
Motorul cu reluctanța comutată

SRM

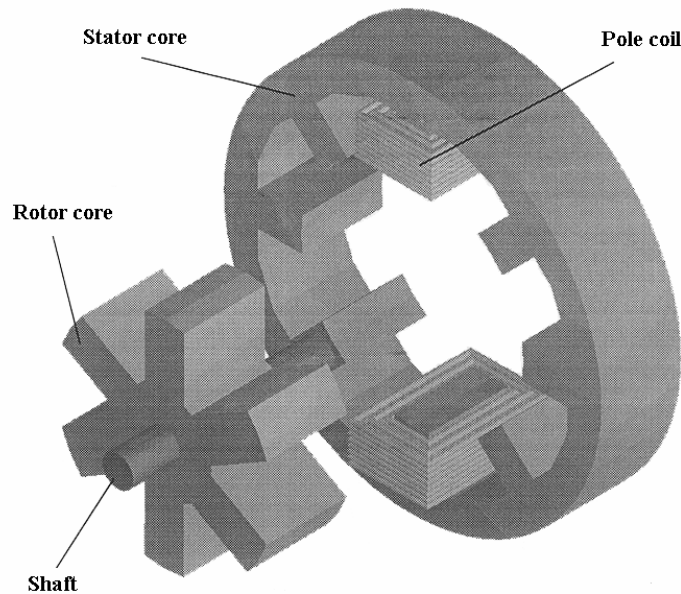
Generalități

Este un motor cu **reluctanta variabila**, are poli aparenti pe stator și pe rotor, rotorul fiind, în construcțiile uzuale, pasiv, deci fără înfășurări sau magneți permanenți.

Deplasarea prin salturi a câmpului

Mișcarea continuă a rotorului

mașini cu reluctanță comutată



denumiri utilizate:

VRM = *V*ariable *R*eluctance *M*otor,
mai ales în SUA,

ECRM = *E*lectronically *C*ommutated
*R*eluctance *M*otor, în Anglia, - este mult
mai aproape de principiul de
funcționare al motorului,

SRM = *S*witched *R*eluctance *M*otor

Istoria

SRM are o lungă istorie fiind unul dintre primele motoare electrice construite și utilizate. Astfel:

- în 1838 Davidson a acționat un vagon motor pe calea ferată dintre Glasgow și Edimburgh în Scoția cu un SRM de o construcție apropiată de cea de astăzi.
 - În 1840 pentru o variantă de SRM s-a acordat un patent lui Taylor în Marea Britanie.
 - De altfel și motorul pas cu pas inventat de Walker în deceniul al treilea al secolului trecut este o variantă de SRM.
- Numele de SRM a fost introdus de Nasar în 1969, care a descris un SRM destul de rudimentar.
 - În anii 70 SRM câștigă teren și prototipurile realizate sunt foarte aproape de motoarele care se construiesc astăzi. Atunci se dezvoltă comanda alimentării fazelor prin convertoare electronice și se pun la punct primele variante de controlere specializate.

Construcția

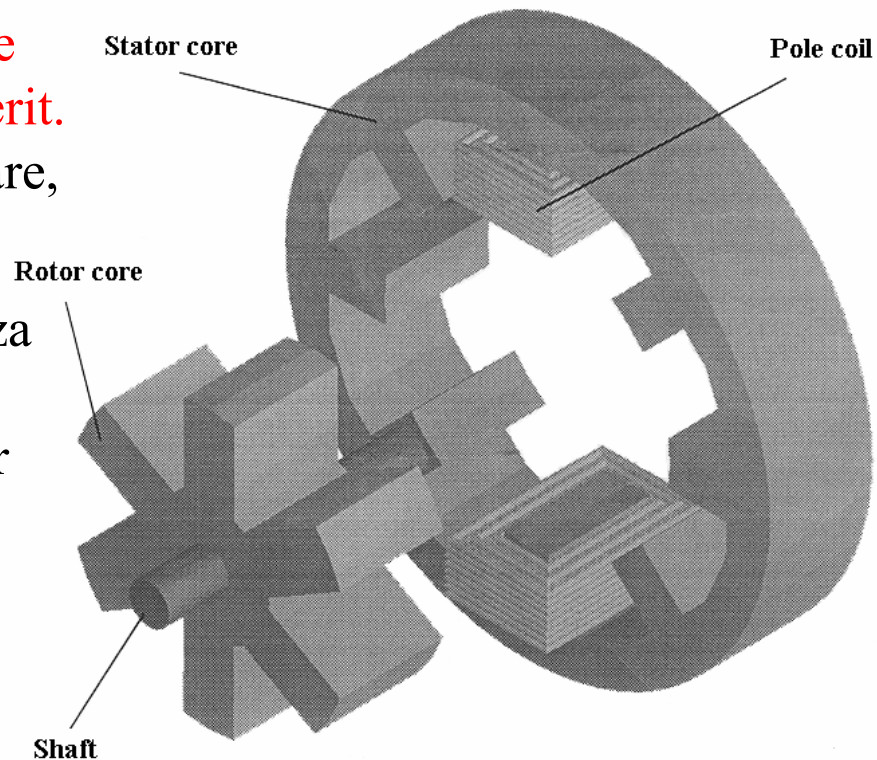
Motorul cu reluctanță comutată (SRM = **S**witched **R**eluctance **M**otor) are poli aparenti pe stator și pe rotor, rotorul fiind, în construcțiile uzuale, pasiv, deci fără înfășurări sau magneți permanenți.

Pentru a preveni blocarea rotorului în timpul funcționării **numărul de poli pe stator și pe rotor este diferit**. Diferența, la motoarele elementare, este **2**.

Numărul de faze: se poate realiza **0 fază pe 2 sau 4 sau 6 pol;**

- $m_{\text{minim}} = 2$; deci 4 poli pe stator
- Trifazat, 6/4 sau 6/8,
- 4 faze: 8/6 sau 8/10,
- 5 faze: 10/8 sau 10/12

Sistem de detectare a poziției rotorului.

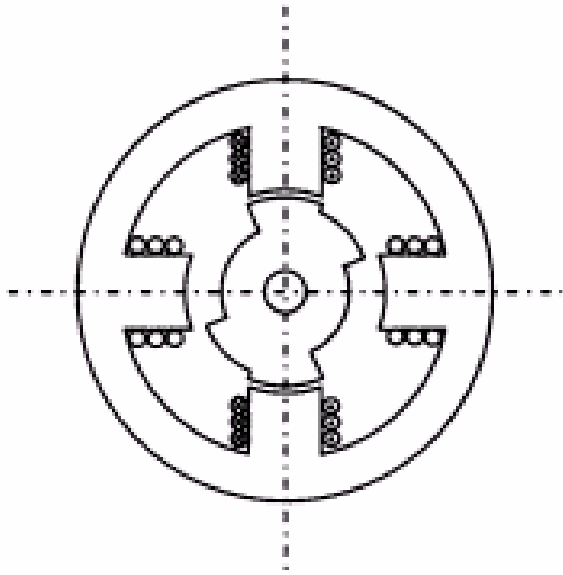


Construcția

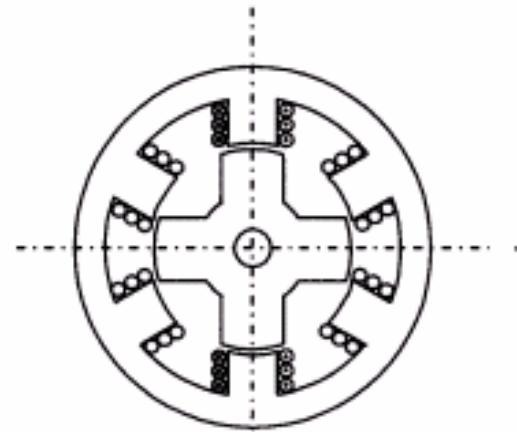


Miezul feromagnetic
si elemente
constructive ale unui
SRM cu 6/4 poli.
**Laboratorul de
Masini Electrice,
Universitatea
Tehnica din Cluj**

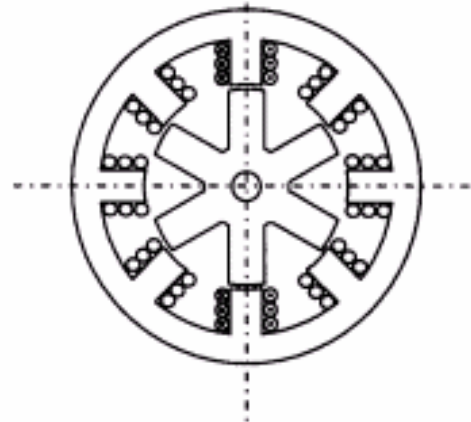
Variante constructive



O structură de motor bifazat cu patru poli pe stator și doi pe rotor, polii rotorici au o formă specifică pentru a evita blocarea rotorului și a se asigura o rotație continuă a acestuia.

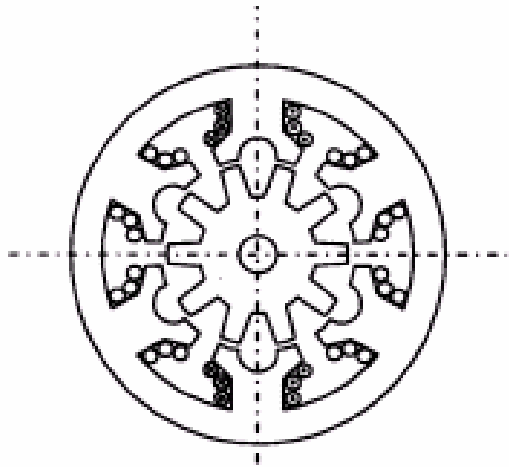


Un motor trifazat cu 6/4 poli



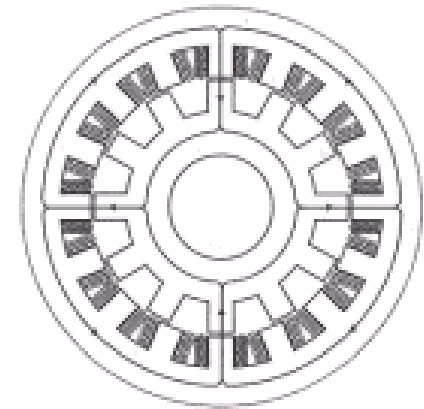
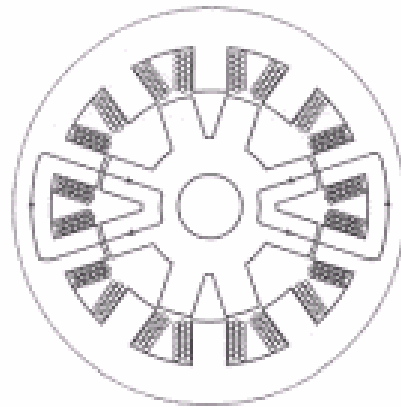
Un motor cu 4 faze și 8/6 poli

Variante constructive



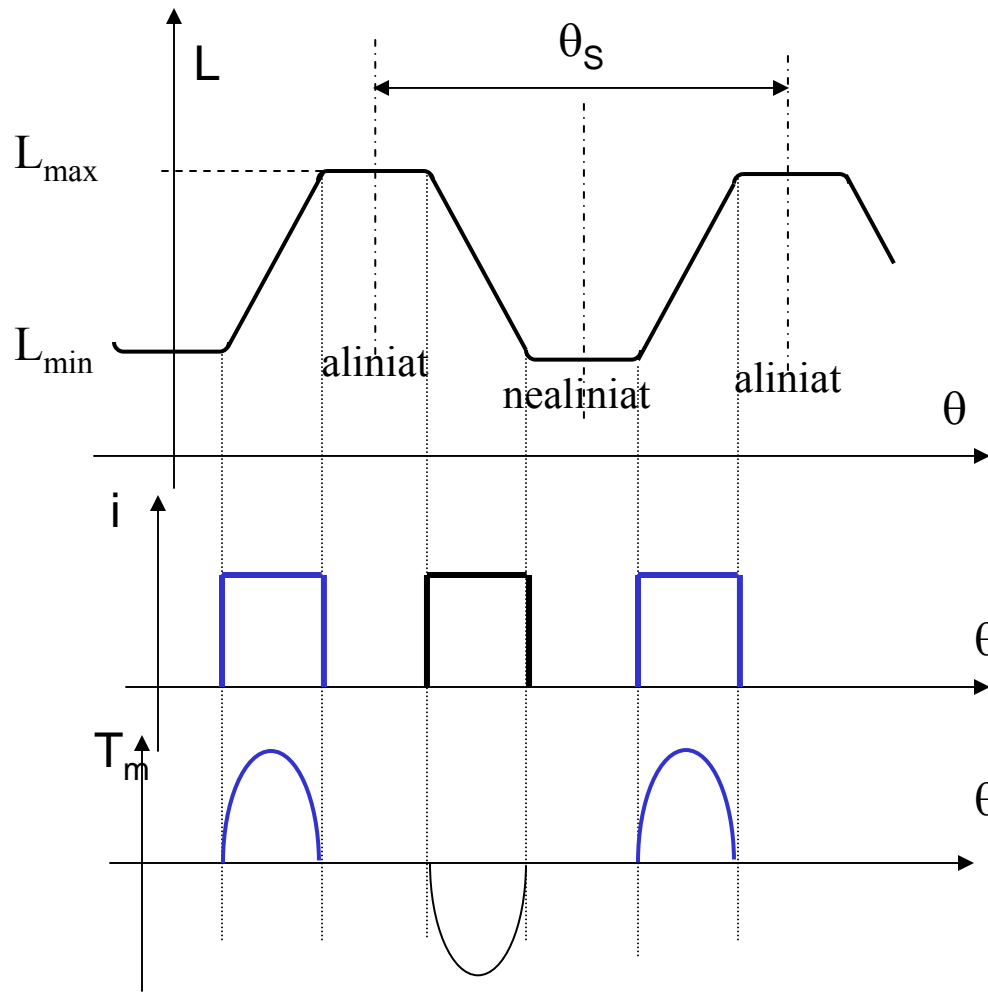
Un motor cu trei faze cu
6 poli statorici divizați și
zece poli rotorici,

Un motor cu cinci faze și 10/8 poli, dar cu
perechi de câte doi poli rotorici apropiați
(poli duali) și fazele create prin alimentarea
bobinelor a câte două perechi de poli
consecutivi statorici,



Un motor cu patru faze și
16/12 poli, pentru fiecare
fază fiind alimentate
bobinele de pe patru poli
plasați pe două diametre
perpendiculare.

Variația inductanței și alimentarea SRM



Cuplul electromagnetic

$$T_m = \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\theta}$$

Cum trebuie alimentat ?

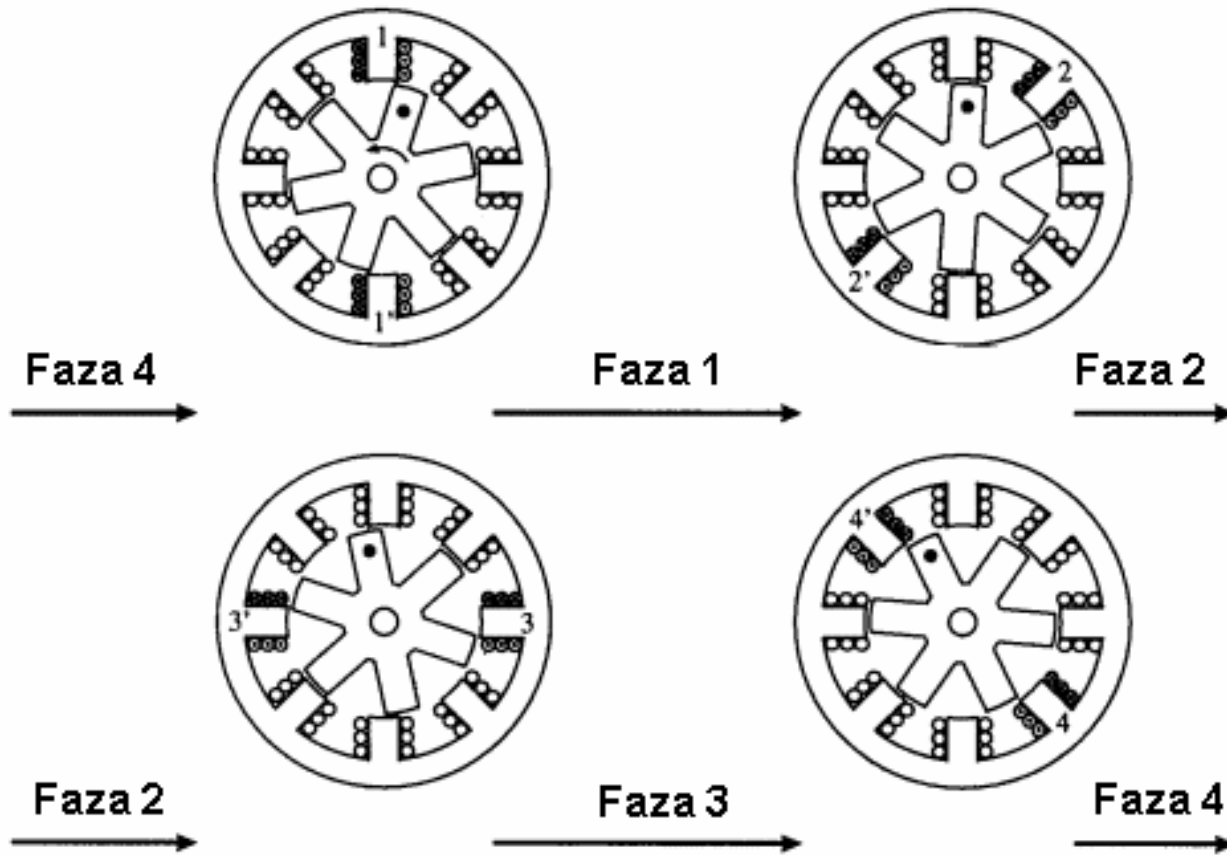
Numai când L variază !

Sensul curentului ?

Alimentare secvențială unipolară dependentă de poziția rotorului.

În regim de motor cuplul are tendința să deplaseze rotorul într-o poziție aliniată, poziție de reluctanță minimă.

Secvențe de alimentare la un motor cu patru faze.



Fazele sunt alimentate în secvență orară în timp ce rotorul se rotește în sens invers

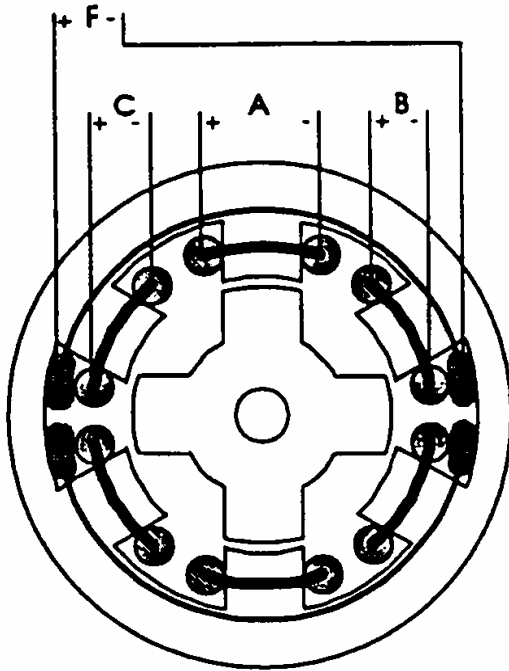
Acest fapt este tipic pentru SRM

Variante constructive

Pentru îmbunătățirea performanțelor SRM s-au propus diverse variante constructive:

cu magneți permanenți sau
cu înfășurări de excitație auxiliară,

rezultând astfel motoare hibride cu excitație și cu reluctanță variabilă.



Motorul hibrid, un SRM cu 6/4 poli are o înfășurare concentrată cu pas diametral alimentată în curent continuu - SRDCM .

Folosind o înfășurare alimentată în curent continuu se asigură producerea câmpului de magnetizare și se reduce astfel curentul de fază.

Prin premagnetizarea miezului cu solenația de excitație se asigură o creștere a coenergiei sistemului, deci și a cuplului

Modelul matematic al SRM

Acest motor este alimentat secvențial, în general **doar o fază la un moment de timp**

SRM funcționează cu **circuitul magnetic saturat** pentru a se îmbunătăți performanțele energetice și a se reduce timpul necesar stingerii curentului prin faza deconectată

Modelul matematic al SRM trebuie să conțină :

- neliniaritățile date de **saturația circuitului magnetic**,
- de **variația reluctanței întrefierului** cu poziția rotorului.

Cum SRM nu funcționează decât :

- alimentat printr-un convertor electronic specific
- controlat în funcție de poziția rotorului.

este necesară cuprinderea întregului sistem (motor,convertor,detector poziție) în **modele mai complexe**, modele în care motorul reprezintă doar o parte.

Modelul matematic al SRM

Ecuția de tensiuni pentru o fază λ a motorului este, sens de receptor

$$u_\lambda = R_\lambda \cdot i_\lambda + \frac{d\psi_\lambda}{dt}$$

Fluxul total prin faza considerată este:

$$\psi_\lambda = L_{\sigma\lambda} \cdot i_\lambda + \psi_{m\lambda}$$

fluxul util prin fază

$$\psi_{m\lambda} = \psi_{m\lambda\lambda} + \sum_{\nu \neq \lambda} \psi_{m\nu\lambda}$$

unde primul termen reprezintă fluxul util produs de faza λ iar cel de-al doilea conține toate fluxurile produse de celelalte faze care trec prin faza λ și sunt utile, adică străbat întrefierul.

Modelul matematic al SRM

Dacă este excitată la un moment de timp o singură fază, și se neglijează fluxurile date de curenții care nu sunt încă zero, din fazele decuplate de la sursă, atunci rămâne:

$$\Psi_{m\lambda} = \Psi_{m\lambda\lambda}$$

Cum fluxul este funcție de curențul i_λ și de poziția relativă a rotorului caracterizată prin unghiul θ , derivata fluxului util rezultă:

$$\frac{d\Psi_{m\lambda\lambda}}{dt} = \frac{\partial\Psi_{m\lambda\lambda}}{\partial i_\lambda} \cdot \frac{di_\lambda}{dt} + \frac{\partial\Psi_{m\lambda\lambda}}{\partial\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad \text{unde} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Datorită structurii particulare a motorului fluxul util (de magnetizare) este de fapt fluxul în întrefier sub polii fazei λ .

$$u_\lambda = R_\lambda \cdot i_\lambda + \left(L_{\sigma\lambda} + \frac{\partial\Psi_{m\lambda\lambda}}{\partial i_\lambda} \right) \frac{di_\lambda}{dt} + \omega \frac{\partial\Psi_{m\lambda\lambda}}{\partial\theta}$$

Modelul matematic al SRM

Cuplul produs de faza energizată este dat de derivata coenergiei magnetice în funcție de unghiul ce caracterizează poziția rotorului, adică:

$$T_\lambda = \frac{\partial W_\lambda'}{\partial \theta} = \int_0^i \frac{\partial \psi_\lambda}{\partial \theta} \cdot di$$

Ecuția de echilibru a cuplurilor este cea uzuală:

$$T = \frac{J}{p_p} \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_s$$

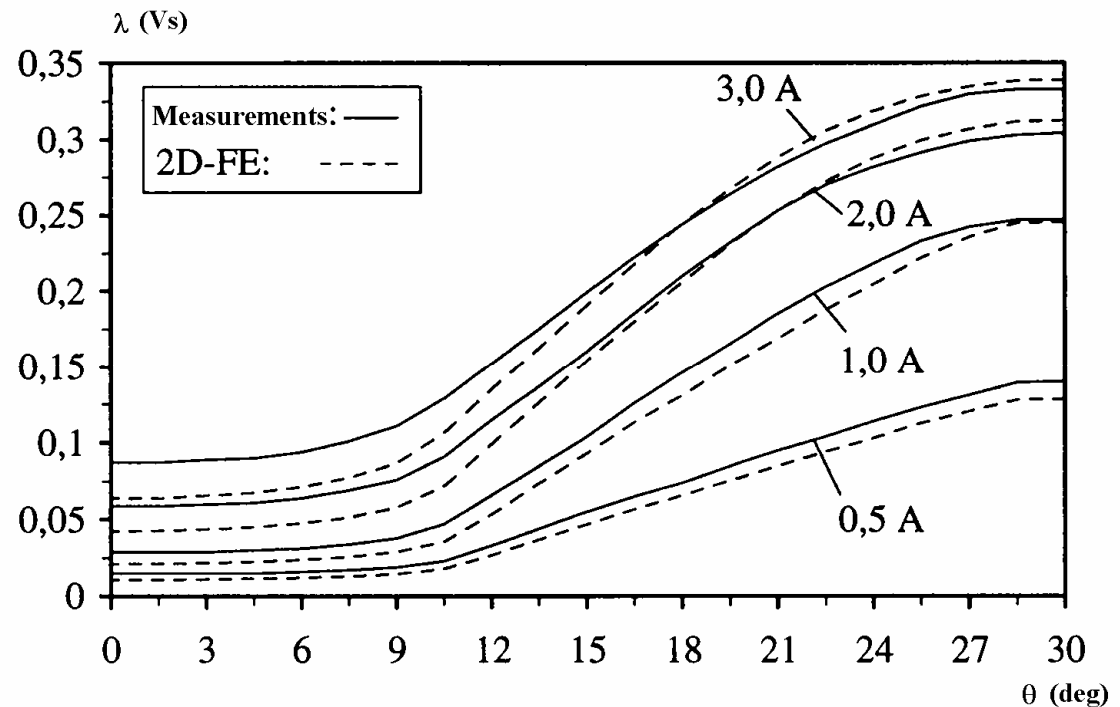
variația fluxului util în funcție de curent și de poziția rotorului,

$$\psi_{m\lambda\lambda} = f(i_\lambda, \theta)$$

Modelul matematic al SRM

Obținerea acestei relații se poate face prin calculul electromagnetic de câmp. Având în vedere faptul că în mod normal calculul de câmp este un pas necesar în proiectarea motorului aceste rezultate există și în consecință ele se pot da tabelar în două dimensiuni. Aceeași relație se poate obține experimental în cazul unui motor existent.

Fluxul total funcție de poziția rotorului și de curent la un SRM cu 8/6 poli, - valori măsurate, - - - valori calculate cu metoda elementului finit



Modelul matematic al SRM

S-au propus diverse modele simplificate, echivalente.

un model bazat pe considerarea **reluctanțe variabile a întrefierului**.

Acest model are marele avantaj că se poate utiliza practic la orice mașină cu reluctanță variabilă cu foarte puține precizări și modificări.

Permeanța echivalentă variabilă a întrefierului se definește cu relația

$$P(\theta, i) = \frac{1}{g_*} (1 + P_R \cos \theta)$$

P_R este coeficientul permeanței echivalente,

Unde:

$$P_R = \frac{4}{\pi} \cdot \beta \cdot k_{CR} \cdot \sin \left(\frac{\gamma}{\beta} \cdot \frac{g}{\tau_R} \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\beta = \frac{(1-f)^2}{2(1+f^2)}$$

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left(u \cdot \operatorname{tg}^{-1} u - \ln \sqrt{1+u^2} \right)$$

Modelul matematic al SRM

$$\beta = \frac{(1-f)^2}{2(1+f^2)}$$

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left(u \cdot \operatorname{tg}^{-1} u - \ln \sqrt{1+u^2} \right)$$

$$f = u + \sqrt{1+u^2}$$

$$u = b_{Rs} / 2g$$

τ_R, b_{Rs} fiind pasul polar, respectiv deschiderea de creștătură din rotor.

g^* Întrefierul echivalent $g^* = k_{CR} \cdot k_s \cdot g$

factorul lui Carter, creștături considerate doar în rotor, fiind dat de relația:

$$k_{CR} = \frac{\tau_R}{\tau_R - \gamma \cdot g}$$

Factorul de saturație depinde de curentul de fază și poate fi calculat pentru o poziție aliniată analitic sau prin calcul numeric,

$$k_s = f(i)$$

Modelul matematic al SRM

Inducția variabilă în întrefier este:

$$B_g(\theta, i) = F \cdot \mu_0 \cdot P(\theta)$$

unde F este solenația fazei considerate.

Valoarea maximă a inducției în întrefier se obține în poziția aliniată, deci:

$$B_{g \max}(i) = B_g(\theta, i)_{\theta=0} = F \cdot \mu_0 \frac{1}{g^*} (1 + P_R)$$

și în consecință

$$B_g(\theta, i) = B_{g \max}(i) \frac{1 + P_R \cos \theta}{1 + P_R}$$

Modelul matematic al SRM

Inductanța unei faze, funcție de curent și de poziția rotorului este:

$$L(\theta, i) = M_d(i) \frac{1 + P_R \cos \theta}{1 + P_R} + L_{S\sigma}$$

cu inductanța în poziție aliniată, pe direcția axei d,

$$M_d(i) = \frac{B_{g \max}(i) \cdot N \cdot A_p}{I}$$

unde N , A_p și I sunt numărul de spire pe fază, aria polului statoric și respectiv valoarea efectivă a curentului de fază.

Derivata fluxului total este acum:

$$\frac{d\psi(\theta, i)}{dt} = L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

Modelul matematic al SRM

după efectuarea calculelor

$$\frac{d\psi(\theta, i)}{dt} = \left(M_d(i) \frac{1 + P_R \cos \theta}{1 + P_R} + L_{S\sigma} \right) \frac{di}{dt} - \omega \cdot M_d(i) \frac{P_R \sin s\theta}{1 + P_R} \cdot i$$

Cuplul electromagnetic rezultă

$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} = k_C \cdot i \cdot \sin \theta$$

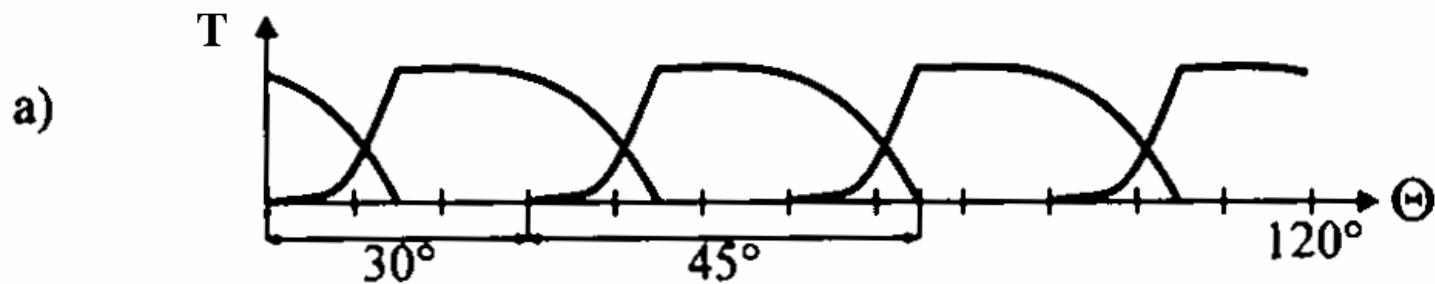
Dacă curentul este constant cuplul variază sinusoidal .

cu constanta de cuplu, dependentă de curent :

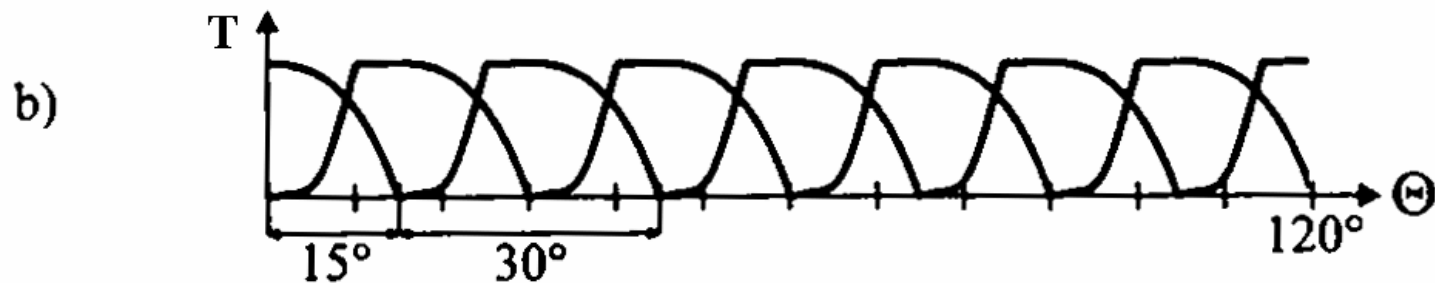
$$k_C = \frac{N}{2} \cdot A_p \cdot \frac{P_R \cdot B_{g \max}}{1 + P_R} \cdot Q_{sf}$$

unde Q_{sf} este numărul de poli pe care se realizează o fază, număr egal cu 2 la SRM elementar

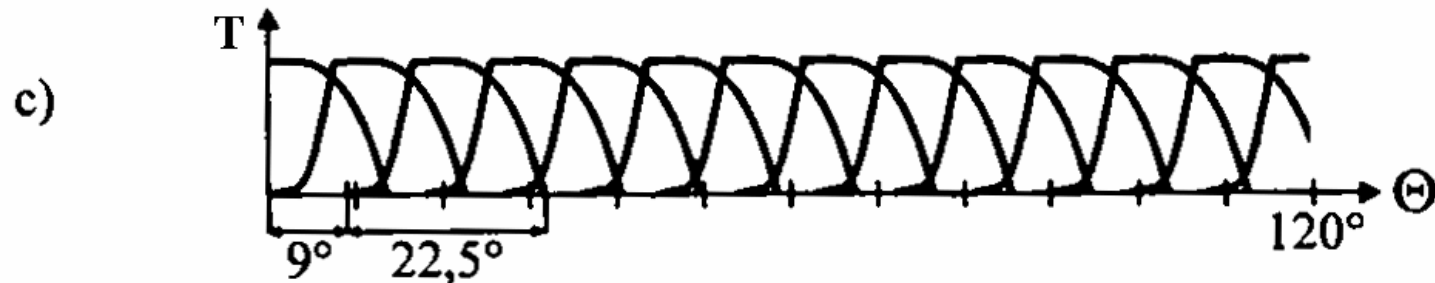
Variația cuplului funcție de poziția rotorului,



Trei faze



Patru faze



Cinci faze

Modelul matematic al SRM

model în SIMULINK

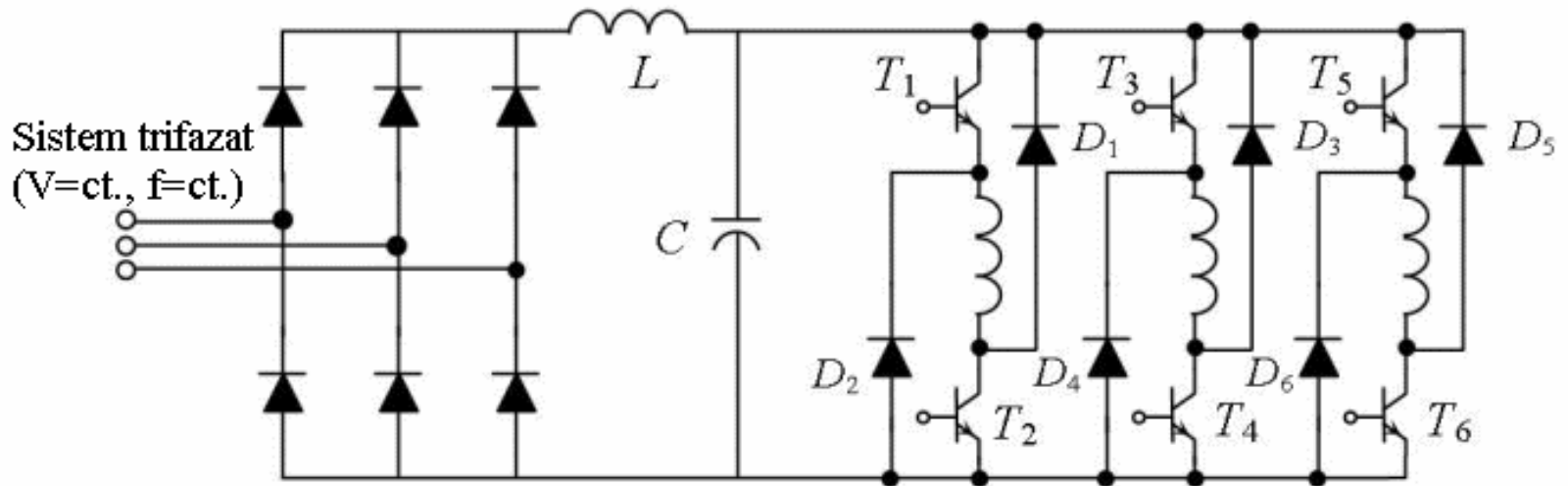
$$\frac{di}{dt} = \frac{u - \left(R + Q_R \cdot \Omega \cdot M_d \frac{P_R \sin \theta}{1 + P_R} \right) i}{\frac{M_d}{1 + P_R} (1 + P_R \cos \theta) + L_{S\sigma}}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (K_C \cdot i \cdot \sin \theta - T_s)$$

unde Q_R și Ω reprezintă numărul de poli rotorici respectiv viteza unghiulară a rotorului.

Alimentarea SRM

Un convertor complet, care conține și redresorul de la rețea și circuitul intermediar de curent continuu, pentru un SRM trifazat este realizat cu punte asimetrică pe fiecare fază .

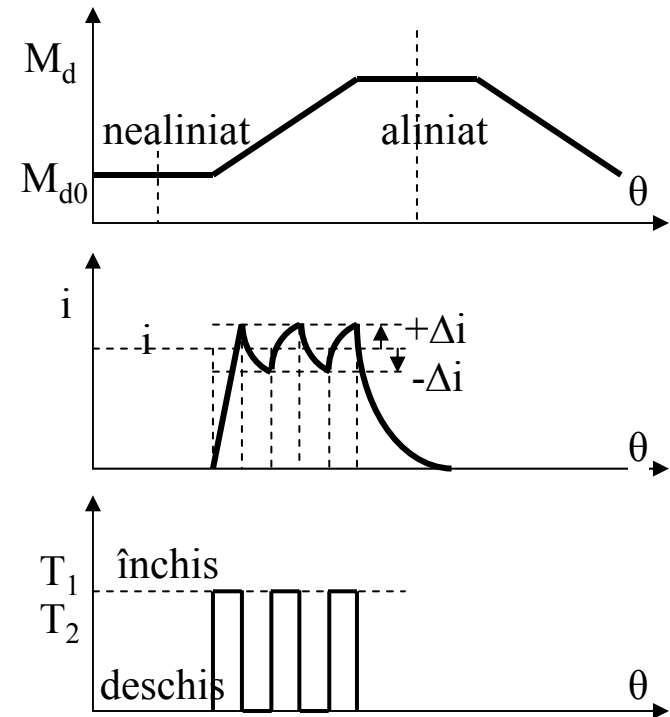
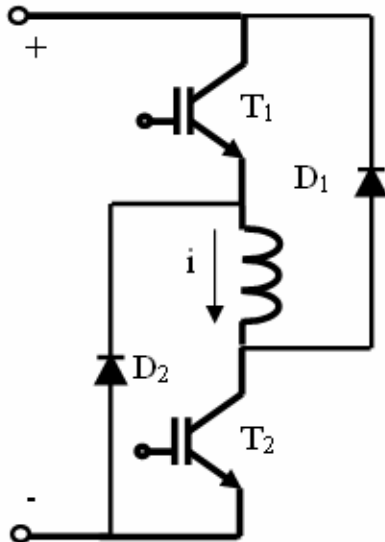


Cu o astfel de punte asimetrică sunt posibile două strategii de alimentare a fazei atunci când controlul curentului se face prin modularea în durată a pulsurilor(mod PWM).

Strategii de alimentare a fazei

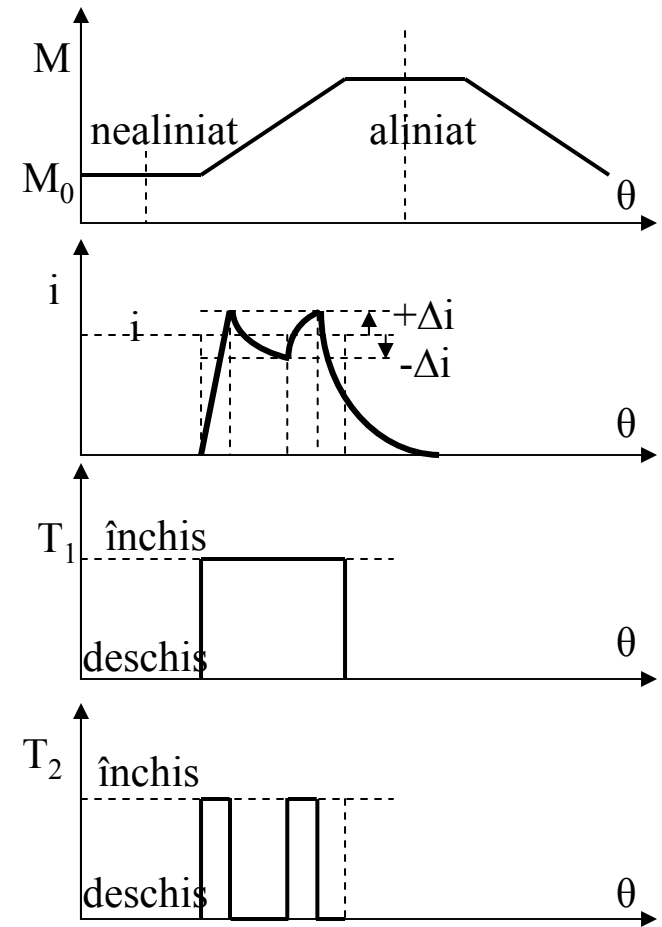
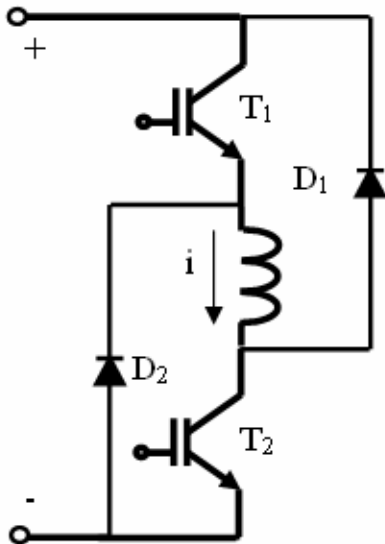
Cu o astfel de punte asimetrică pe fiecare fază, sunt posibile **două strategii de alimentare** atunci când controlul curentului se face prin modularea în durată a pulsurilor (mod PWM).

În primul caz tranzistoarele T_1 și T_2 conduc sau nu simultan.



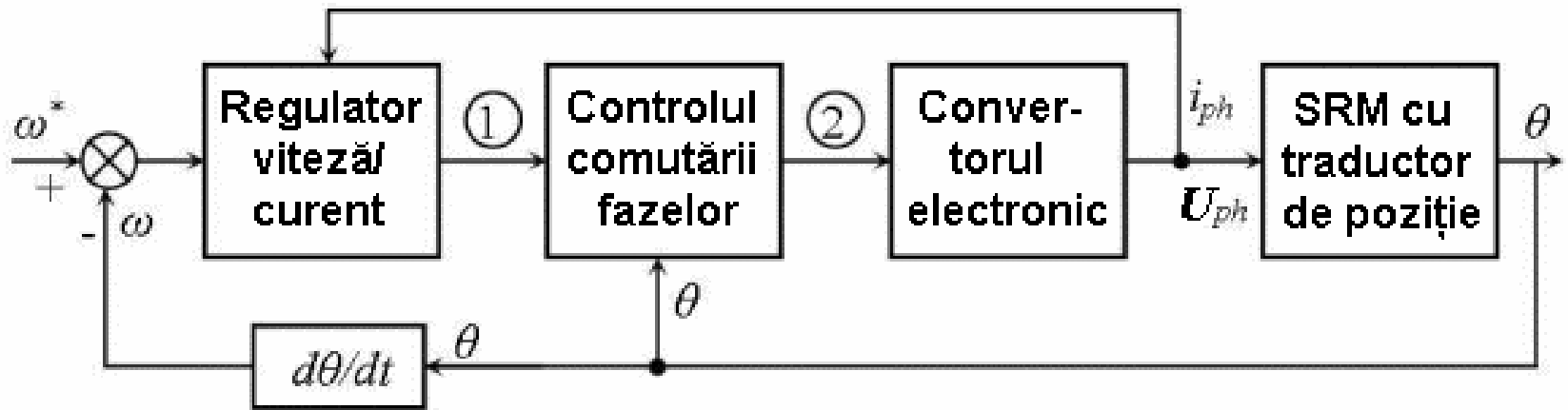
Strategii de alimentare a fazei

În cel de-al doilea caz tranzistorul T_1 conduce ciclul întreg de conducție a fazei, controlul curentului din fază în mod PWM este realizat cu tranzistorul T_2 care este comutat.



Schemă bloc pentru controlul unui SRM

Există cel puțin două regulatoare , unul turație / curent care generează valoarea curentului de referință în funcție de cuplu și de turație și unul de tip histerezis care generează semnalele de comandă în mod PWM funcție de curentul de fază.



Există și două moduri de control mai simple , dar și mai puțin performante, care nu necesită utilizarea unui regulator cu histerezis:

- controlul în tensiune, când lățimea și frecvența impulsurilor este dată și nu depinde de curent,
- controlul cu un singur puls, când nu se controlează curentul de fază, tranzistoarele conducând tot timpul perioadei care corespunde alimentării unei faze.

Generalități

Avantaje:

- un rotor pasiv cu inerție redusă,
- cuplu mare la pornire,
- cost redus

Dezavantaje:

- necesitatea detectării poziției rotorice,
- necesitatea alimentării printr-un convertor electronic
- variațiile de cuplu pe o rotație completă

Aplicație :

- mașina de spălat automata Neptune produsă de compania Maytag , motorul și partea de alimentare și comandă produse de compania Emerson.
-

Bibliografie

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

Boldea I., "*Reluctance synchronous machines and drives*", Clarendon Press, Oxford, 1996.

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 (1996), no. 1, pp. 56-61.

Crivii M., Jufer M., "*Two-phase two-stack SR motor*", Proc. of ICEM '98, Istanbul, vol. 3, pp. 1670-1673.

Crivii M., Viorel I.A., Jufer M., Husain I., "*3D to 2D equivalence for a tranverse flux reluctance motor*", Proc. of ICEM '02, Brugge (Belgia), pe CD: 592.pdf.

Husain I., "*Indirect rotor-position estimation techniques for switched reluctance motors: a review*", *Electromotion*, vol. 3 (1996), no. 2, pp. 94-102.

Lipo T.A, and 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

Li Y., Lloyd J.D., Horst G.E.: "*Switched reluctance motor with DC assisted excitation*", Proc. of IEEE - IAS Annual Meeting, 1996, pp. 801-807.

Jufer M, Crivii M, and Viorel I.A, "*On the switehed reluctance motor air-gap permeance calculation*" Proc. of the first International Symposion Electromotion, Cluj, Romania 1995, pp 141-146

Krishnan R, "*Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications* ", CRC Press, Boca Ratton, 2001.

Magureanu R, and Vasile N, "*Servomotoare fara perii tip sincron*" , Ed. Tehnica Bucuresti, seria Masini aparate electrice, 1990.

Martiş Claudia, "*Contribuții la studiul motoarelor cu reluctanță variabilă și magneți permanenți autocomutate electronic*", Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj, 2001.

Miller, T.J.E.: „*Switched reluctance motors and their control*”. Clarendon Press, Oxford 1993.

Seyu T, Omoda A, and Uezato K, "*High efficiency control of synchronous reluctance motors using extended Kalman filter*", Proc. of PESC'98, pp. 1309-1314
