q + j \cdot s \cdot X_{Q\sigma} \cdot \underline{I}_Q + j \cdot s \cdot X_{mq} \cdot \underline{I}_{mq}$$

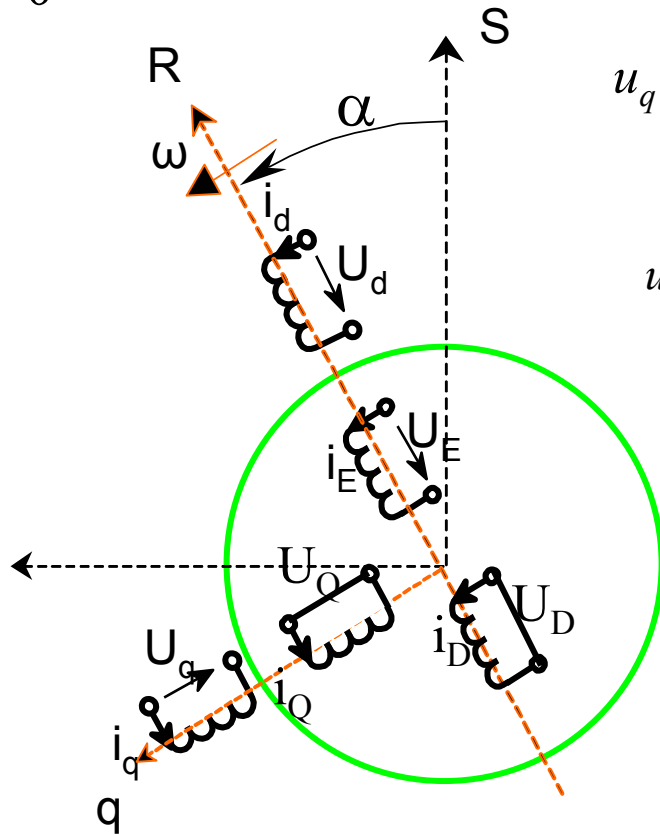
$$\underline{I}_{mq} = \underline{I}_q + \underline{I}_Q$$



# Regimul staționar sinusoidal

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0$$

Ecuatiile de tensiuni



$$\alpha = \omega \cdot t + \alpha_0$$

$$u_d = R_S \cdot i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \frac{d\alpha}{dt} \cdot \Psi_q$$

$$u_d = R_S \cdot i_d - \omega \cdot \Psi_q$$

$$u_q = R_S \cdot i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \frac{d\alpha}{dt} \cdot \Psi_d$$

$$u_q = R_S \cdot i_q + \omega \cdot \Psi_d$$

$$u_E = R_E \cdot i_E + \frac{d}{dt} \Psi_E$$

$$u_E = R_E \cdot i_E$$

$$u_D = R_D \cdot i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D = 0$$

$$i_D = 0$$

$$u_Q = R_Q \cdot i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q = 0$$

$$i_Q = 0$$

Ecuatiile de fluxuri

$$\Psi_d = L_{S\sigma} \cdot i_d + M_d \cdot (i_d + i_E)$$

$$\Psi_E = L_{E\sigma} \cdot i_E + M_d \cdot (i_d + i_E)$$

$$i_{md} = i_d + i_E$$

$$\Psi_q = L_{S\sigma} \cdot i_q + M_q \cdot i_q$$

$$i_{mq} = i_q$$

## Ecuatii în regim staționar sinusoidal

T.e.m. induse - două componente perpendiculare

Se notează :

$$\begin{aligned}\underline{E}_0 &= -j \cdot M_d \cdot \omega \cdot \underline{I}'_E = -j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}'_E & \underline{I}_S &= I_d + jI_q \\ \underline{E}_d &= -j \cdot \omega \cdot M_d \cdot \underline{I}_d = -j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_d & \underline{U}_S &= U_d + jU_q \\ \underline{E}_q &= -j \cdot \omega \cdot M_q \cdot \underline{I}_q = -j \cdot X_{mq} \cdot \underline{I}_q & X_{S\sigma} &= \omega \cdot L_{S\sigma}\end{aligned}$$

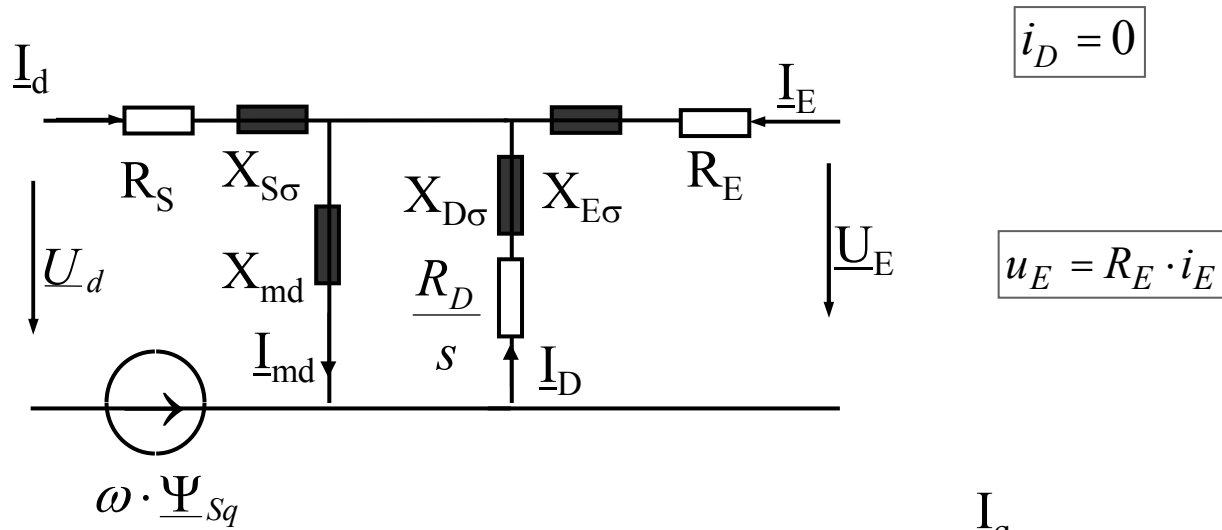
Ținând seama de fluxul de scăpări și de căderea de tensiune ecuația de tensiune se scrie în regim **de motor**:

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S - \underline{E}_q - \underline{E}_d - \underline{E}_0$$

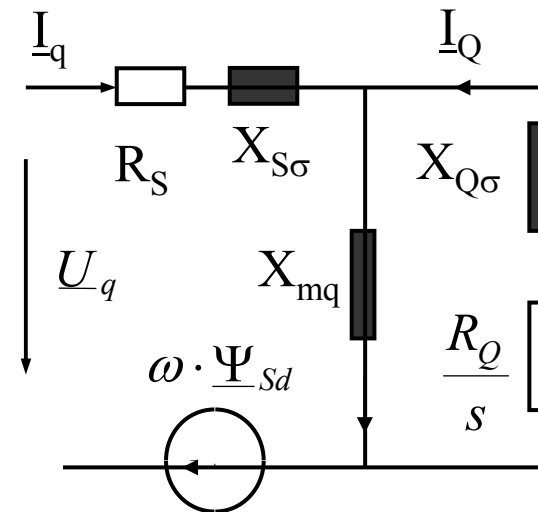
In regim **de generator** ecuația se scrie :

$$\underline{U}_S = -R_S \cdot \underline{I}_S - j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S + \underline{E}_q + \underline{E}_d + \underline{E}_0$$

# Schemele echivalente în regim staționar sinusoidal



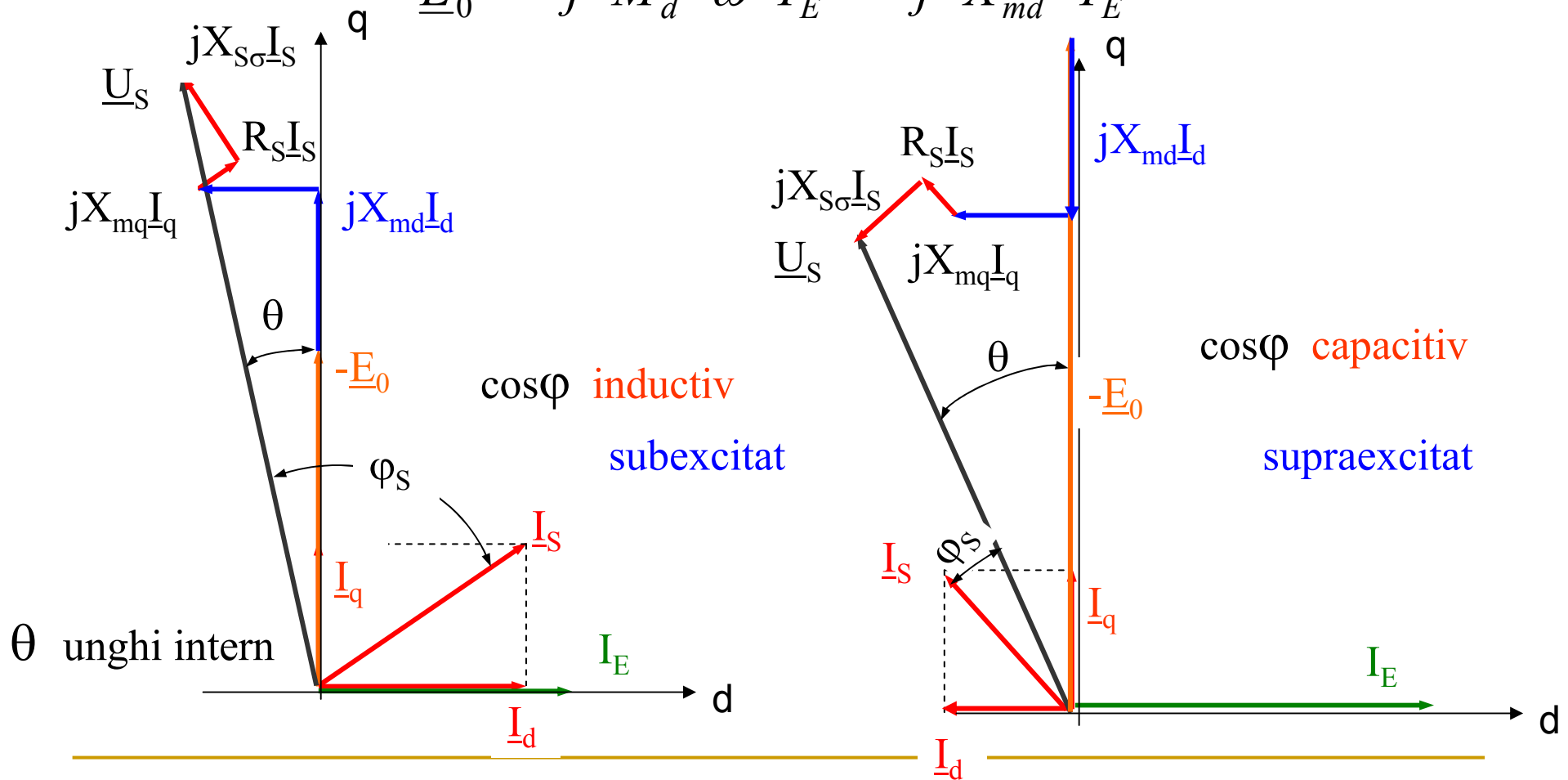
$i_Q = 0$



# Diagrama vectorială în regim de motor

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S + j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_d + j \cdot X_{mq} \cdot \underline{I}_q - \underline{E}_0$$

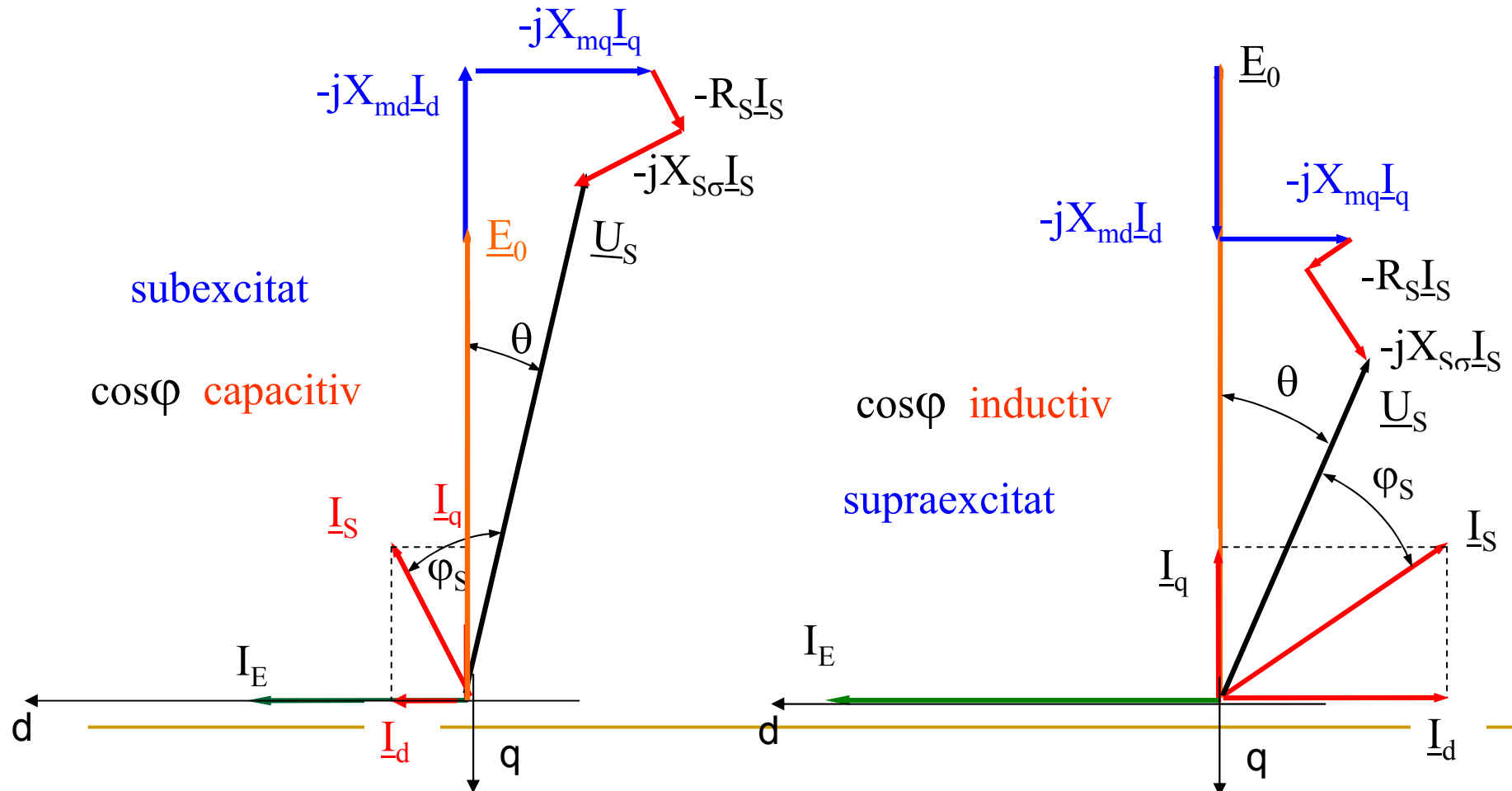
$$\underline{E}_0 = -j \cdot M_d \cdot \omega \cdot I'_E = -j \cdot X_{md} \cdot I'_E$$





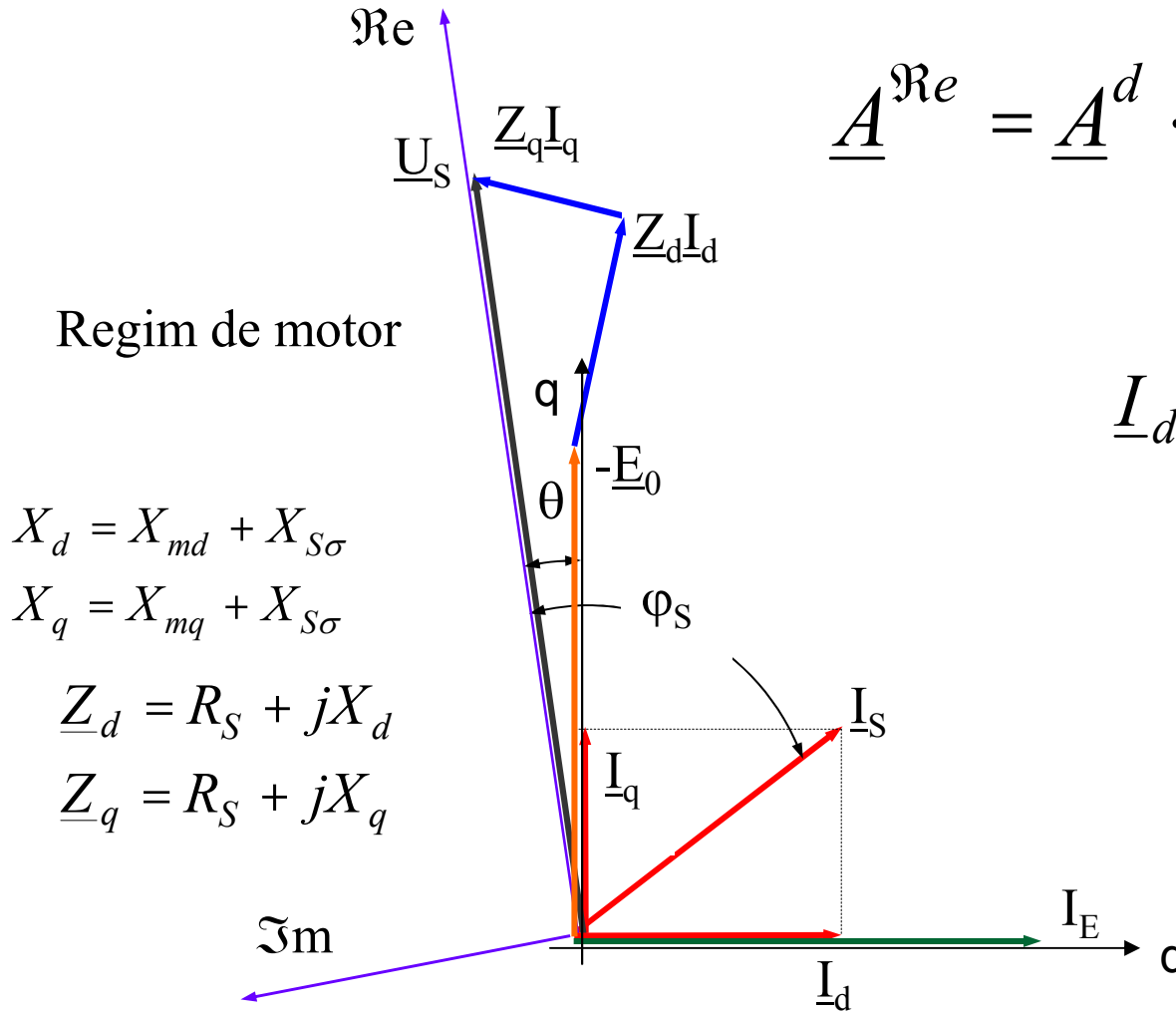
# Diagrama vectorială în regim de generator

$$\underline{U}_S = -R_S \cdot \underline{I}_S - j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S - j \cdot X_{md} \cdot \underline{I}_d - j \cdot X_{mq} \cdot \underline{I}_q + \underline{E}_0$$



# Diagrama simplificată.

Schimbarea axelor de referință.



$$\underline{A}^{\text{Re}} = \underline{A}^d \cdot e^{-j\gamma} \quad \gamma = \frac{\pi}{2} + \theta$$

$$e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j$$

$$\underline{I}_d = -j \cdot I_d^d \cdot e^{-j\theta}$$

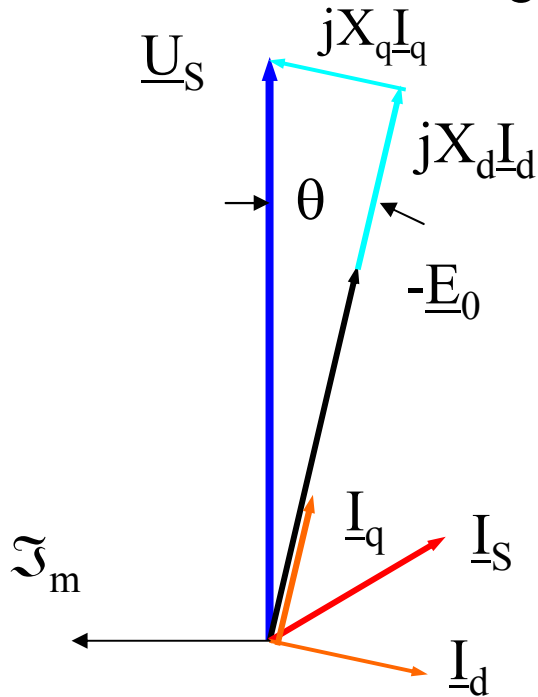
$$\underline{I}_q = I_q^d \cdot e^{-j\theta}$$

$$\underline{I}_E = -j \cdot I_E^d \cdot e^{-j\theta}$$

$$\underline{I}_S = (I_q^d - j \cdot I_d^d) \cdot e^{-j\theta}$$

# Locul geometric al curentului

Se neglijează rezistența înfășurării statorului față de reactanțe



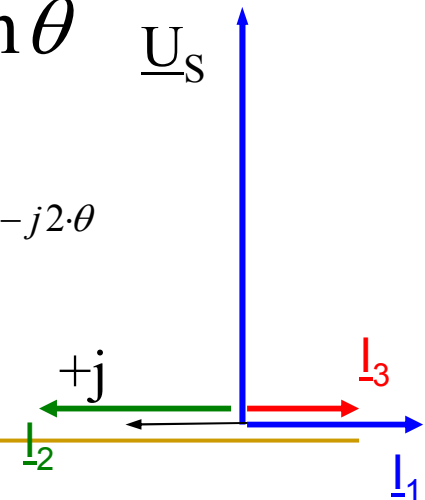
$$\underline{I}_S = (I_q - j \cdot I_d) \cdot e^{-j\theta}$$

$$I_q = \frac{U}{X_q} \sin \theta$$

$$I_d = \frac{U_S \cdot \cos \theta - E_0}{X_d}$$

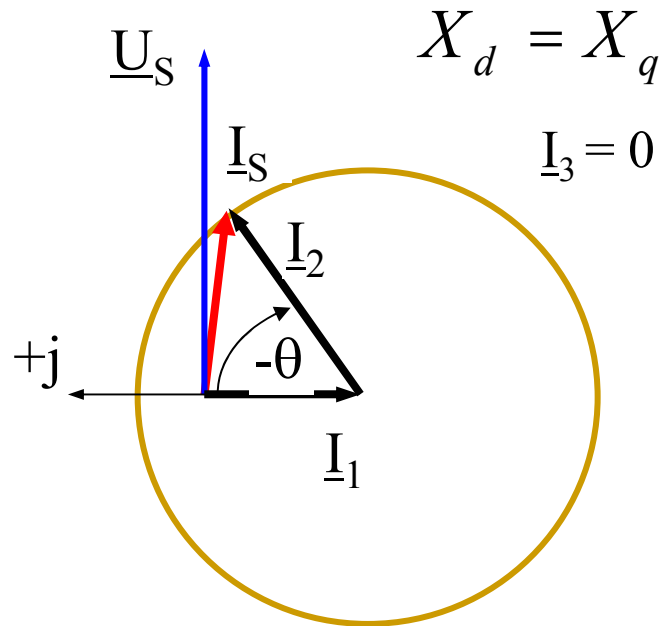
$$e^{-j\theta} = \cos \theta - j \cdot \sin \theta$$

$$\underline{I}_S = \underbrace{j \frac{E_0}{X_d} e^{-j\theta}}_{\underline{I}_2} - \underbrace{j \frac{U_S}{2} \left( \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)}_{\underline{I}_1} - \underbrace{j \frac{U_S}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) e^{-j2\theta}}_{\underline{I}_3}$$



# Locul geometric al curentului

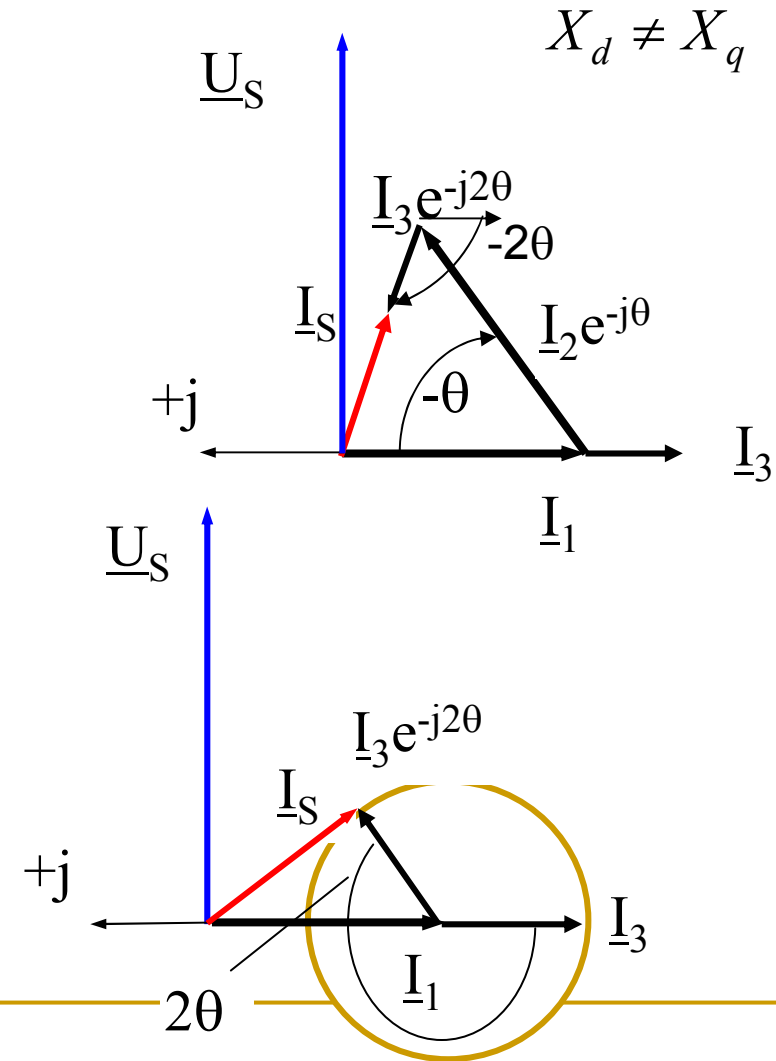
Mașini cu poli înecați



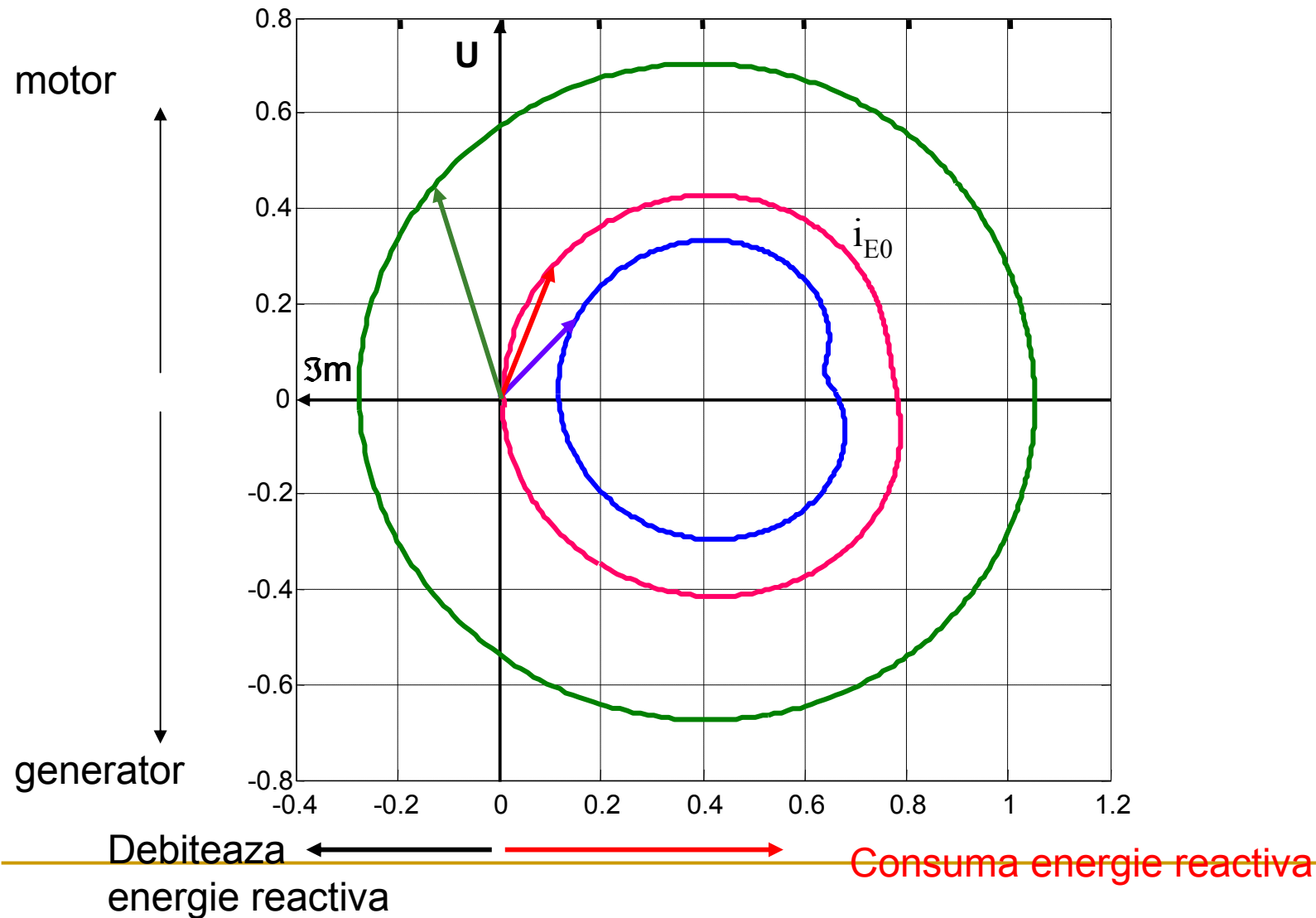
Mașina fără excitație

$I_2 = 0$

Mașini cu poli aparenti



# Locul geometric al curentului la mașini cu poli aparenti



## Puterea și cuplul mașinii sincrone

Dacă se notează impedanțele sincrone

$$\underline{Z}_d = Z_d \cdot e^{j\alpha_d} \quad \underline{Z}_q = Z_q \cdot e^{j\alpha_q}$$

Ecuția de tensiune în regim de motor se poate scrie

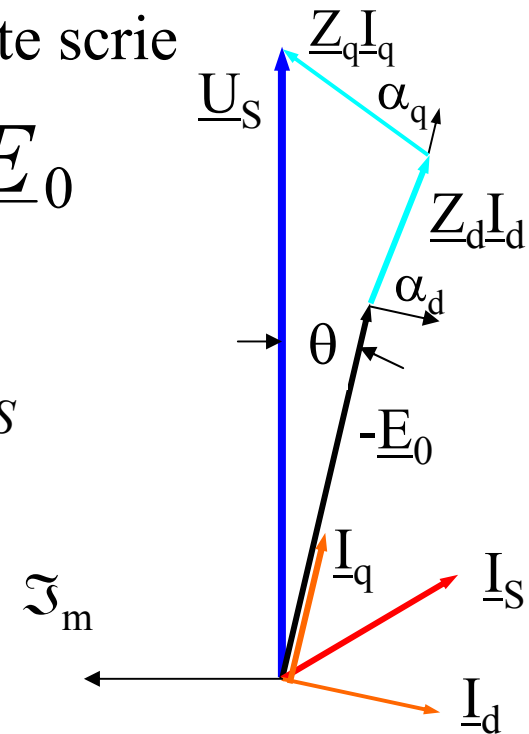
$$\underline{U}_S = \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d + \underline{Z}_q \cdot \underline{I}_q - \underline{E}_0$$

Puterea aparentă a statorului

$$\underline{S}^* = m_S \cdot \underline{U}_S \cdot \underline{I}_S^* = P_S - jQ_S$$

De unde puterea activă

$$P_S = m_S \cdot U_S \cdot (I_q \cdot \cos \theta - I_d \cdot \sin \theta)$$





## Puterea electrică

Ecuția statorică în sistemul legat de tensiune

$$\underline{U}_S = Z_d \cdot e^{j\alpha_d} \cdot I_d \cdot e^{-j(\theta + \frac{\pi}{2})} + Z_q \cdot e^{j\alpha_q} \cdot I_q \cdot e^{-j\theta} - E_0 \cdot e^{-j\theta}$$

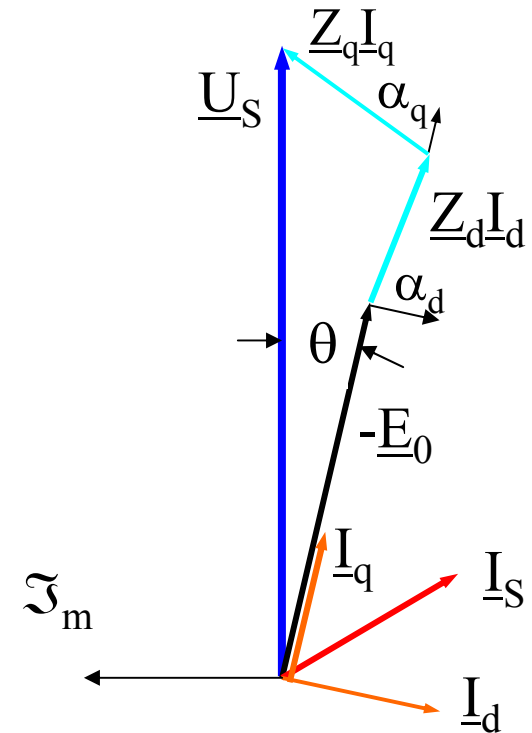
Expresiile curenților

$$I_d = \frac{U_S \cdot \sin(\alpha_q - \theta) - E_0 \cdot \sin \alpha_q}{Z_d \cdot \cos(\Delta\alpha)}$$

$$I_q = \frac{U_S \cdot \cos(\alpha_d - \theta) - E_0 \cdot \cos \alpha_d}{Z_q \cdot \cos(\Delta\alpha)}$$

Unde s-a notat

$$\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_q$$



## Puterea electrică

Expresia puterii electrice

$$P_S = m_S \cdot \frac{U_S^2}{\cos(\Delta\alpha)} \left[ \frac{\cos(\alpha_d - \theta) \cdot \cos\theta}{Z_q} - \frac{\sin(\alpha_q - \theta) \cdot \sin\theta}{Z_d} \right] \\ - m_S \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{\cos(\Delta\alpha)} \left[ \frac{\cos\alpha_d \cdot \cos\theta}{Z_q} - \frac{\sin\alpha_q \cdot \sin\theta}{Z_d} \right]$$

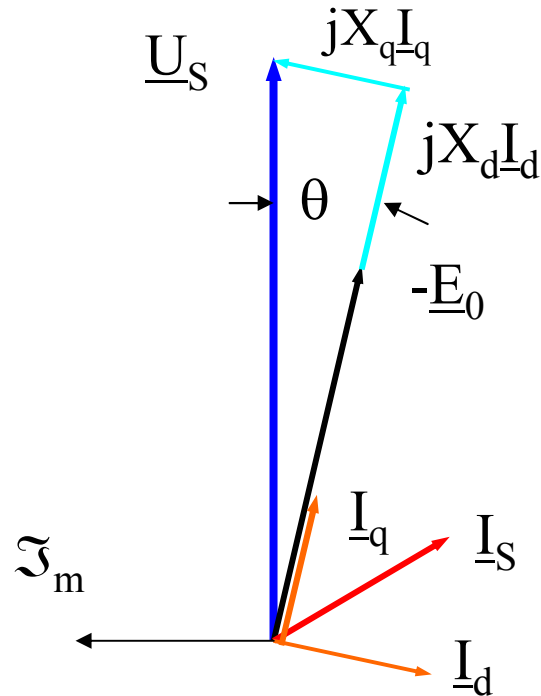
Dacă se neglijează rezistențele  $Z_d = X_d$ ;  $Z_q = X_q$ ;  $\cos\alpha = 0$ ;  $\alpha_d = \alpha_q = \pi/2$

rezultă :

$$P_S = \frac{m}{X_d} U_S \cdot E_0 \sin\theta + \left( \frac{m}{X_q} - \frac{m}{X_d} \right) \frac{U_S^2}{2} \sin 2\theta$$

# Puterea electromagnetică

Diagrama simplificată, fără pierderi



Puterea aparentă electromagnetă

$$\underline{S}_{em}^* = m_S \cdot \underline{E}_S \cdot \underline{I}_S^* = P_{em} - jQ_{em}$$

În sistemul legat de  $E_0$

$$\underline{S}_{em}^* = m_S \cdot (E_0 + X_d \cdot I_d + jX_q \cdot I_q) \cdot (I_q + jI_d)$$

Puterea activă electromagnetă

$$P_{em} = m [E_0 \cdot I_q + (X_d - X_q) \cdot I_d \cdot I_q]$$

Puterea reactivă electromagnetă

$$Q_{em} = m [E_0 \cdot I_d + X_d \cdot I_d^2 + X_q \cdot I_q^2]$$

## Puterea electromagnetică

$$P_{em} = \frac{m \cdot E_0}{Z_q \cos(\Delta\alpha)} [U_S \cos(\alpha_d - \theta) - E_0 \cos \alpha_d] +$$
$$+ \frac{X_d - X_q}{Z_d \cdot Z_q \cos^2(\Delta\alpha)} \left\{ U_S^2 \sin(\alpha_q - \theta) \cdot \cos(\alpha_d - \theta) + E_0^2 \sin \alpha_q \cdot \cos \alpha_d - \right.$$
$$\left. - U_S \cdot E_0 [\sin(\alpha_q - \theta) \cos \alpha_d + \cos(\alpha_d - \theta) \sin \alpha_q] \right\} \cdot m$$

Dacă se neglijează rezistențele  $Z_d = X_d ; Z_q = X_q ; \cos \alpha = 0 ; \alpha_d = \alpha_q = \pi - 2$

$$P_{em} = \frac{m}{X_q} U_S \cdot E_0 \sin \theta + \left( \frac{m}{X_q} - \frac{m}{X_d} \right) [U_S^2 \sin \theta \cdot \cos \theta - U_S \cdot E_0 \cdot \sin \theta]$$

rezultă :

$$P_{em} = \frac{m}{X_d} U_S \cdot E_0 \sin \theta + \left( \frac{m}{X_q} - \frac{m}{X_d} \right) \frac{U_S^2}{2} \sin 2\theta$$

## Puterea electrică și electromagnetică

**La mașinile cu întrefier constant**

$$\underline{Z}_q = \underline{Z}_d = Z_S \cdot e^{j\alpha}$$

puterea electrică:

$$P_S = -m_S \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{Z_S} \cdot \cos(\alpha + \theta) + m_S \cdot \frac{U_S^2}{Z_S} \cdot \cos \alpha$$

Puterea electromagnetică

$$P_{em} = m_S \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{Z_S} \cdot \cos(\alpha - \theta) - m_S \cdot \frac{E_0^2}{Z_S} \cdot \cos \alpha$$

Dacă se neglijează rezistențele în raport cu reactanțele sincrone

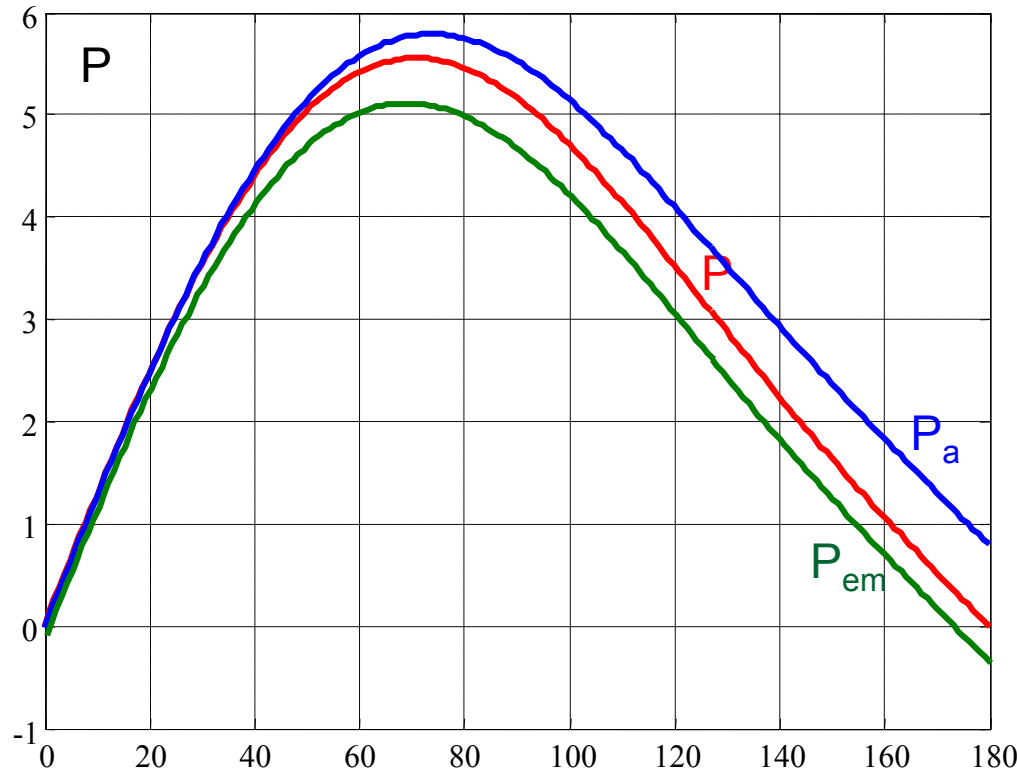
$\alpha_d = \alpha_q = \pi/2$  expresia puterii electrice și electromagnetice devine :

$$P_S = P_{em} \cong m_S \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \sin \theta$$

# Cuplul mașinii sincrone

La mașinile cu întrefier variabil,

Puterile electrice și electromagnetice sunt diferite



dacă se neglijează rezistențele

$$\alpha_d = \alpha_q = \pi/2$$

$$P = m_S \cdot \left( \underbrace{\frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \sin \theta}_{P_1} + \underbrace{\frac{U_S^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta)}_{P_2} \right)$$



## Cuplul mașinii sincrone

### Cuplul electromagnetic

$$C = \frac{P_{em}}{\Omega_S} = \frac{p}{\omega_S} \cdot P_{em}$$

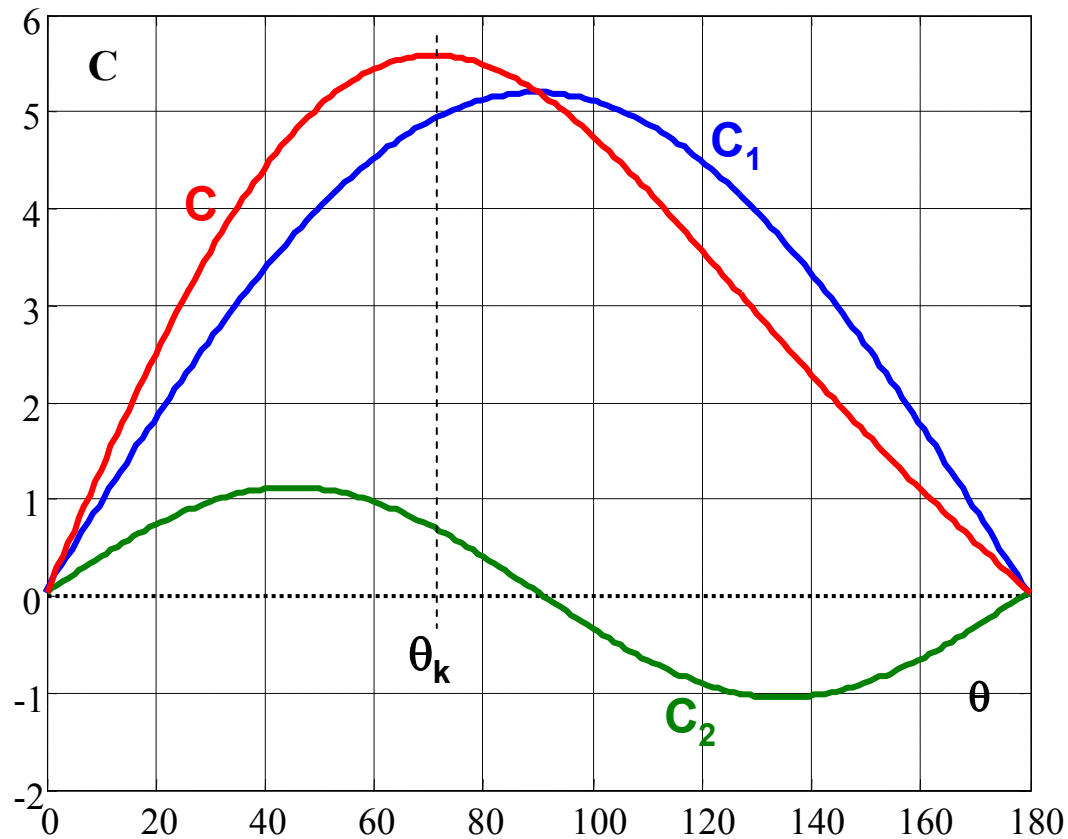
Puterea electromagnetică și cuplul variază la fel.

Expresia cuplului electromagnetic în cazul neglijării rezistențelor statorice

$$C = \frac{p \cdot m_S}{\omega} \cdot \left( \underbrace{\frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \sin \theta}_{C_1 \text{ electromagnetic}} + \frac{U_S^2}{2} \underbrace{\left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}_{C_2 \text{ reluctant}} \sin(2\theta) \right)$$

# Cuplul mașinii sincrone

## Cuplul electromagnetic



$$C_1 = \frac{p \cdot m_S}{\omega} \cdot \left( \frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \sin \theta \right)$$

Valoarea maximă la  $\theta = 90^\circ$

$$C_{1\max} = \frac{p \cdot m_S}{\omega} \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{X_d}$$

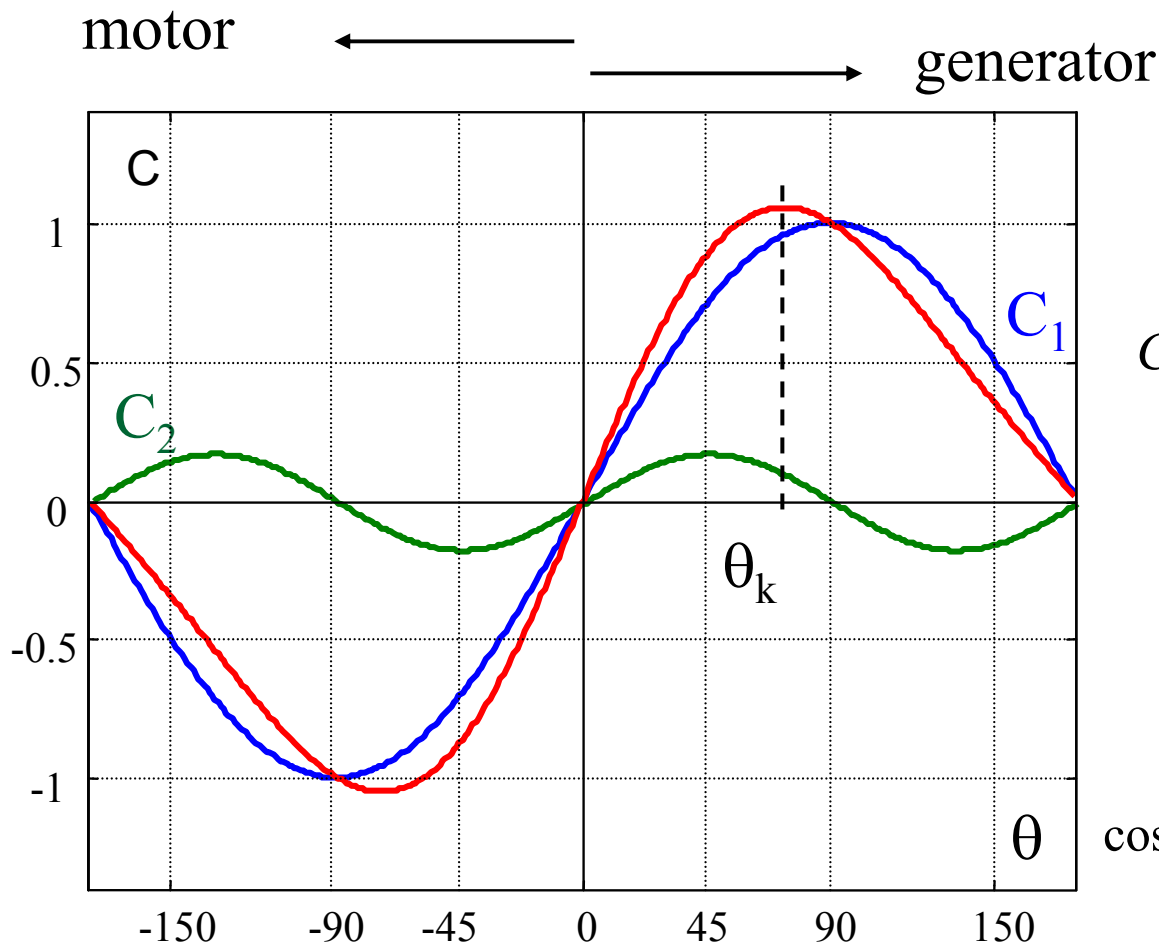
Cuplul de reluctanță

$$C_2 = \frac{p \cdot m_S}{\omega} \cdot \frac{U_S^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta)$$

Valoarea maximă la  $\theta = 45^\circ$

$$C_{2\max} = \frac{p \cdot m_S}{\omega} \cdot \frac{U_S^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

# Caracteristica cuplului mașinii sincrone



Cuplul maxim la  $\theta_k$

$$C_{si} = \frac{dC}{d\theta} = 0$$

Mașini cu întrefier constant

$$C_{si} = \frac{p \cdot m_S}{\omega_s} \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \cos \theta = 0$$

$$\theta_k = \frac{\pi}{2} + n \cdot \pi$$

Mașini cu întrefier variabil

$$\cos \theta_k = \frac{\sqrt{1 + 8 \left[ \frac{U_S}{E_0} \left( \frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \right]^2} - 1}{4 \frac{U_S}{E_0} \left( \frac{X_d}{X_q} - 1 \right)}$$

## Cuplul sincronizant

Cuplul sincronizant  $C_{si} = \frac{dC}{d\theta}$

Mașini cu întrefier constant

$$C_{si} = \frac{p \cdot m_S}{\omega_s} \cdot \frac{U_S \cdot E_0}{X_d} \cdot \cos \theta$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{C_{si\max}}$

Pentru  $\theta = 0$

Mașini cu întrefier variabil

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

Cuplul sincronizant maxim

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

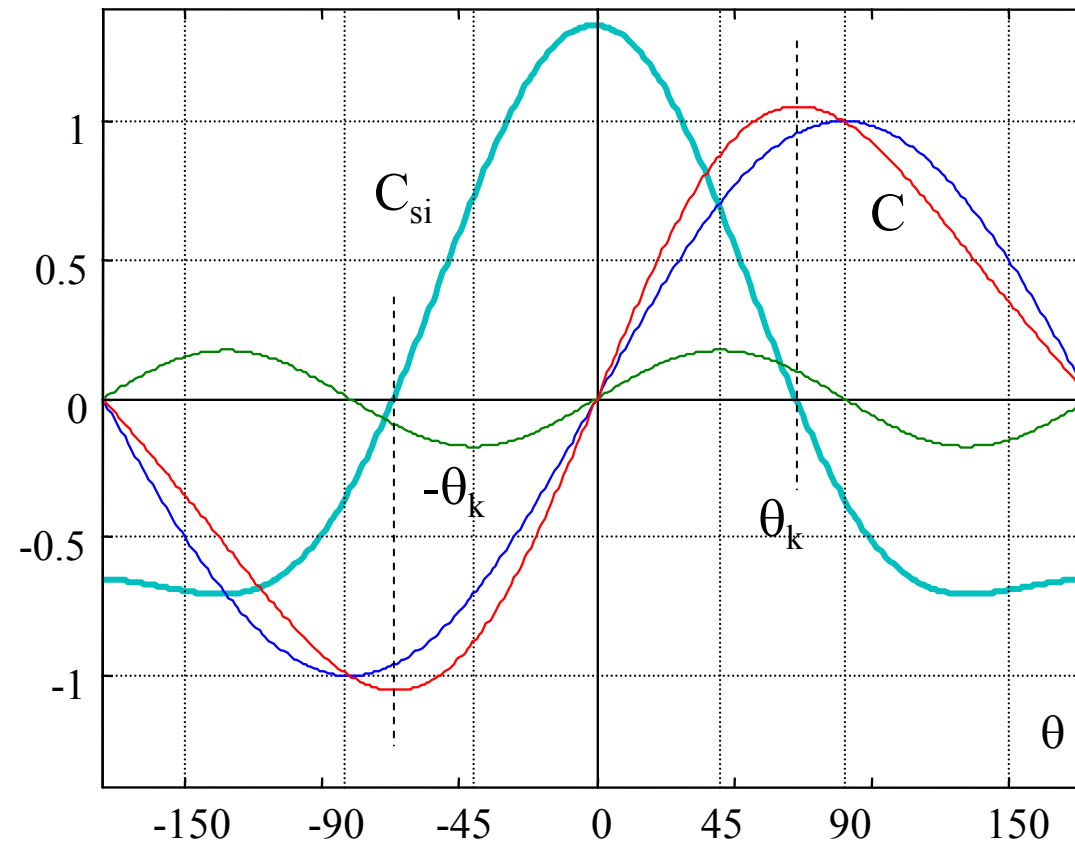
Pentru  $\theta = 0$

# Cuplul sincronizant

Condiția de  
stabilitate

$$\frac{dC}{d\theta} = C_{si} > 0$$

$$-\theta_k < \theta < \theta_k$$



stabil