

---

# MASINI SINCRONE SPECIALE

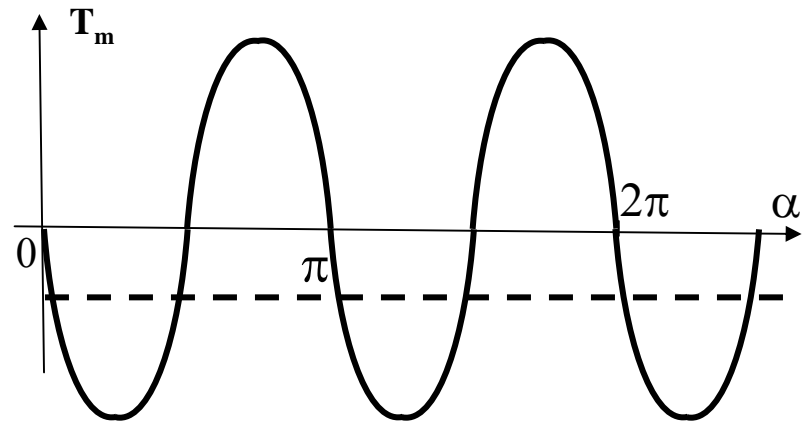
---

Masini cu reluctanta variabila

Mașina sincronă reactivă

# Cuplul de reluctanță

$$T_m = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \alpha)$$



Pentru cuplu mediu diferit de nul este necesar ca:

1.- Curentul să fie întrerupt pentru

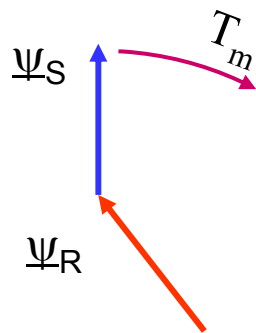
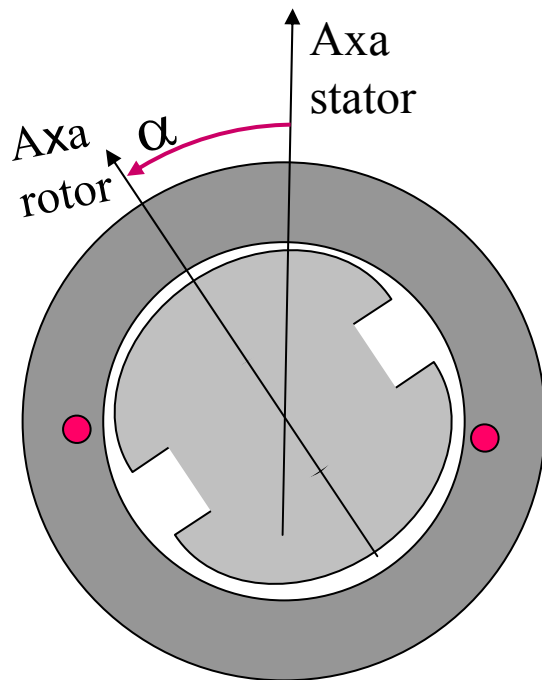
$$\text{intervalul } \frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$$

Trebuie să se cunoască poziția rotorului.

2.- Câmpul statoric trebuie să se deplaseze (rotească)

$$\text{Astfel ca } 0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$$

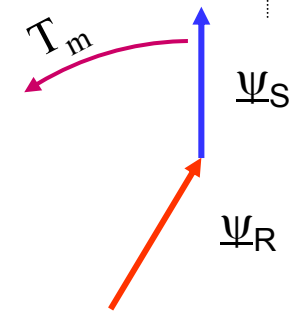
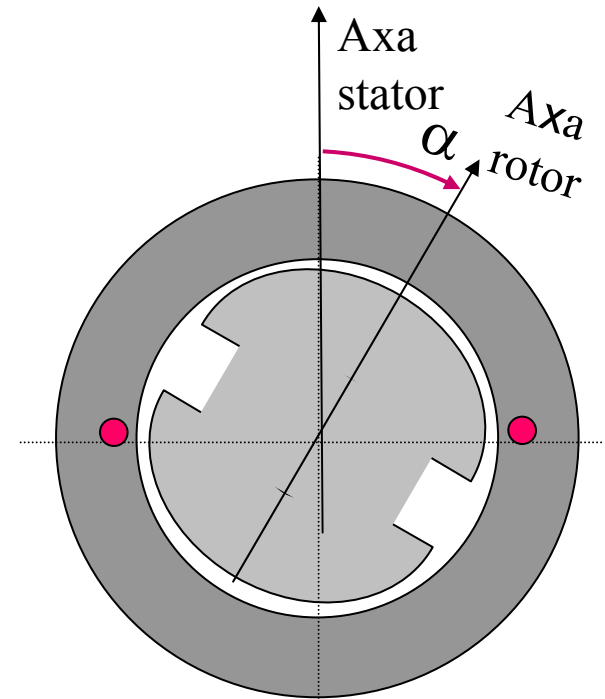
# Pozitia de echilibru a rotorului



Cuplul dezvoltat

$$\underline{T} = p \{ \underline{\Psi}_R \times \underline{\Psi}_S \}$$

Datorită tendinței părții mobile, rotorul în cazul mașinilor rotative, de a ocupa o poziție în care **inductivitatea** înfășurării statorice alimentate, precum și **fluxul** produs de aceasta să fie **maxime** iar **reluctanța minimă**.



## Variante, clasificare

-Câmpul statoric trebuie să se deplaseze și  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$

Deplasarea continuă a câmpului

Mișcarea continuă a rotorului

mașini sincrone reactive

Deplasarea prin salturi a câmpului

Mișcarea continuă a rotorului

mașini cu reluctanță comutată

SRM = *Switched Reluctance Motor*

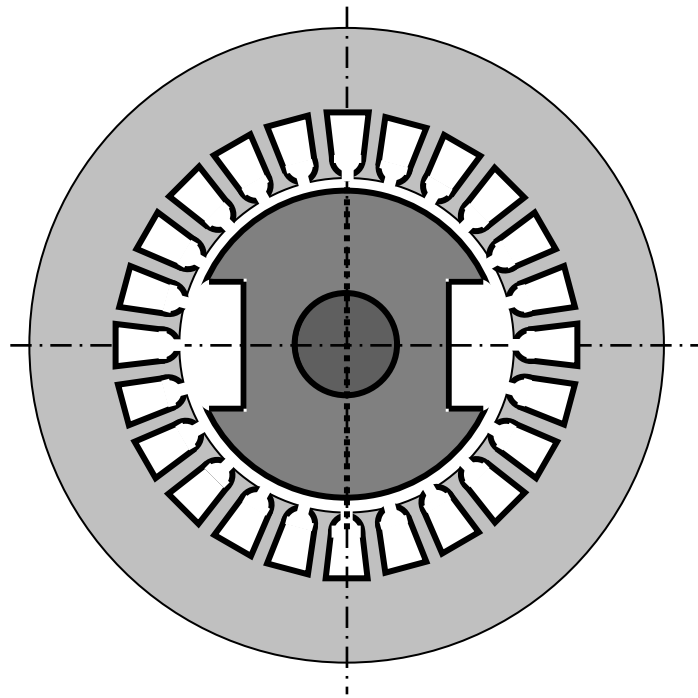
Deplasarea prin salturi a câmpului

Mișcarea discretă a rotorului

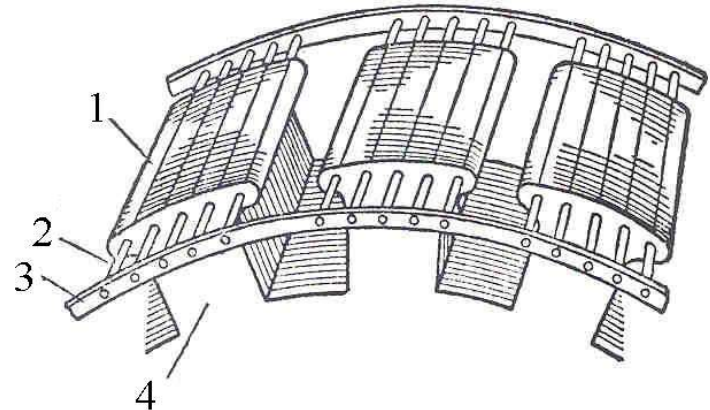
mașini pas cu pas

# Mașina sincronă reactivă

**Statorul** are o simetrie cilindrică și este construit în mod identic cu cel al unei mașini de inducție, adică are un miez din tole cu crestături uniform repartizate spre întrefier, înfășurarea fiind repartizată deschisă, sau, în cazuri particulare, concentrată.



**Rotorul** acestor mașini este construit în mod uzual fără înfășurări sau magneți permanenți, poate fi prevăzut cu o înfășurare în colivie mai ales atunci când mașina este alimentată de la rețea, adică alimentată la frecvență și tensiune constantă.



## Variante, construcție și funcționare

$$T_m = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \alpha) \quad \Delta L = M_d - M_q$$

Diferența dintre inductivități de magnetizare

Curentul depinde de valoarea inductivităților

Performanțele mașinii sincrone reactive depind decisiv de :

- valoarea raportului inductivităților de magnetizare pe cele două axe, d și respectiv q, ( $M_d/M_q$ ),
- diferența dintre aceste inductivități ( $M_d - M_q$ ),
- raportul și diferența, trebuind să aibă valori cât mai mari,

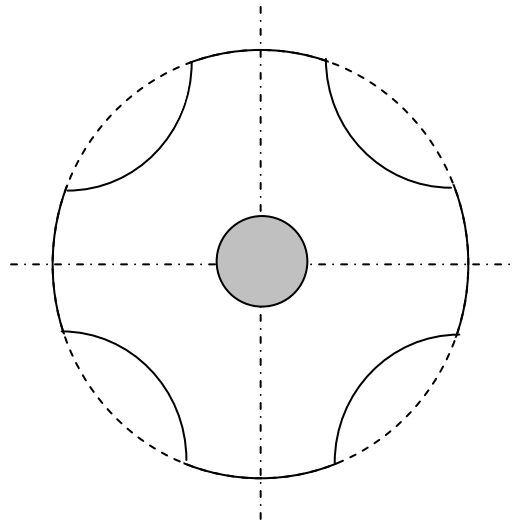
valori mari pentru raport și diferență se obțin prin :

- creșterea gradului de nesimetrie magnetică a rotorului mașini.

# Variante, construcție și funcționare

Nesimetria magnetică a rotorului se poate obține prin trei metode și anume:

1- Rotor cu poli aparenti obținuți prin decuparea unor porțiuni din miezul cilindric cu tole convenționale.

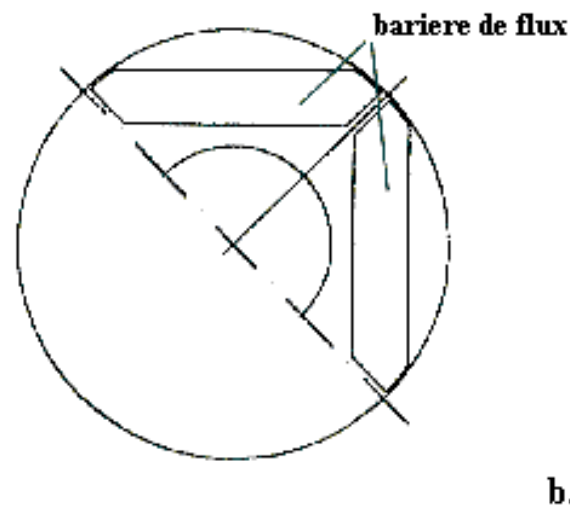
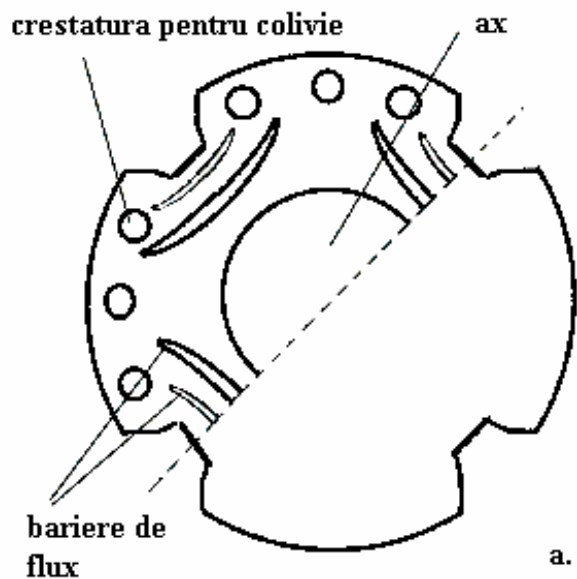


2- Rotor realizat cu tole convenționale și prevăzut cu bariere de flux pentru creșterea nesimetriei magnetice.

3- Rotor construit cu tole dispuse axial având spații nemagnetice între ele.

## Variante, construcție și funcționare

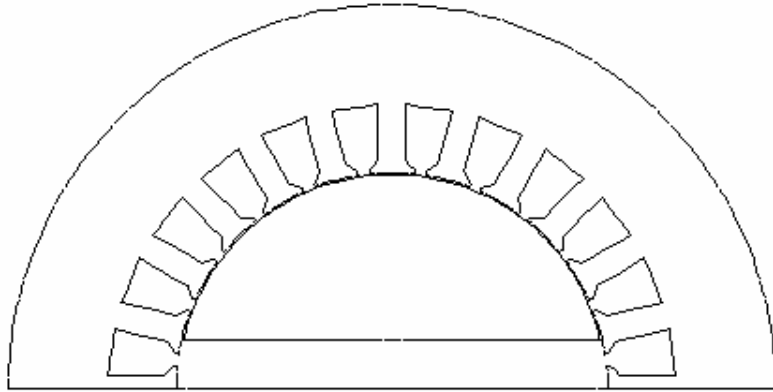
2. Construcție cu tole laminate dispuse convențional cu bariere de flux și nesimetrie magnetică concentrată sau distribuită.



Variante constructive de rotoare cu bariere de flux;  
a) cu poli aparenti și creștături pentru colivie,  
b) cu o singură barieră de flux pe pol,

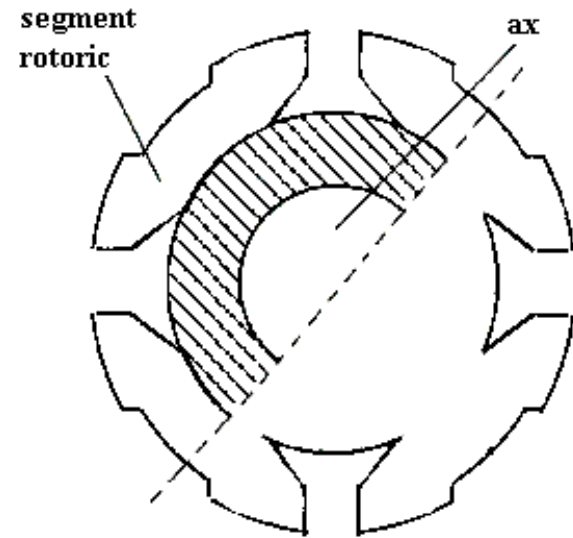


## Variante, construcție și funcționare



Mașina cu rotor cu tole dispuse convențional și nesimetrie rotorică concentrată diametral, cu o pereche de poli.

**Dezavantaj** : conținutul de armonici în câmp mai ridicat.

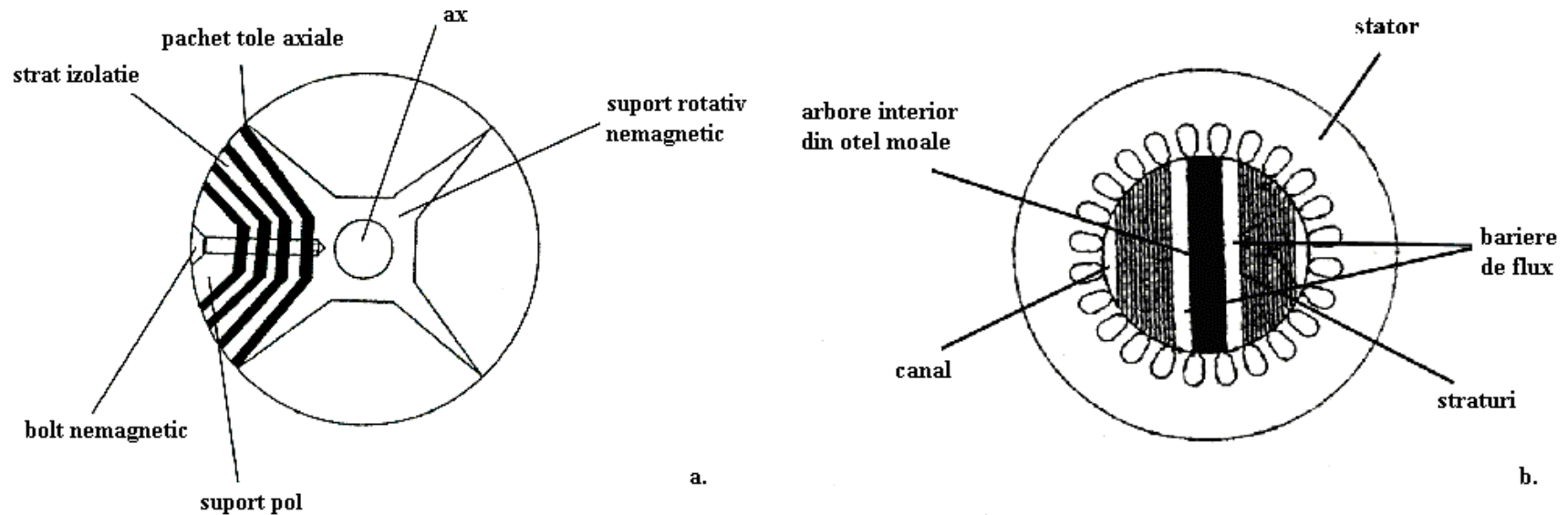


Mașina cu rotor cu segmenti izolați.

raportului inductivităților de magnetizare pe cele două axe  $M_d/M_q$  egală sau mai mare de 5.

## Variante, construcție și funcționare

3. Construcție cu tole dispuse axial cu nesimetrie magnetică distribuită, cu sau fără magneți permanenți plasați pe direcția axei  $q$  a fluxului de magnetizare.

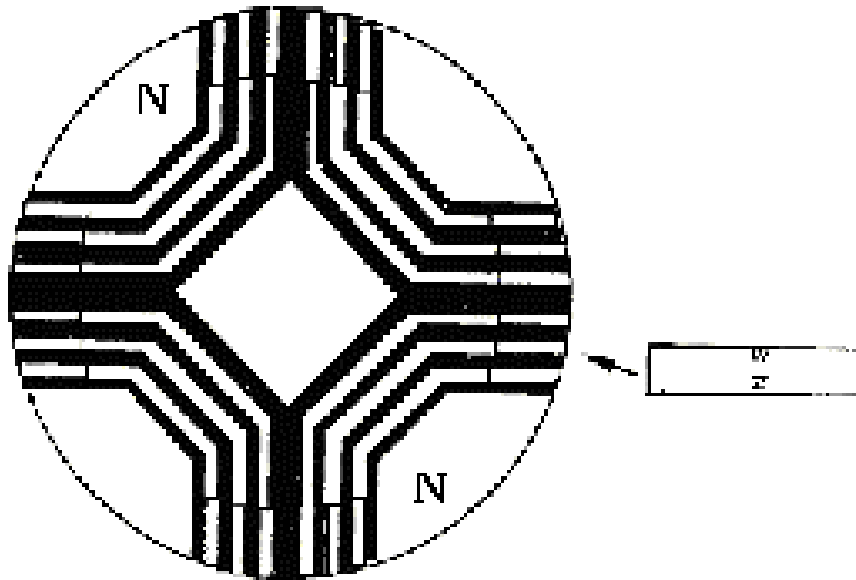


Variante de rotoare cu tole dispuse axial;

a) mașină cu patru poli ,

b) mașină cu doi poli cu bariere adiționale de flux.

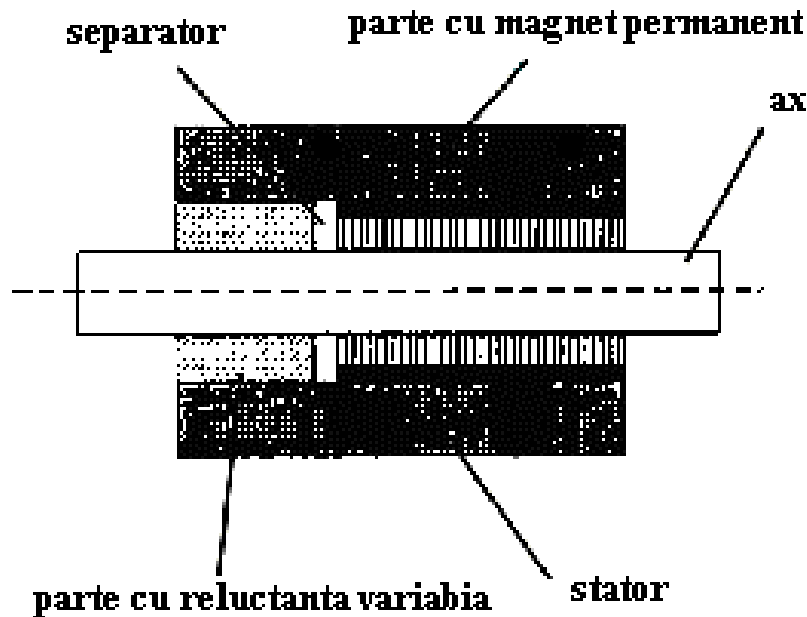
## Variante, construcție și funcționare



Rotor cu patru poli, tole dispuse axial și magneți permanenți plasați între pachetele de tole.

O astfel de mașină de 7,5 kW la care se utilizează bandă de cauciuc cu ferita inclusă. Performanțe remarcabile materializate prin comportare foarte bună la turații mici, posibilitatea slăbirii de câmp, deci a extinderii domeniului de turație și un conținut de cupluri parazite foarte redus.

## Variante, construcție și funcționare

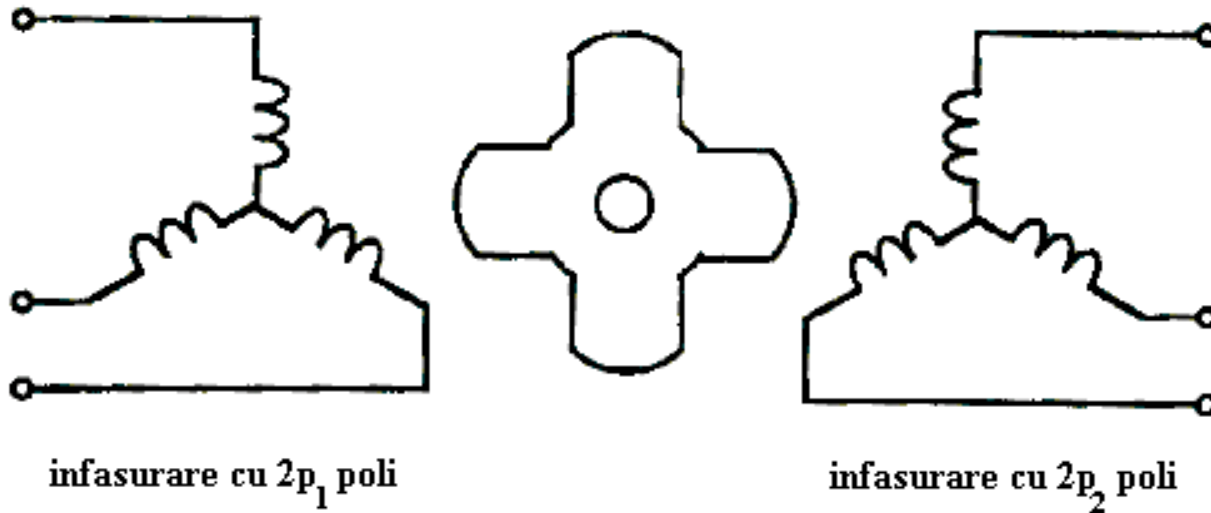


Secțiune longitudinală printr-un motor sincron cu rotorul cu două părți

Mașina are un stator uzual de mașină sincronă sau de inducție, iar rotorul are două părți, una cilindrică cu magneți permanenți de mare energie plasați pe rotor în întrefier și una cu reluctanță variabilă cu tole dispuse axial.

Posibilitatea reglării turației la cuplu constant în raportul 1:3 prin aplicarea slăbirii de câmp.

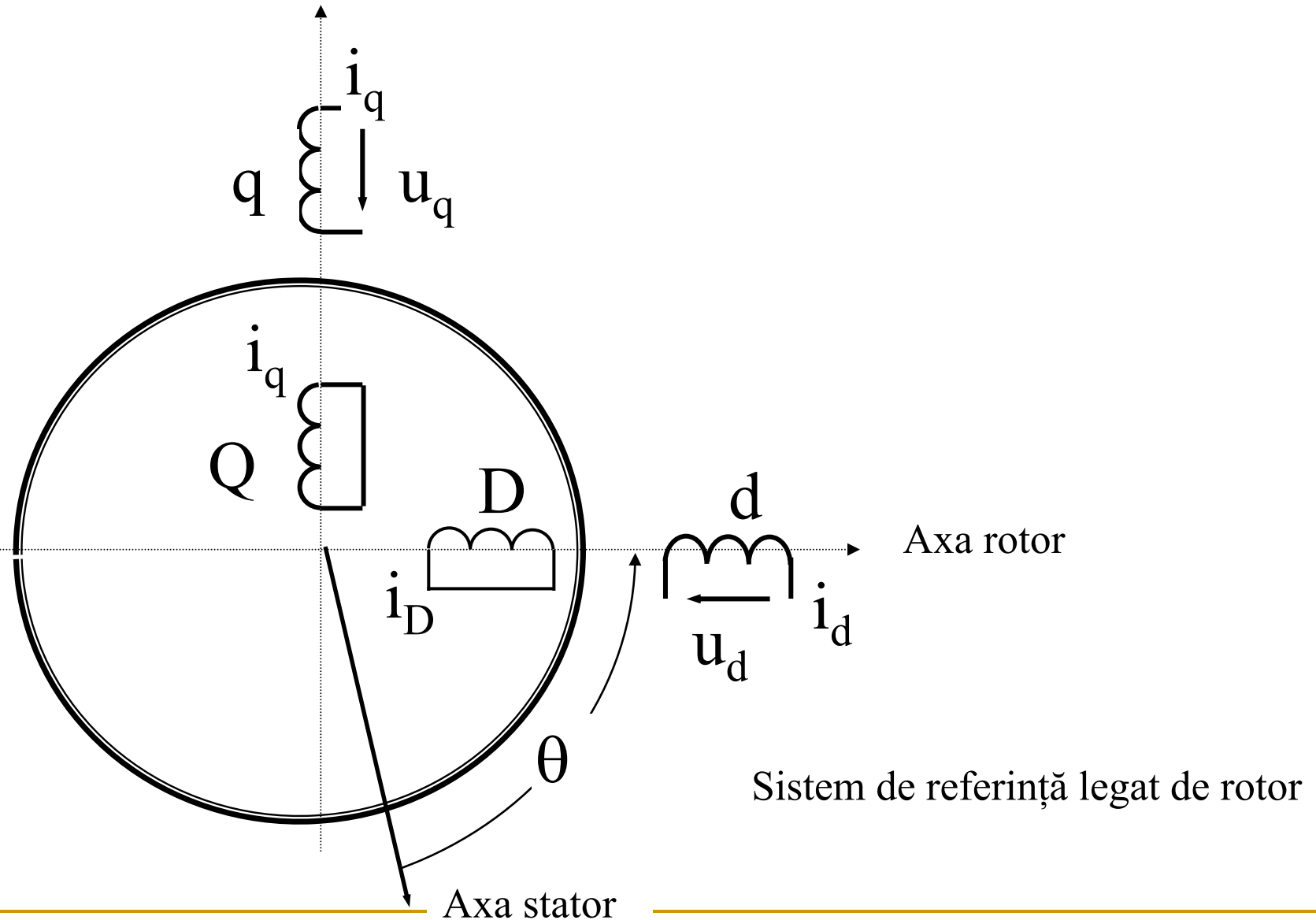
## Variante, construcție și funcționare



Structura de bază a mașinii cu reluctanță variabilă dublu alimentată

$$\pm p_1 \pm p_2 = p_r$$

# Modelul matematic al mașinii sincrone reactive



# Modelul matematic general

Ecuatii de tensiune

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

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

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

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

Expresiile fluxurilor

$$\Psi_d = L_{s\sigma} i_d + \Psi_{dm};$$

$$\Psi_q = L_{s\sigma} i_q + \Psi_{qm}$$

$$\Psi_D = L_{D\sigma} i_D + \Psi_{dm};$$

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

$$\Psi_{dm} = M_d (i_d + i_D);$$

$$\Psi_{qm} = M_q (i_q + i_Q)$$

Ecuatia de mişcare

$$p(\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + T_{rez}$$

# Modelul matematic

Este necesară cunoașterea variației inductivităților cu poziția rotorului și curentul:

- se poate determina **experimental**
- se poate **calcula** prin:- **rezolvarea circuitului magnetic echivalent**
  - **metode numerice, de obicei prin metoda elementului finit.**

In cazul modelului cuplat circuit-câmp componenta de circuit a modelului poate porni de la exprimarea curenților statorici  $i_d$  și  $i_q$

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{dm}}{L_{s\sigma}}, \quad i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{qm}}{L_{s\sigma}}$$

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = u_d + \omega\Psi_q - \frac{R_s(\Psi_d - \Psi_{dm})}{L_{s\sigma}}$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = u_q + \omega\Psi_d - \frac{R_s(\Psi_q - \Psi_{qm})}{L_{s\sigma}}$$

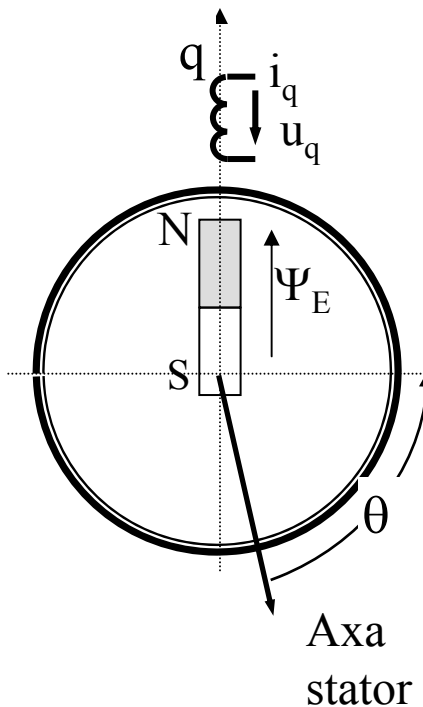
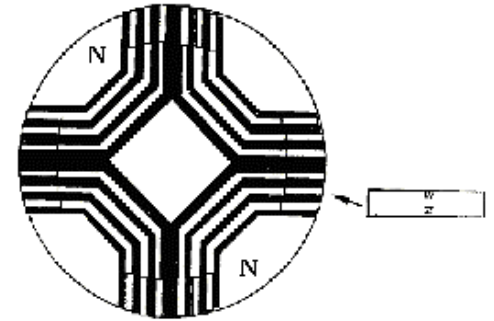
Fluxurile de magnetizare  $\Psi_{dm}$  și  $\Psi_{qm}$ , care sunt chiar fluxurile din întrefier pe axele d și q, se calculează în componenta de câmp a modelului.



# Modelul matematic, rotor fără înfășurare, cu magneți

Motoare sincrone reactive cu magneți permanenți în rotor, prevăzuți însă pe axa q .  
magneții reduc fluxul pe această axă.

În acest caz în cazul unui rotor fără colivie modelul devine :



Expresiile fluxurilor de magnetizare

$$\Psi_{dm} = M_d i_d, \quad \Psi_{qm} = M_q i_q - \Psi_E$$

Cuplul electromagnetic

$$T = p(\Psi_{dm} i_q - \Psi_{qm} i_d)$$

$$T = p(M_d - M_q) i_d i_q + p \Psi_E i_d$$

reluctant                      sincron

# Modelul matematic, rotor fără înfășurare, cu magneți

Ecuatii de tensiune

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d$$

Expresiile fluxurilor totale

$$\Psi_d = (M_d + L_\sigma) i_d,$$

$$\Psi_{qm} = (M_q + L_\sigma) i_q - \Psi_E$$

Înlocuind în ecuații de tensiune

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + \omega(L_q i_q - \Psi_E)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d,$$

deoarece

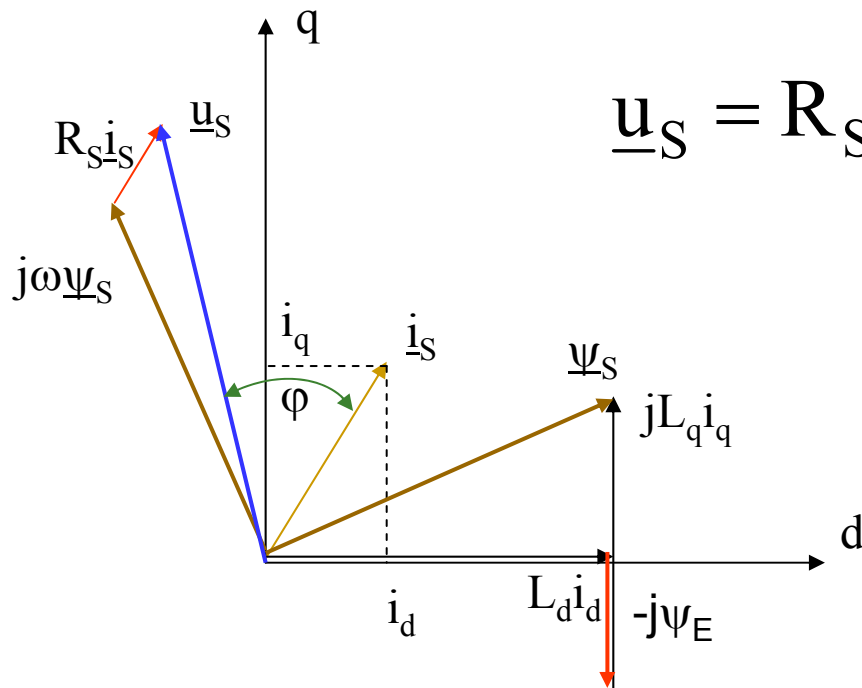
$$\frac{d\Psi_E}{dt} = 0$$

# Regimul stationar

$$\frac{di}{dt} = 0$$

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + \omega(L_q i_q - \Psi_E)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d,$$



$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + j\omega (L_d \underline{i}_d - j\Psi_E + jL_q \underline{i}_q)$$

Diagrama fazorială pentru motorul sincron reactiv cu magneți permanenți pe axa q în rotor.

## Regimul staționar

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + j\omega(\Psi_E - L_q \underline{i}_q)$$

Ecuția pulsației mecanice a rotorului este în acest caz

$$\omega = \frac{u_S - R_S \underline{i}_S}{jL_d \underline{i}_d + (\Psi_E - L_q \underline{i}_q)}$$

pentru un curent statoric pe direcția axei d,  $\underline{i}_d$ , aproximativ constant viteza rotorului depinde de fluxul magneților permanenți,  $\Psi_E$ , curentul de pe axa q  $\underline{i}_q$  fiind funcție de cuplul motorului.

## Datele motorului

Puterea nominala  $P_N = 1 \text{ kW}$ ,

numarul de poli  $2p = 4$ ,

numarul de faze  $m = 3$ ,

frecventa  $f = 50 \text{ Hz}$ ,

conexiunea infasurarilor stea

tensiunea nominală de fază  $U_N = 220 \text{ V}$ ,

curentul nominal  $I_N = 2.4 \text{ A}$ ,

inductivitatea de dispersie  $L_{s\sigma} = 4.58 \text{ mH}$ ,

rezistența fazei statorice,  $R_s = 5.1 \Omega$ ,

inductivitățile nesaturate pe cele două axe:

axa q  $M_{qo} = 3.91 \text{ mH}$ ,

axa d  $M_{do} = 87.9 \text{ mH}$

momentul de inerție rotoric  $J = 0.00334 \text{ Ws}^3$ .

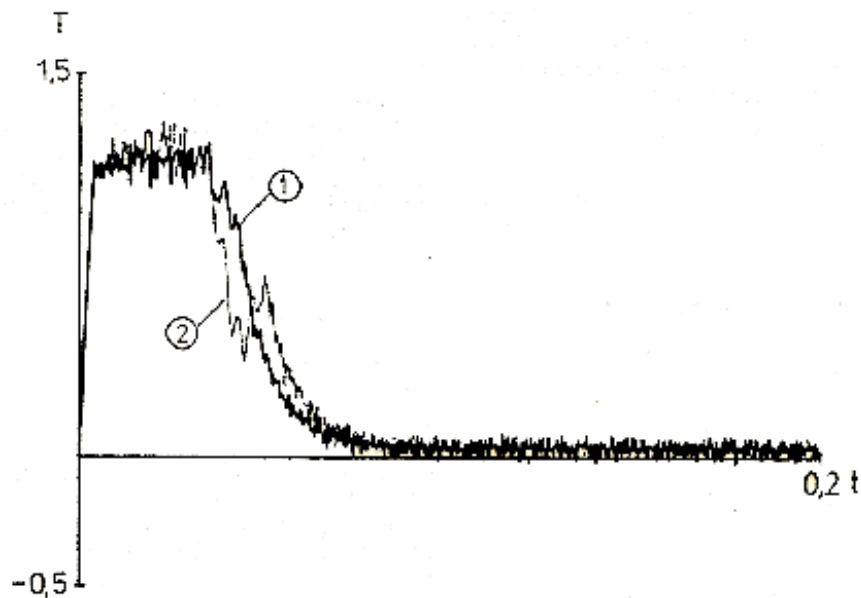
Magneții permanenți îngropați în rotor sunt de NdBFe

cu inducția remanentă  $B_r = 1.12 \text{ T}$  și

cu intensitatea câmpului coercitiv  $H_c = 600 \text{ kA/m}$

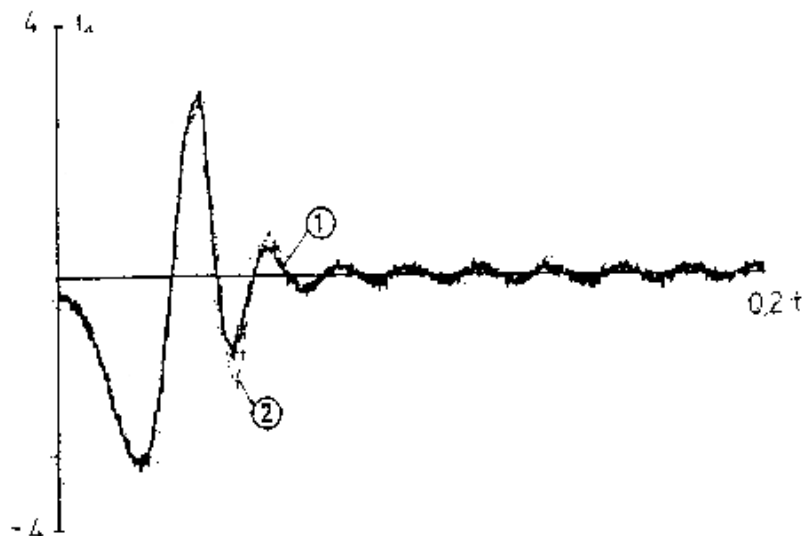
## Rezultatele simulării

Simulările s-au făcut pentru motorul alimentat cu un inverter de tip PWM controlat în curent pe baza unei strategii de câmp constant în rotor.

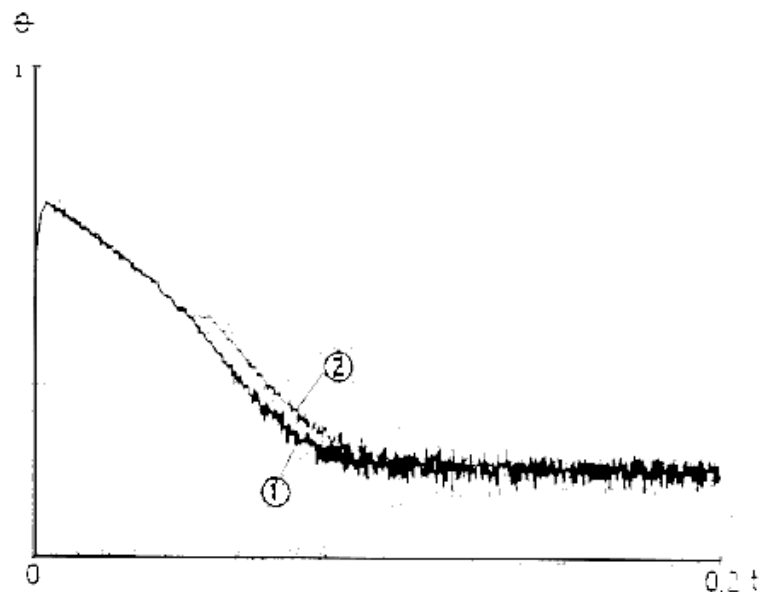


Cuplul în funcție de timp la pornirea în gol  
(1 - model circuit-câmp, 2 – model de circuit).

# Rezultatele simulării



Curentul din faza a în funcție de timp la pornirea în gol  
(1 - model circuit-câmp,  
2 - model de circuit).



Unghiul dintre axele rotorică și statorică în funcție de timp la pornirea în gol  
(1 - model circuit-câmp,  
2 - model de circuit).

# Modelul matematic, rotor fără înfășurare și magneți

La motoare sincrone reactive fără magneți permanenți în rotor

Fluxurile

$$\Psi_{dm} = M_d i_d, \quad \Psi_{qm} = M_q i_q$$

Cuplul

$$T = p(\Psi_{dm} i_q - \Psi_{qm} i_d)$$

Ecuatii de tensiune

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d,$$

In regim staționar

$$\underline{\Psi}_S = L_d i_d + jL_q i_q$$

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + j\omega(L_d i_d + jL_q i_q)$$



# Modelul matematic, factorul de putere

$$\underline{\Psi}_S = L_d \underline{i}_d + jL_q \underline{i}_q$$

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + j\omega(L_d \underline{i}_d + jL_q \underline{i}_q)$$

se neglijează rezistența fazei statorice

$$\underline{U}_S \cong \omega \cdot \underline{\Psi}_S$$

raportul k dintre inductivitățile  
de pe axele d și q

$$k = \frac{M_d}{M_q}$$

Valoarea maximă a factorului de putere este

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{1 - k}{1 + k}$$

Puterea absorbită în condițiile  
unui factor de putere maxim este

$$P_{i|\cos \varphi_{\max}} = 3U_S I_S \frac{1 - k}{1 + k}$$

pentru valoarea maximă a factorului  
de putere se obține pentru  
unghiul de sarcină  $\theta_0$  relația:

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \sqrt{k}$$

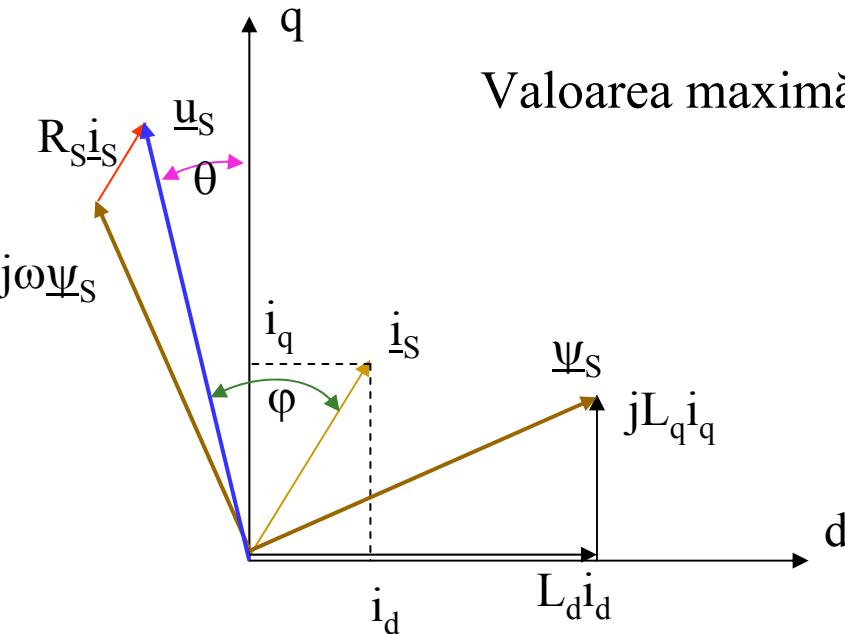


Diagrama fazorială

# Comparația cu motorul de inducție

Se consideră un raport  $k = 8$

Raportul inductivității pe axa  $d$  a mașinii sincrone reactive  $M_d$   
și inductivitatea de magnetizare a mașinii de inducție  $M_d/M = 0.94$

Raportul între cuplurile dezvoltate de cele două mașini; sincronă reactivă și de inducție

$$\frac{T_{sr}}{T_{in}} = 0.904$$

Factorul de putere maxim

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{1 - k}{1 + k} = \frac{7}{9} \cong 0.778$$

## Modelarea saturației la mașinile sincrone cu reluctanță variabilă

Mașinile sincrone cu reluctanță variabilă și raport al inductivităților pe cele două axe mic se comportă din punct de vedere al saturației la fel ca și mașinile sincrone uzuale, doar că nu au excitație rotorică.

Mărirea raportului inductivităților înseamnă creșterea saturației căii de flux pe axa d și micșorarea acesteia pentru axa q. Ca urmare, valoarea inductivității de magnetizare pe axa d,  $M_d$ , depinde puternic de curent iar inductivitatea de magnetizare pe axa q,  $M_q$ , rămâne constantă.

În modelele tip circuit-câmp luarea în considerare a efectelor saturației nu pune probleme, mai ales atunci când componenta de câmp a modelului este rezolvată printr-o metodă numerică, de exemplu metoda elementelor finite

Considerarea efectelor saturației magnetice într-un model de tip circuit al mașinii sincrone reactive implică însă măsurători foarte exacte ale variației inductivității funcție de curent. De asemenea trebuie luate în considerare efectele cuplajelor parazite datorate saturației

## Comanda mașinii sincrone reactive

Există două strategii de **comandă scalare** des utilizate în cazul mașinii sincrone reactive

1- menținerea fluxului statoric  $\Psi_s$

$$\Psi_s = I_q \sqrt{L_d^2 \lambda^2 + L_q^2}, \quad \lambda = \frac{I_d}{I_q}$$

Cuplul electromagnetic

$$T = p(M_d - M_q)I_q^2 \lambda \quad \longrightarrow \quad T = p(M_d - M_q) \frac{\Psi_s^2 \lambda}{L_d^2 \lambda^2 + L_q^2}$$

Valoarea maximă a cuplului electromagnetic pentru o valoare dată a fluxului statoric  $\Psi_s$  se obține anulând derivata:

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = 0$$

# Comanda mașinii sincrone reactive

Rezultă:

Cuplul maxim se obține pentru:

$$\lambda_k = \frac{L_q}{L_d} \approx \frac{1}{k}$$

Cuplul maxim

$$T_k = p(M_d - M_q) \frac{\Psi_s^2}{2L_d L_q}$$

Cuplul raportat

$$\frac{T}{T_k} = 2 \frac{\Psi_d \Psi_q}{\Psi_s^2}$$

2- curentul statoric pe axa **d** este constant

$$T = pI_d^2 \frac{1}{\lambda} (M_d - M_q)$$

# Comanda mașinii sincrone reactive

In cazul **controlului vectorial** al mașinii sincrone reactive există cinci variante de implementare practică, și anume:

1. Cuplul maxim pe valoarea de curent (MTA),  $\lambda = 1$ ;
2. Factor de putere maxim (MPF), ;
3. Valoarea maximă a variației cuplului (MRT), ;
4. Curent pe axa d constant (CDC);
5. Randament maxim (ME),  $\lambda = \text{ctg}\alpha$ . unde  $\alpha$ , unghiul de fază al curentului.

$$\text{tg}\alpha = \sqrt{\frac{R_s R_c^2 + \omega^2 L_d^2 (R_s + R_c)}{R_s R_c^2 + \omega^2 L_q^2 (R_s + R_c)}}$$

rezistența echivalentă pierderilor în fier  $R_c$

$$R_c = \frac{\omega^2 \Psi_m^2}{p_{Fe}}$$

---

## Comanda mașinii sincrone reactive

In afara strategiei de control corespunzătoare randamentului maxim, ME, care se bazează pe un control al defazajului curentului, toate celelalte se bazează pe controlul valorii curentului.

Controlul de tip MRT (Valoarea maximă a variației cuplului) este un control la flux statoric constant și pierderile în miez nu variază.

In consecință, un astfel de control este folosit la frecvențe, deci și la viteze de rotație, ridicate

Mașinile electrice cu reluctanță variabilă au căpătat în ultimul timp, datorită diversificării și creșterii performanțelor sistemelor electronice de alimentare și control, o răspândire din ce în ce mai mare, ocupând un segment în creștere din piața acționărilor cu turație variabilă.

---

---

## Bibliografie

**Biro, K., Viorel, I.A.:** “On the synchronous machine dynamic behaviour modeling”, Proc. of ICEM’94, Paris, vol. II, pp. 134-138

**Biro K.A., Viorel I.A., Syabo L., Henneberger G.** “ Maşini electrice speciale ”, *Editura MEDIAMIRA*, Cluj-Napoca, 2005.

**Boldea, I.:** “Reluctance synchronous machines and drives”, Clarendon Press, Oxford, 1996

**Boldea,i., Nasar,s.A.:** “A unified analysis of magnetic saturation in orthogonal axis models of electric machines”, EMPS vol.12, no.3, 1987, pp.195-204

**Busch,T.J., Law,J.D., Lipo,T.A.:** “Magnetic circuit modeling of the field regulated reluctance machine. Part II Saturation modeling and results” IEEE Trans on Energy Conversion, vol.11, no.1, 1996, pp.56-61

**Chalmers,B.J., Musaba,l.:** “Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially laminated rotor”, IEEE Trans on Industry Applications, voll.34, no.5, 1998, pp.1035-1041

---



## Bibliografie

**Chalmers, B.J., Akmese, R., Musaba, L.:** “Design and field-weakening performance of permanent-magnet/reluctance motor with two-part rotor”, IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 145, March 1999, pp. 133-139

**Chisu, Ioana, Biro, K.A., Viorel, I.A., Hedesiu, H.C., Ciorba, R.C.:** “On the synchronous reluctance machine rotor geometry”, Proc. of Electromotion, 1999, Patras, Greece, pp. 161-166

**Fernandez-Fernal,F., Garcia-Cerrada,A., Faure,R.:** “Efficient control of reluctance synchronous machines”, Proc. of IECON’98, pp. 923-928

**Law, J.D., Chertok, A., Lipo, T.A.:** “Design and performance of the field regulated reluctance machine”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 5, sept./oct. 1994, pp. 1185-1192

**Law, J.D., Busch, T.J., Lipo, T.A.:** “Magnetic circuit modelling of the field regulated reluctance machine”, Part I. Model development, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 11, no. 1,1996, pp. 49-55

**Lipo, T.A., Matsuo, T.:** “Performance of synchronous reluctance motor drives” in “Synchronous Reluctance Motors and Drives, A New Alternative”, IEEE-IAS Annual Meeting, 1994, pp. 1.1-1.33

---

## Bibliografie

**Levi, E.:** “Saturation modelling in D-Q axis models of salient pole synchronous machines”, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 1, 1999, pp. 44-50

**Nagrial, M.H., Sadri, S.M.R.:** “Axially-laminated cum flux-guided reluctance motors with improved performance”, Proc. of PEDS’97, pp. 188-192

**Ojo, O.:** “Field orientation control of a doubly-fed synchronous reluctance machine” Proc. of PESC’98, pp. 1276-1282

**Ojo, O., Lipo, T.A.:** “An improved model for saturated salient pole synchronous motors”, IEEE Trans. on Energy Conv., vol. 4, no. 1, 1989, pp. 135-142

**Ojo, O., Wu, Z.:** “Performance characteristics of dual winding reluctance generators”, IEE Proc. Electric Power and Applications, vol. 144, no. 6, 1997, pp. 461-468

**Seyu, T., Omoda, A., Uezato, K.:** “High efficiency control of synchronous reluctance motors using extended Kalman filter”, Proc. of PESC’98, pp. 1309-1314

---

---

## Bibliografie

**Soong, W.L., Staton, D.A., Miller, T.J.E.:** “Design of a new axially-laminated interior permanent magnet motor”, IEEE Trans. on Ind. Appl.1995, vol. 31, pp. 358-367

**Viorel, I.A., Biro, K.:** “Permanent-magnet synchronous motor simplified field-circuit model”, Proc. of Eelectromotion’95,Cluj, Romania, pp. 182-187

---