
Motorul cu reluctanța comutată

SRM

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.

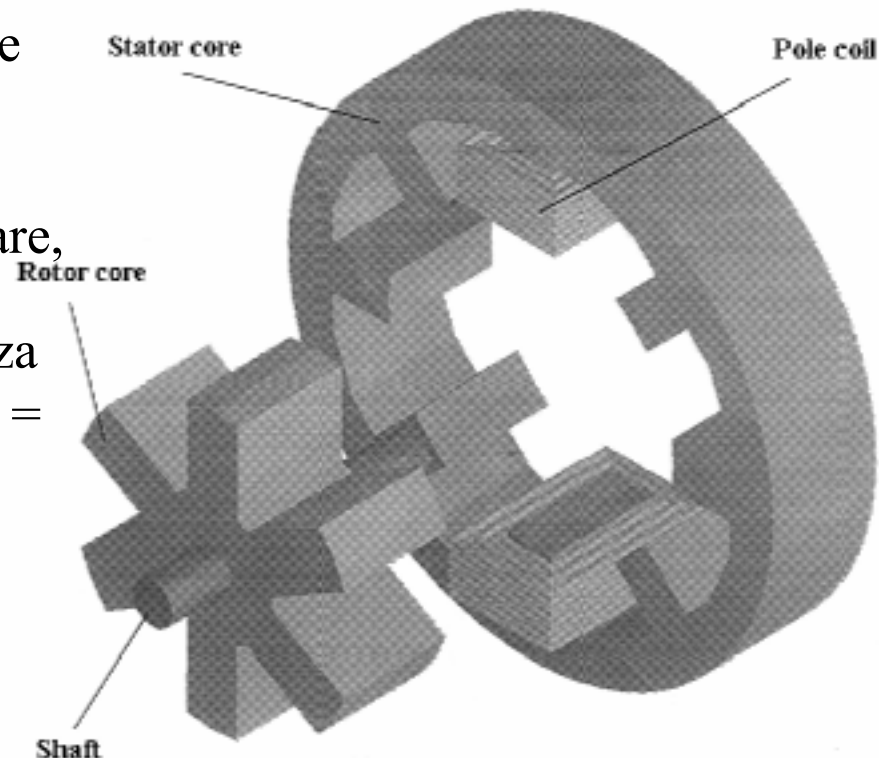
Diferența, la motoarele elementare, este 2.

Numărul de faze: se poate realiza

O fază pe 2 i sau 4 sau 6 poli; $m =$

- 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**

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

Pentru SRM se mai utilizează și alte denumiri, cum ar fi VRM = variable reluctance motor, mai ales în SUA, sau ECRM = electronically commutated reluctance motor, în Anglia, denumire propusă de T.J.E. Miller. Această ultimă denumire este mult mai aproape de principiul de funcționare al motorului, dar numele de SRM a devenit uzual

Aplicație :

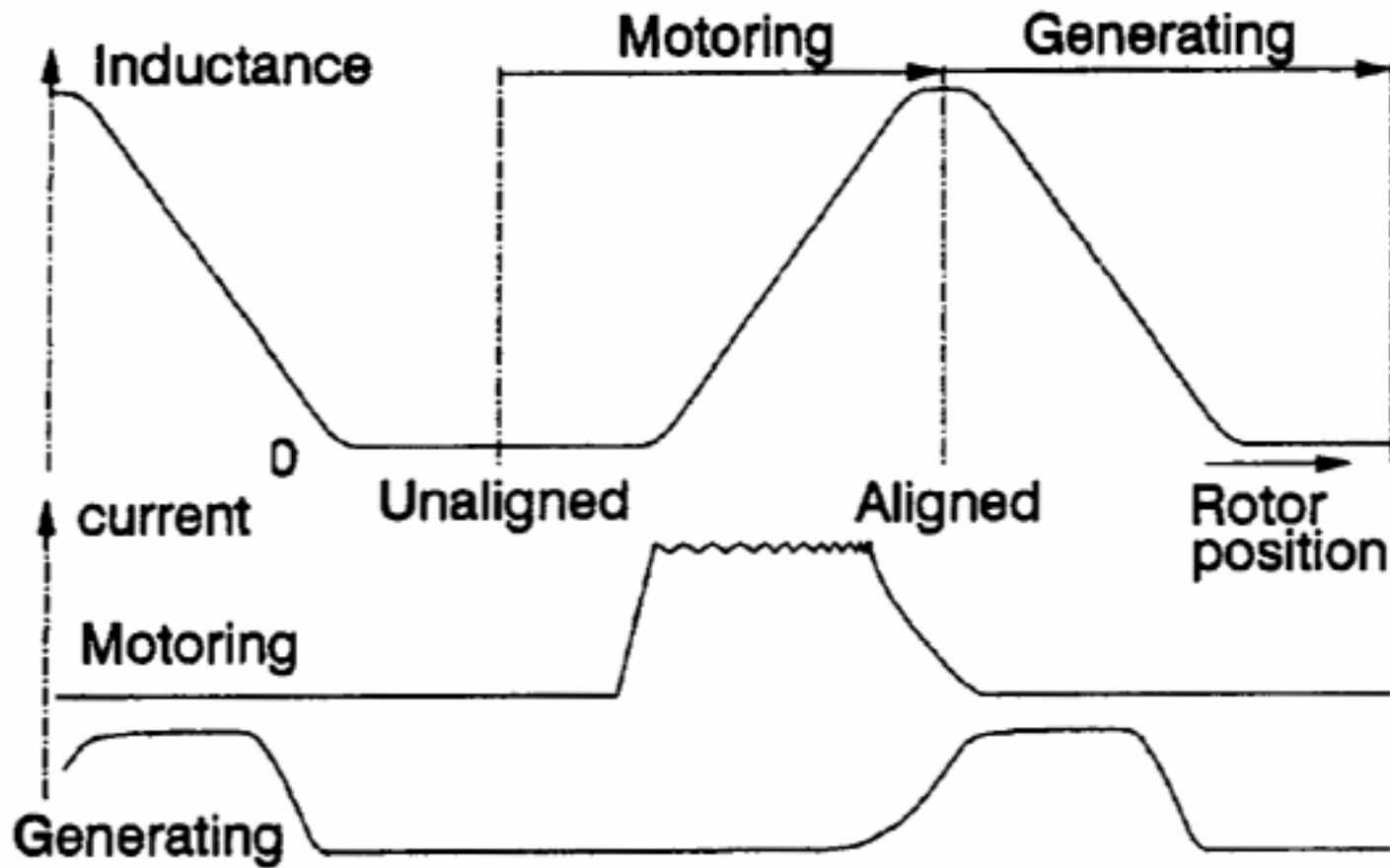
- mașina de spălat automata Neptune produsă de compania Maytag , motorul și partea de alimentare și comandă produse de compania Emerson.
-

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.
-

Variația inductanței și alimentarea SRM



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 și de variația reluctanței întrefierului cu poziția rotorului.

Cum SRM nu funcționează decât alimentat printr-un convertor electronic specific și controlat funcție de poziția rotorului este necesară cuprinderea întregului sistem 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:

$$C_\lambda = \frac{\partial W'_\lambda}{\partial \theta} = \int_0^i \frac{\partial \psi_\lambda}{\partial \theta} \cdot di$$

Ecuția de echilibru a cuplurilor este cea uzuală:

$$C = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} + C_s$$

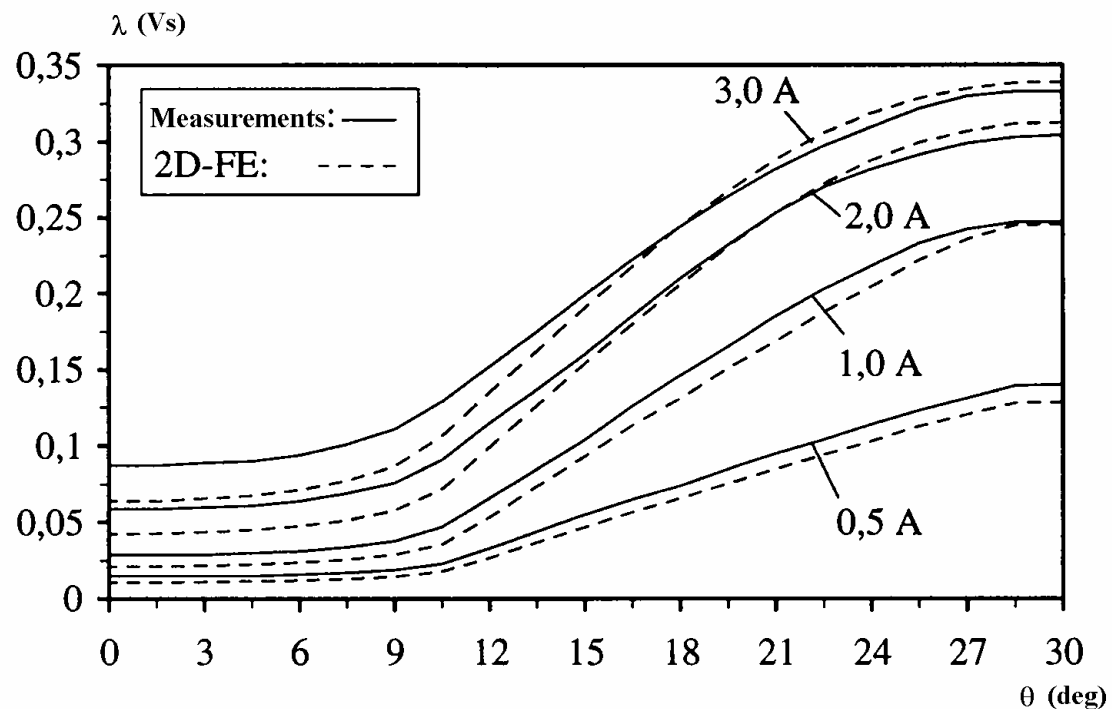
variația fluxului util în funcție de curent și de poziția rotorului,

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

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, dar se va opta pentru un model bazat pe considerarea unei 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,

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

Unde:

$$\beta = \frac{(1-f)^2}{2(1+f^2)} \quad f = u + \sqrt{1+u^2} \quad u = b_{Rs} / 2g \quad \gamma = \frac{4}{\pi} \left(u \cdot \operatorname{tg}^{-1} u - \ln \sqrt{1+u^2} \right)$$

Modelul matematic al SRM

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

$$C = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} = k_T \cdot i \cdot \sin \theta$$

cu constanta de cuplu, dependentă de curent :

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

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

Modelul matematic al SRM

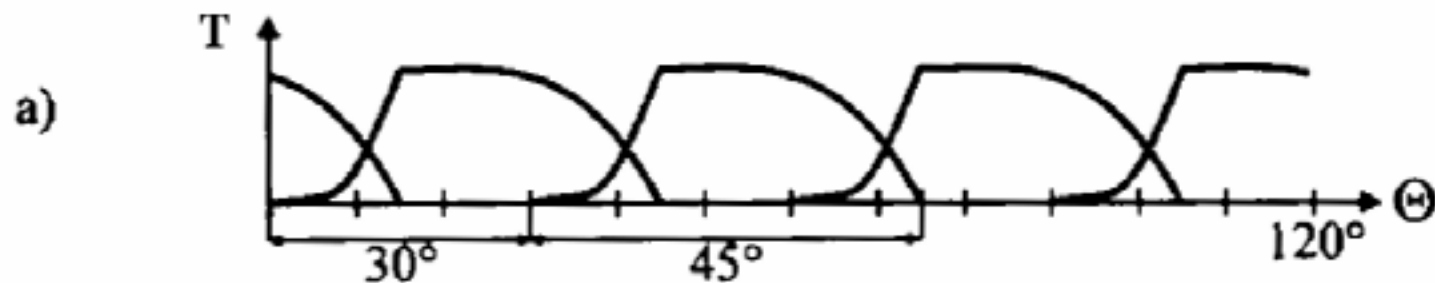
model în SIMULINK

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

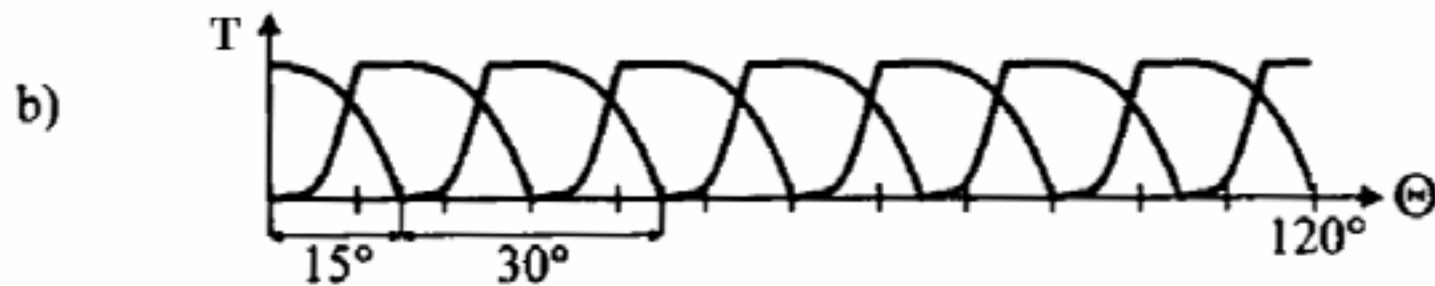
$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (K_T \cdot i \cdot \sin \theta - T_l)$$

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

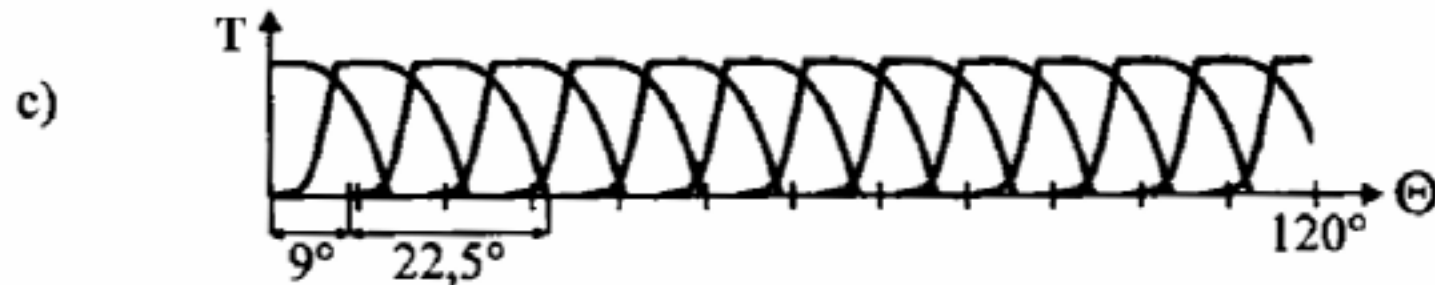
Variația cuplului funcție de poziția rotorului,



Trei faze



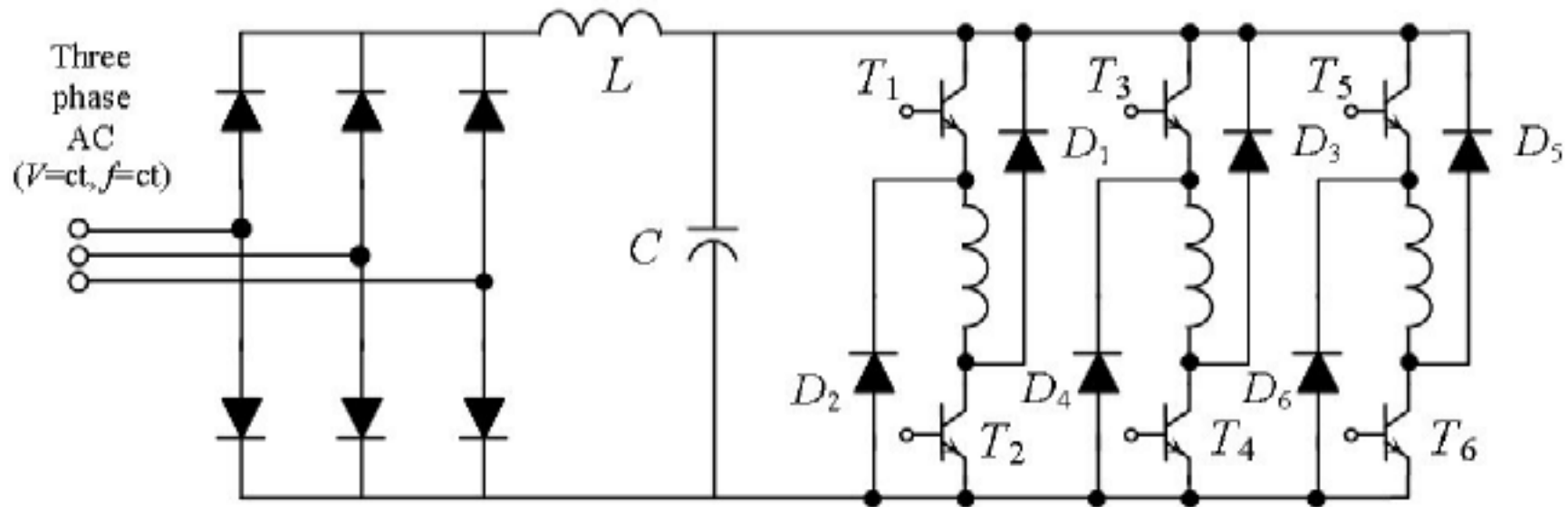
Patru faze



Cinci faze

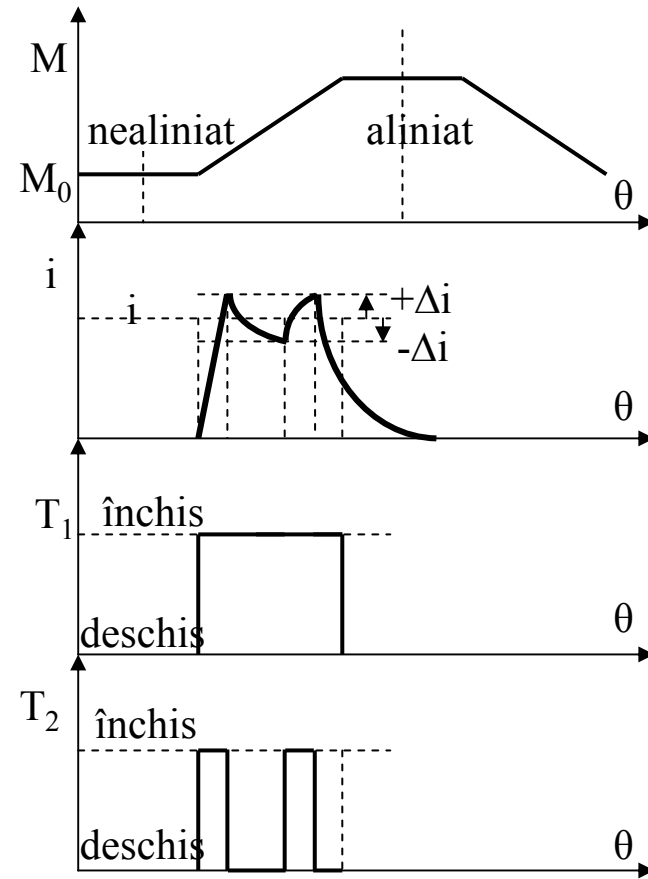
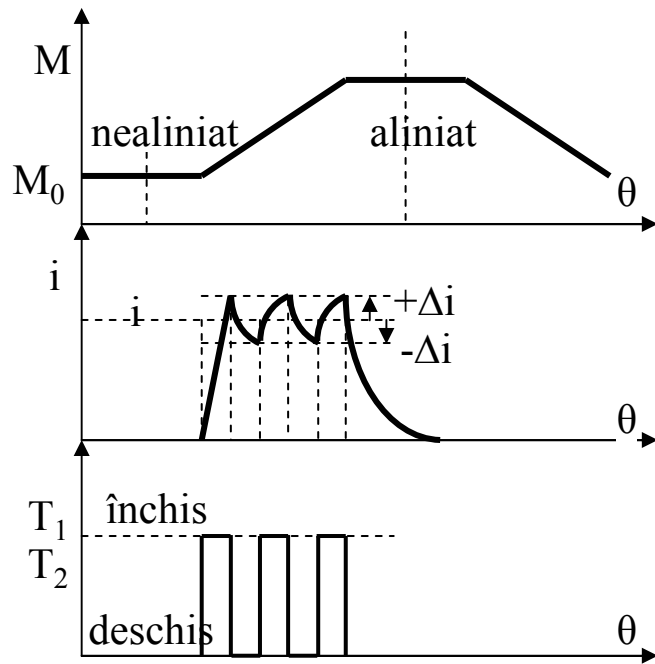
Alimentarea SRM

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 .



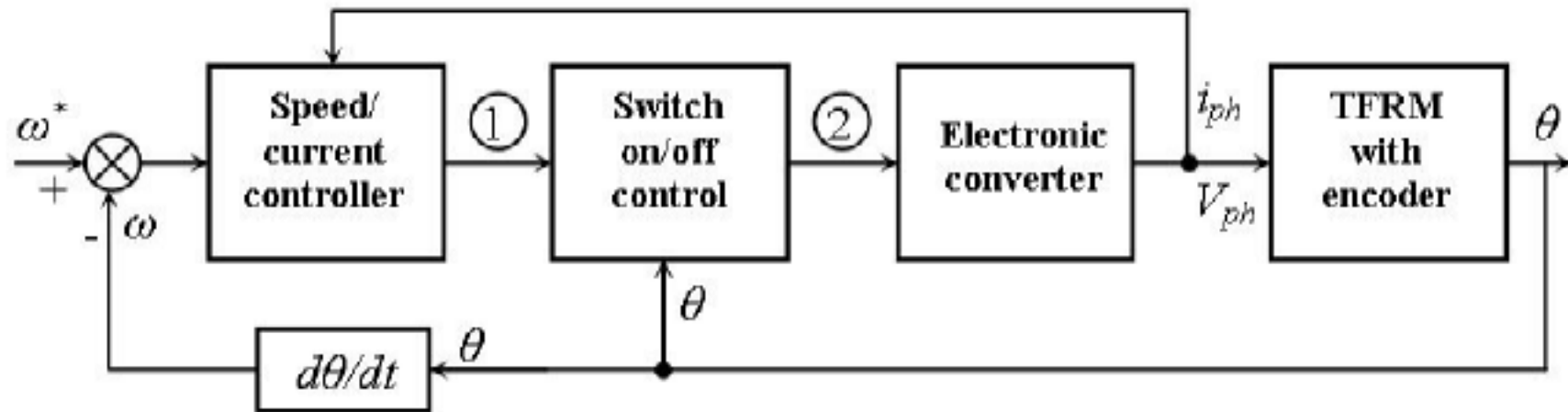
Cu o astfel de punte asimetrică sunt posibile două strategii de alimentare a fazei atunci când controlul curentului se face prin modularea în durată a pulsurilor(mod PWM). În primul caz tranzistoarele T1 și T2 conduc sau nu simultan. În cel de-al doilea caz tranzistorul T1 conduce ciclul întreg de conducție a fazei, iar controlul curentului din fază în mod PWM este realizat cu tranzistorul T2 care este comutat.

Strategii de alimentare a fazei



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, și controlul cu un singur puls, când nu se controlează curentul de fază, tranzistoarele conducând tot timpul perioadei care corespunde alimentării unei faze.

Bibliografie

- **Jufer M, Crivii M, and Viorel I.A,** "On the switched reluctance motor air-gap permeance calculation" *Proc. of the first International Symposium Electromotion*, Cluj, Romania 1995, pp 141-146
 - **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
 - **Magureanu R, and Vasile N,** " *Servomotoare fara perii tip sincron* ", Ed. Tehnica Bucuresti, seria Masini aparate electrice, 1990.
 - **Miller, T.J.E.:** „*Switched reluctance motors and their control*”. Clarendon Press, Oxford 1993.
 - **Biro K.A.,Viorel I.A.,Syabo L.,Henneberger G.** " Maşini electrice speciale ", *Editura MEDIAMIRA*, Cluj-Napoca, 2005.
 - **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
-