

Curs 6

**Sisteme de propulsie cu motoare cu reluctanță
comutată în VE și VEH**

Mașina cu reluctanță comutată (SRM, din englezescul "switched reluctance machine") este considerată ca fiind un candidat serios pentru domeniul de tracțiune electrică având în vedere calitățile mașinii în ceea ce privește prețul redus, structura robustă, convertoare electronice atașate fiabile, eficiență mare și plajă de viteză mare, precum și control relativ simplu al convertorului. Un asemenea sistem, care este capabil să îmbine toate calitățile mai sus menționate, devine potent candidat pentru VE și VEH ca motor de tracțiune, ca și starter/alternator, și se extinde până în domeniul mineritului, al mașinilor de spălat casnice, actuatori etc.

SRM-ul are rotorul simplu. Ca atare nu conține nici MP dar nici înfășurări de excitație. Acest fapt face ca mașina nu doar să fie mai ieftină, dar permite și operarea ei la viteze foarte mari. Spre deosebire de mașinile de inducție și de cele cu MP, SRM poate fi operată la viteze mari fără a se ridica problema rezistenței mecanice a ei, regula fiind aplicabilă cu amendamentul alegerii corecte a lagărelor de rulare.

Înfășurările statorice sunt de tip concentrat fiind conectate în serie fiecare două bobine aflate pe poli plasați diametral opuși, iar la nivelul inverterului electronic, capetele fiecărei faze sunt conectate în serie cu tranzistoarele de putere. Acest lucru conferă siguranța că învertorul niciodată nu va avea conducție în scurt circuit.

Un sistem clasic cu SRM este compus din mașina cu reluctanță comutată, convertorul electronic, unitatea de control, senzorii de curent, tensiune și poziție și circuite auxiliare (vezi fig. 6.1).

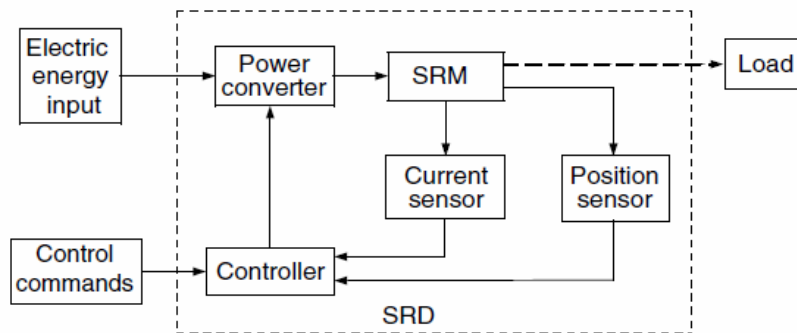


Fig. 6.1 Sistemul complet realizat în jurul unui SRM

Convertorul electronic este conectat la o sursă de alimentare în curent continuu, care poate să fie rețeaua publică redresată, sau poate să fie acumulatorul unui vehicul. Fazele mașinii sunt conectate la acest convertor precum este ilustrat în fig. 6.2.

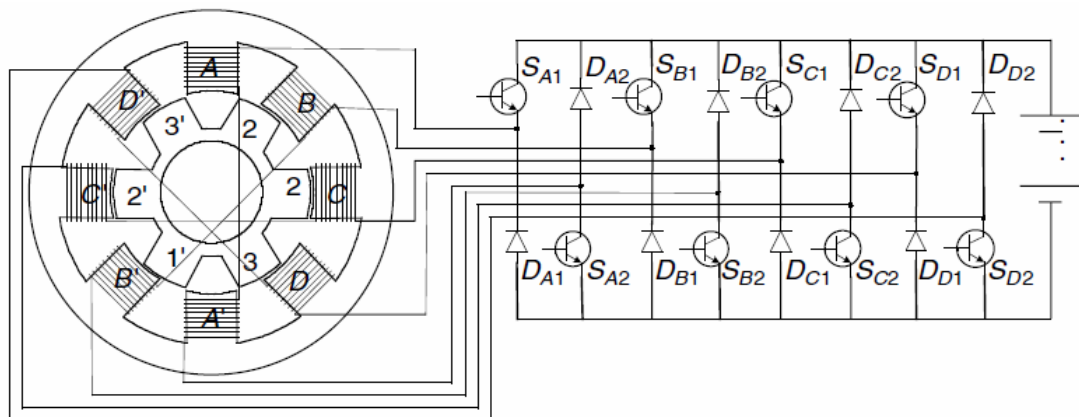


Fig. 6.2 SRM-ul împreună cu convertorul electronic aferent

Unitatea de control realizează calcule și distribuie pulsuri de comandă pentru tranzistoare și citește răspunsuri de la senzorii din sistem.

6.1. Construcția și principiul de operare al SRM

Din punct de vedere constructiv, SRM are poli aparenti atât pe stator cât și pe rotor. Rotorul este pasiv, deci nu conține nicio sursă de excitație. Există multe configurații de SRM depinzând de raportul numărului de perechi de poli. Configurațiile cele mai uzuale în care se regăsesc SRM-urile sunt 8/6 și 6/4, ilustrate în fig. 6.3.

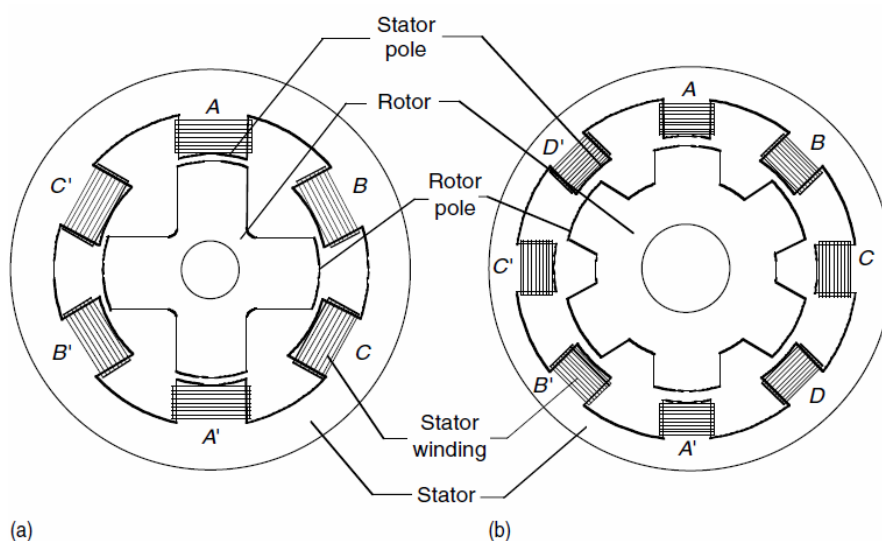


Fig. 6.3 Structurile uzuale de SRM (a) 6/4 și (b) 8/6

Datorită variației reluctanței la nivelul întrefierului, fluxul de fază depinde stâns de poziția rotorului față de polii fazei excitate. Totodată, dat fiind faptul că SRM-urile se proiectează pentru cote ridicate de saturație ale circuitului magnetic la curenți de fază mari, fluxul la nivelul întrefierului depinde și de reluctanță dar și de curentul de excitație al fazei respective. Ca atare, fluxul statoric și inductanța fazei depind deci de variația poziției polilor rotorici, de la poziția aliniat (când polii rotorici se suprapun cu cei statorici) până în nealiniat (când polii rotorici ajung între doi poli statorici succesivi).

Ecuția care definește tensiunea unei faze a SRM este:

$V_j = R I_j + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}$	(6.1)
--	-------

În ec. (6.1) m este numărul de faze al mașinii, V_j este tensiunea aplicată fazei j , i_j este curentul care ia naștere în faza j , R este rezistența fazei, λ_{jk} este fluxul de înlănțuire al fazei j datorită curentului k la timpul t . Ca atare, fluxul de înlănțuire se poate exprima:

$\lambda_{jk} = L_{jk}(i_{k,\theta})i_k$	(6.2)
--	-------

În ec. (6.2) L_{jk} este inductivitatea mutuală a fazelor j și k . Inductivitatea mutuală a fazelor este în general mică comparativ cu cea proprie a fiecărei faze, ca atare este adesea neglijată în modelul analitic al mașinii.

La un curent constant aplicat fazei mașinii, o dată cu mișcarea rotorului din poziție nealiniată până în poziție aliniată, reluctanța scade datorită reducerii zonei de întrefier, ca atare, inductivitatea proprie și fluxul de înlănțuire cresc, circuitul magnetic devenind tot mai saturat. Așadar, calea de flux este tot mai scrută cu deplasarea rotorului, deci fluxul de scăpări scade, acesta fiind tot mai concentrat direct prin polii mașinii. Dacă curentul mașinii este crescut, implicit fluxul va crește proporțional cu curentul. Variația fluxurilor propriu și de scăpări la creșterea curentului și modificarea poziției rotorice pentru o structură de 8/6 este ilustrată în fig. 6.4.

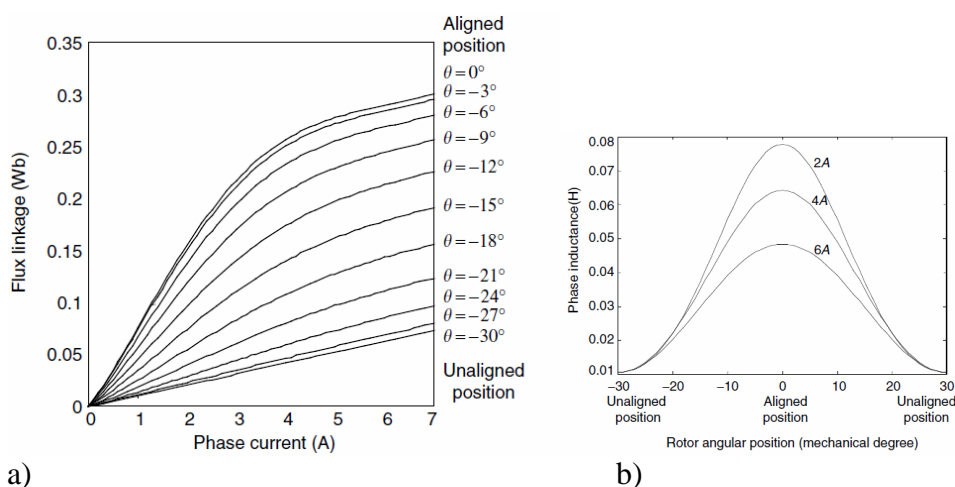


Fig. 6.4 Variația fluxului (a) și al inductivității proprii (b) cu modificarea curentului și al poziției rotorice

În aceste figuri unghiul rotoric -30° și 0 reprezintă punctele de nealiniat respectiv de aliniat ale mașinii. Dacă realizăm substituția ec. (6.2) în ec. (6.1) rezultă:

$$\begin{aligned}
 V_j &= R I_j + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^m \lambda_{jk} = R I_j + \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial \lambda_{jk}}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \lambda_{jk}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \right\} \\
 &= R I_j + \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial (L_{jk} i_k)}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial (L_{jk} i_k)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \right\} \\
 &= R I_j + \sum_{k=1}^m \left\{ \left(L_{jk} + i_k \frac{\partial L_{jk}}{\partial i_k} \right) \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial L_{jk}}{\partial \theta} \omega \right\}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Atunci când doar o singură fază a mașinii este excitată, ec. (6.3) se poate rescrie:

$$V_j = R I_j + \left(L_{jj} + i_j \frac{\partial L_{jj}}{\partial i_j} \right) \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial L_{jj}}{\partial \theta} \omega \tag{6.4}$$

Cel de al treilea termen din ec. (6.4) corespunde tensiunii electromotoare.

Când circuitul magnetic nu este saturat, fluxul variază liniar cu creșterea curentului. O dată cu saturația circuitului magnetic la un anumit curent și la o anumită

poziție rotorică, variația fluxului nu mai este liniară, precum nici variația inductivității nu mai este liniară. Caracteristica de creștere a inductivității poate fi derivată din variația fluxului cu creșterea curentului și modificarea poziției rotorice, bazate pe ecuațiile mai sus descrise.

6.1.1 Dezvoltarea cuplului la SRM

Cuplul la un SRM vine din tendința rotorului de a se alinia pe calea de reluctanță minimă, adică de a se alinia cu polii statorici care au bobinele excitate cu curent electric. Expresia analitică a cuplului poate fi determinată din derivarea coenergiei funcție de poziția rotorică și de curentul prin fază.

Pentru o fază a mașinii excitată la un curent i și având un flux λ , energia stocată W_f' a ei este indicată în fig. 6.5, ca zonă hașurată, iar relația de calcul este:

$W_f' = \int_0^i \lambda di$	(6.5)
------------------------------	-------

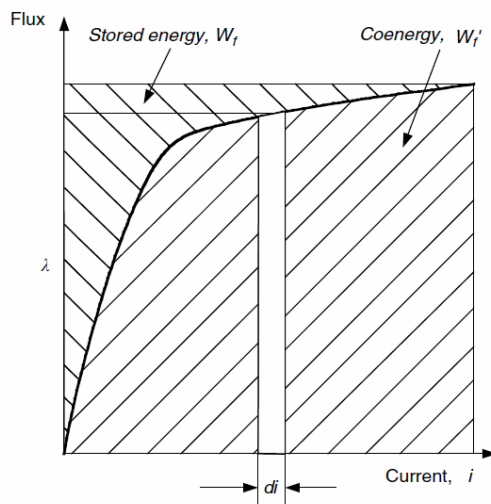


Fig. 6.5 Variația fluxului (a) și al inductivității proprii (b) cu modificarea curentului și al poziției rotorice

Ca atare, cuplul produs de o fază a mașinii la orice poziție rotorică poate fi calculat astfel:

$T = \left[\frac{\partial W_f'}{\partial \theta} \right]_{i=cst}$	(6.6)
--	-------

Mergând mai departe, cuplul instantaneu pentru un SRM se poate calcula cu relația:

$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta}$	(6.7)
--	-------

În ec. (6.7) L este inductivitatea nesaturată a mașinii. În cazul în care curentul crește și se atinge valoarea de saturare a circuitului magnetic, calculul de cuplu nu se mai poate face printr-o simplă manipulare algebrică ci printr-o integrare:

$T = \int_0^i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} i di$	(6.8)
---	-------

Din ec. (6.6) și (6.7) se poate observa faptul că pentru a produce cuplu pozitiv (sau cuplu motor) este necesar ca faza mașinii să fie excitată atunci când inductivitatea fazei abia începe să crească cu mișcarea rotorului. Totodată se poate observa din ec. (6.7) și (6.8) că curentul de fază este unidirecțional pentru regimul de motor. De aici reiese faptul că pentru această mașină, se poate realiza un convertor electronic relativ simplu și la costuri reduse. Fig. 6.6 prezintă variația ideală a inductivității fazei unui SRM, a curentului și a cuplului produs.

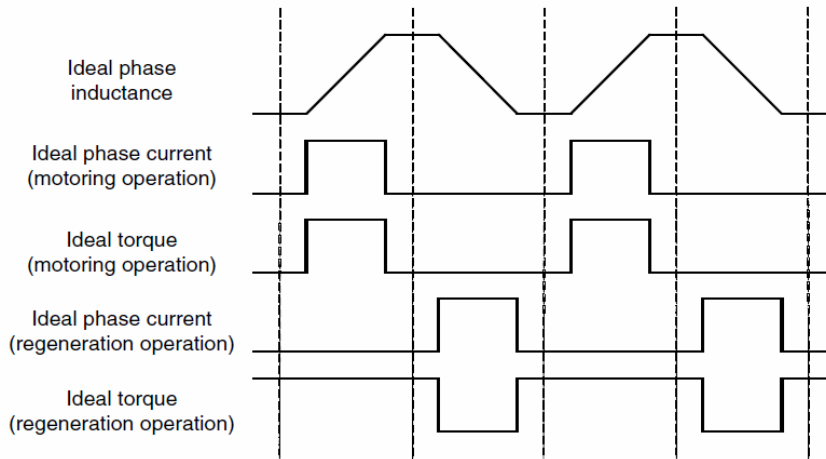


Fig. 6.6 Curbele idealizate ale inductivității, curentului și cuplului pentru un SRM

Cuplu negativ poate să fie obținut atunci când faza este excitată la căderea inductivității cu mișcarea rotorului. Ca atare, este foarte important să se cunoască foarte precis poziția rotorului.

Cuplul mediu produs de un SRM poate fi calculat prin însumarea cuplurilor fiecărei faze:

$T_m = \sum_{i=1}^N T(i, \theta)$	(6.9)
-----------------------------------	-------

unde N reprezintă numărul de faze al mașinii. Relația dintre cuplul motor și sarcina mecanică a mașinii este dat de:

$T_m - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega$	(6.10)
--	--------

unde J , B și T_l sunt momentul de inerție, coeficientul de frecări vâscoase și cuplul de sarcină. Relația dintre poziția rotorului și viteza lui este guvernată de:

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$	(6.11)
-------------------------------	--------

6.1.2 Convertorul electronic pentru SRM

Din fig. 6.6 se poate observa faptul că cuplul dezvoltat de motor poate fi controlat prin modificarea amplitudinii curentului și a momentului de alimentare al fazelor mașinii sincronizate cu poziția rotorului. Pentru a controla amplitudinea și lățimea pulsului de curent este nevoie de o anumită structură de convertor electronic.

Intrarea convertorului pentru SRM este reprezentată de o tensiune continuă care pentru VE și VEH este materializat prin baterii sau ultracondensatori. Spre

deosebire de mașinile de curent alternativ, unde pulsurile de curent sunt bipolare, la SRM pulsul de curent este unipolar. Ca atare, structura convertorului diferă de cea clasică trifazată a mașinilor de curent alternativ. Există multe variante constructive pentru asemenea circuite prezentate în detaliu în literatura de specialitate, dar cele mai comune sunt cele prezentate în fig. 6.7.

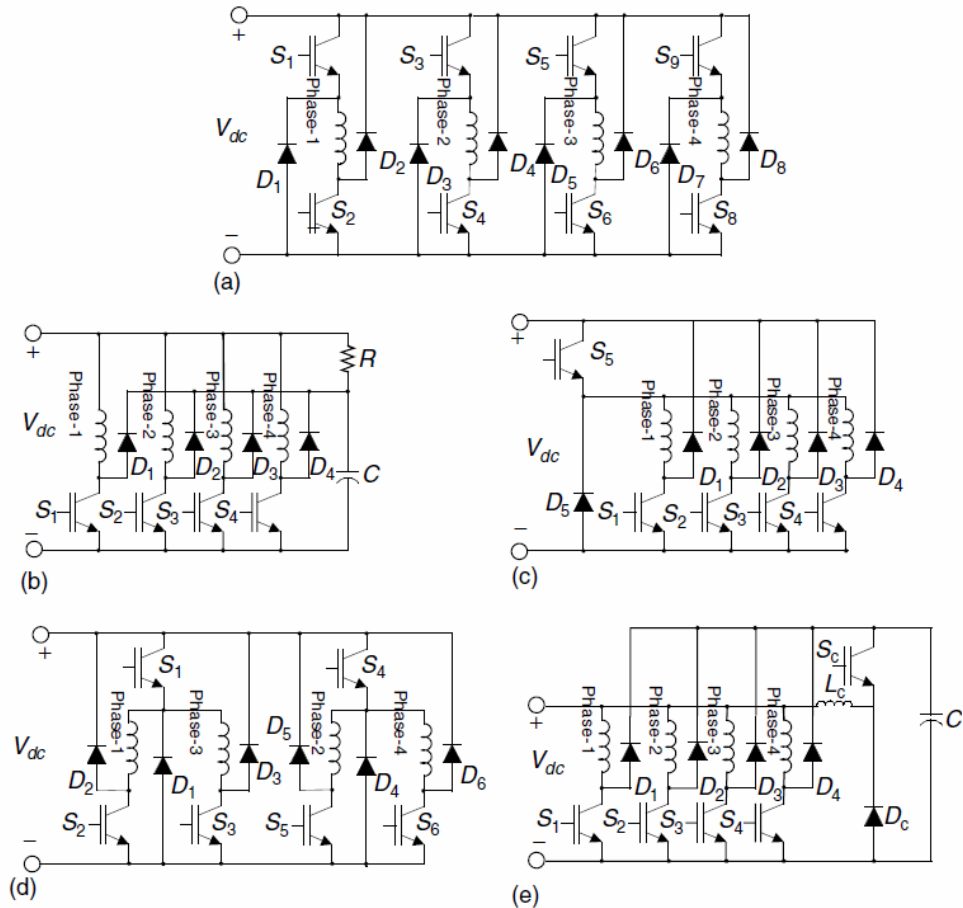


Fig. 6.7 Converteoare pentru SRM: (a) varianta în semi-punte H, (b) varianta cu rezistență de descărcare, (c) varianta cu $n+1$ tranzistoare (convertor Miller), (d) varianta cu $1,5n$ tranzistoare și (e) varianta cu condensator de descărcare.

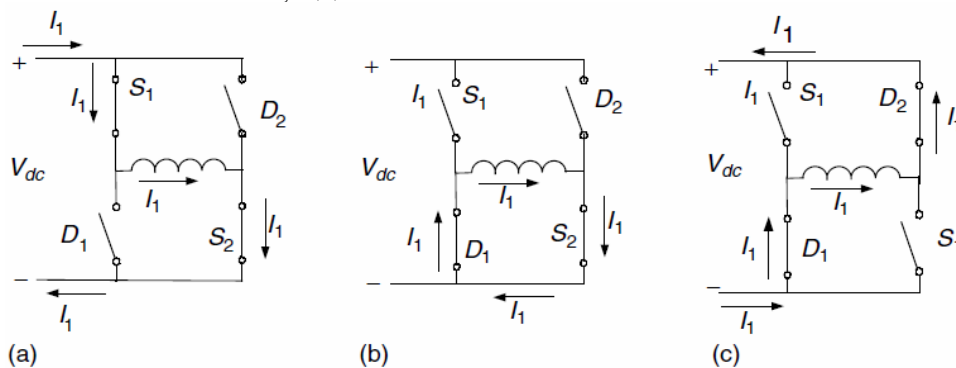


Fig. 6.8 Modelul funcțional al convertorului clasic de SRM: (a) amorsarea unei faze, (b) menținerea la tensiune zero, (c) stingerea unei faze

În fig. 6.8a tensiunea continuă este aplicată fazei mașinii. Ca atare, curentul va începe să crească, trecând prin tranzistorul S_1 , faza mașinii și prin tranzistorul S_2 , ajungând la potențialul negativ al sursei de alimentare. Prin blocarea tranzistorului S_1 , și prin menținerea în conducție a tranzistorului S_2 , se stabilește același potențial la

ambele capete ale fazei mașinii, adică tensiunea prin ea va fi zero (vezi fig. 6.8b). În acest caz, circuitul se va închide prin dioda de fugă D_1 , prin faza mașinii și prin tranzistorul S_2 . Atunci când se blochează atât S_1 , cât și S_2 , (vezi fig. 6.8c) curentul prin faza mașinii se va închide prin D_2 și D_1 . Acest lucru este datorat tensiunii de autoinducție care apare în faza mașinii care face ca diodele să fie polarizate direct și ele să intre automat în conducție. În acest interval, fazei se aplică o tensiune inversă care face ca curentul prin mașină să cada brusc la zero. Cu alte cuvinte, faza mașinii este descărcată de energie. În momentul în care, curentul cade la zero, tensiunea de autoinducție devine zero, ceea ce face ca diodele să se blocheze și să nu mai conducă. Diodele fiind blocate și tranzistoarele prin comandă fiind blocate, faza mașinii nu mai primește niciun fel de alimentare, ca atare curentul și tensiunea în ea se vor păstra la zero. Ciclul se repetă la fiecare moment de control al fazei mașinii.

Aceste structuri de convertoare utilizează $2n$ tranzistoare și $2n$ diode, unde n este numărul de faze al mașinii. Există variante constructive de convertoare care aplică pentru utilizarea unui număr mai mic de componente semiconductoare, de exemplu convertorul cu rezistență de descărcare (fig. 6.7b). Acesta utilizează un tranzistor și o diodă pentru fiecare fază. Structura aceasta nu este deloc eficientă pentru că, atunci când tranzistorul este blocat, energia stocată în faza mașinii este livrată prin intermediul diodei spre condensatorul C. Asta ar face ca tensiunea pe C să crească, însă fiind înseriat cu rezistența R, acest surplus de energie este disipat pe această rezistență. Totodată, la această structură nu se poate obține comandă în tensiune zero a fazei.

O soluție alternativă este convertorul cu $(n+1)$ tranzistoare. În această variantă, toate fazele mașinii folosesc în comun un tranzistor și o diodă. Din acest motiv, pentru această structură, suprapunerea curenților fazelor mașinii nu este posibilă, aceasta fiind adesea o strategie folosită la controlul SRM. Această problemă a fost rezolvată prin intermediul adăugării unui tranzistor și a unei diode, în așa fel încât fazele ne-adiacente ale mașinii să utilizeze în comun câte un tranzistor și câte o diodă (vezi fig. 6.7d). Această structură este limitată din punct de vedere al numărului fazelor mașinii.

O structură populară de convertor pentru SRM este cel cu condensator de descărcare, ilustrat în fig. 6.7e, care are avantajul unui număr redus de tranzistoare și permite controlul independent al fiecărei faze. Pentru această variantă, atunci când tranzistoarele sunt blocate, energia acumulată în faza mașinii, este descărcată pe condensatorul C. Asta face ca tensiunea pe condensator să crească. Dacă însă această tensiune crește prea mult, peste o valoare limită maximă, din comandă, tranzistorul S_c este amorsat pentru a livra surplusul de tensiune înapoi la sursa de alimentare, adică la bateria vehiculului. Principalul avantaj al acestei structuri este faptul că tensiunea negativă prin faza mașinii este limitată la diferența dintre tensiunea pe condensator și tensiunea sursei de alimentare.

6.1.2.1 Strategii de operare

La funcționarea SRM există o viteză la care tensiunea electromotoare este egală cu tensiunea de alimentare a convertorului electronic. Această viteză este definită ca viteza maximă. La viteze mai mici decât aceasta, tensiunea electromotoare este mai mică decât tensiunea de alimentare a convertorului. Curentul fiecărei faze este controlat prin aprinderea/stingerea tranzistoarelor, acesta urcând de la 0 la valoarea nominală prin acest procedeu. Cuplul maxim este obținut la excitarea fazei atunci când rotorul se găsește în poziție nealiniată. O dată cu alinierea, cuplul

instantaneu scade, și faza trebuie stinsă prin blocarea tranzistoarelor atunci când polii rotorici ajung în poziție aliniată cu cei statorici. Reglajul curentului se realizează în general prin metoda cu histereză sau prin metoda PWM. Undele de curent, tensiune și flux ale unui SRM uzual sunt prezentate în fig. 6.9, ele fiind considerate la viteza sub cea nominală.

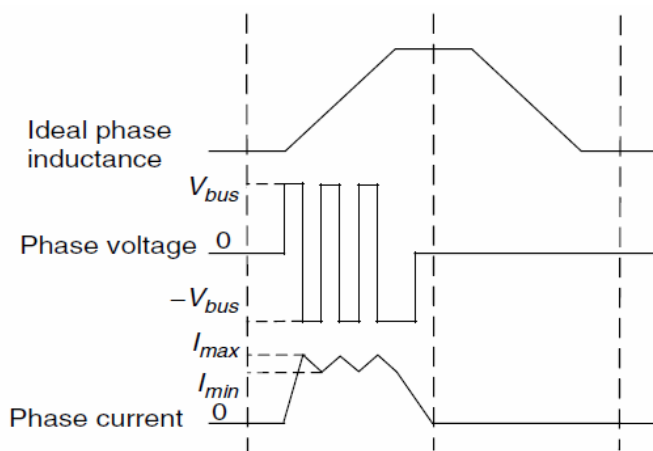


Fig. 6.9 Undele caracteristice unui SRM la viteză sub-nominală

Peste viteza nominală, tensiunea electromotoare va fi mai mare decât cea de alimentare a mașinii. La o poziție rotorică la care inductivitate fazei este pozitivă, în creștere, curentul prin faza mașinii poate să decadă chiar dacă tranzistoarele sunt în conducție. Curentul de fază este limitat de tensiunea electromotoare. Pentru a construi un SRM de curent mare deci implicit de cuplu mare, de obicei faza mașinii se excită înainte de a ajunge în poziția de nealiniat, iar unghiul de aprindere este avansat încet pe măsură ce viteza mașinii crește. Tensiunea electromotoare crește și ea natural cu viteza. Asta duce la o scădere implicită a curentului, ca atare cuplul mașinii scade. Dacă unghiul de aprindere a fazei este avansat pentru a atinge curent cât mai mare, valoarea maximă de cuplu scade aproximativ liniar cu viteza rotorului. Puterea maximă a sistemului ce conține SRM-ul este aproximativ constantă. Undele de tensiune și curent clasice pentru un SRM de mare viteză sunt prezentate în fig. 6.10.

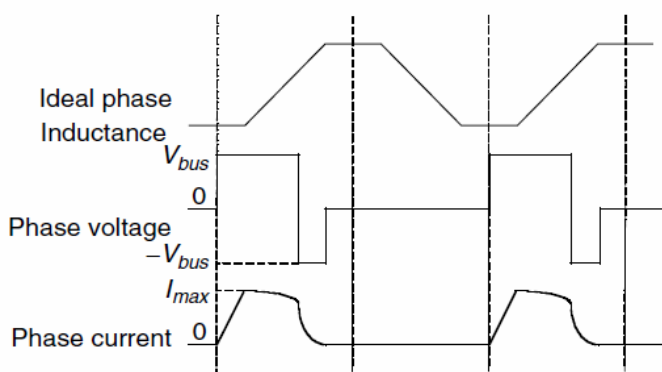


Fig. 6.10 Undele caracteristice unui SRM la viteză mare

Avansul momentului de aprindere a fazei este limitat de poziția în care inductivitatea are pantă negativă de variație cu mișcarea rotorului. Dacă viteza rotorului crește și mai mult, nu se mai poate realiza avans al unghiului pentru a crește și mai mult curentul, ca atare cuplul motor va cădea foarte mult. Acest mod e modul

natural de comportament al SRM iar variația cuplului cu viteza este ilustrată în fig. 6.11.

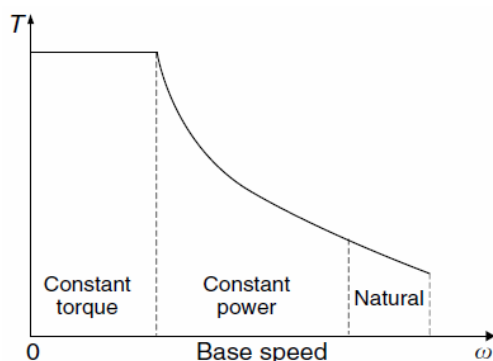


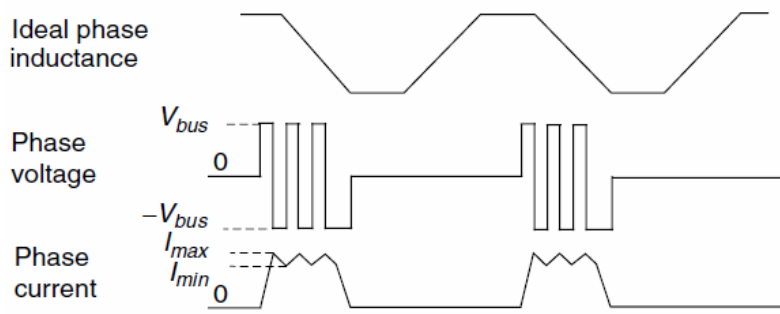
Fig. 6.11 Variația cuplului cu viteza la un SRM

6.1.2.2 Regimul de generator al SRM

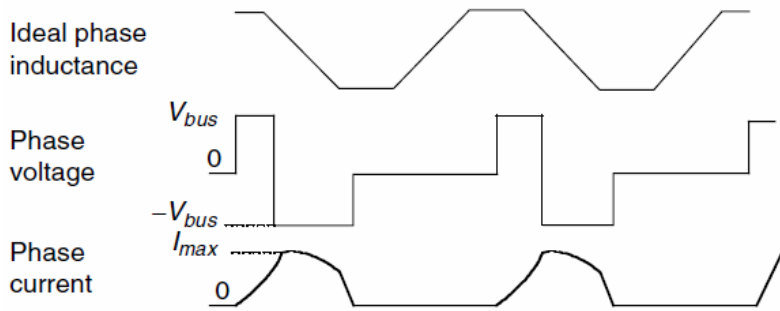
Pentru un SRM, cum s-a văzut până acum, producerea de cuplu are ca principiu atingerea punctului de reluctanță minimă la o fază excitată. Așadar, dacă polul rotoric se apropie de o fază alimentată, inductivitatea crește, cuplul este pozitiv, ceea ce rezultă ca mașina este în regim de motor. Dar, în cazul în care polul rotoric părăsește polul statoric (care este în continuare alimentat), ceea ce înseamnă o descreștere a inductivității fazei, statorul tinde să mențină rotorul în poziție aliniată. Rotorul fiind acum deplasat din exterior, își continuă mișcarea și se produce un cuplu negativ. Asta înseamnă că mașina este acum în regim de generator.

Frânarea regenerativă este un aspect foarte important al VE și VEH. Există o dualitate concretă între regimul de motor și cel de generator al mașinii. Defapt, comparând undele pentru cele două regimuri funcționale, ele se prezintă în oglindă față de punctul de aliniat al polului rotoric cu cel statoric. În regim de generator, vom nota mașina cu SRG. Ca atare, în regim de generator, faza mașinii se excită înainte de alinare și se menține excitată până aproape de nealiniat.

Exact ca în regim de motor, curentul poate să fie controlat și în regim de generator implicând aceleași tehnici anterior amintite. Caracteristicile de curent, tensiune și inductivitate a SRG sunt ilustrate în fig. 6.12.



(a)



(b)

Fig. 6.12 Undele caracteristice unui SRG la viteză mică (a) și la viteză mare (b)

Circuitul de convertor pentru un SRG este identic cu cel al unui SRM. Varianta cea mai uzuală pentru o asemenea structură este prezentată în fig. 6.13.

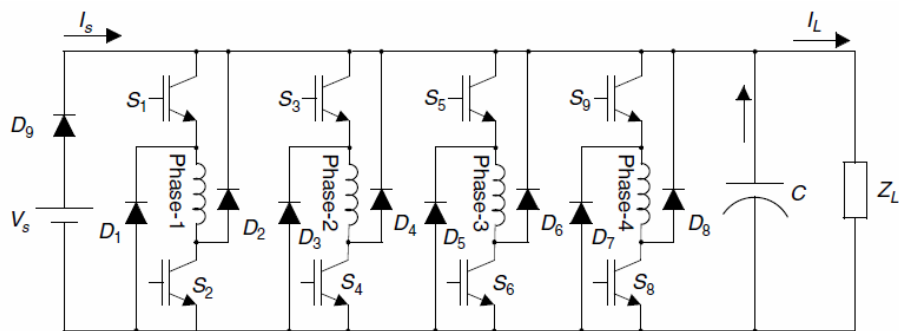


Fig. 6.13 Convertorul electronic pentru un SRG

Atunci când tranzistoarele aferente unei faze sunt puse în conducție, faza este alimentată de la sursa de alimentare. În timpul perioadei de blocare a tranzistoarelor, diodele de fugă asigură calea de curent în așa fel încât condensatorul de pe sursa de alimentare să se încarce. Având în vedere că rotorul mașinii este pasiv, pentru pornirea ei, este necesar ca în prima fază să se consume putere de la sursă, sau din condensator, urmând apoi să se treacă mașina în regim de generator și energia să fie livrată înapoi în condensator. Depinzând de tensiunea de ieșire în timpul conducției, atât condensatorul cât și sursa de alimentare, sau doar condensatorul asigură curentul pentru faza mașinii și pentru sarcină. Sursa externă de alimentare poate să fie dimensionată pentru a fi încărcată de la mașină în regim de generator, pentru a fi sistem recuperativ.

În regim de regenerare a energiei, tensiunea electromotoare este negativă deci ajută la încărcarea cu energie foarte rapid a fazei. Apoi, pe perioada de blocare a tranzistoarelor, tensiunea electromotoare, se opune tensiunii de alimentare și descrește încet.

$V_C - e = L \frac{di}{dt} + Ri, \quad e > 0$ $-V_C - e = L \frac{di}{dt} + Ri, \quad e > 0$	(6.12)
--	--------

În ec. (6.12) V_C este tensiunea de alimentare a convertorului, sau altfel zis tensiunea pe condensator, iar e este tensiunea electromotoare.

În anumite condiții cum ar fi viteze foarte mari și cupluri de sarcină mari, tensiunea electromotoare este mai mare decât tensiunea de alimentare, ca atare, curenții vor crește chiar după decuplarea fazei de la alimentare. Ca atare, este necesar ca convertorul electronic să fie supradimensionat, ca atare crescând valoarea construcției lui. Datorită variațiilor multe de viteză ale rotorului, dimensionarea convertorului electronic trebuie realizată pentru operarea în cel mai rău caz posibil. Totuși, selectarea corectă a unghiurilor de comandă poate asigura funcționarea grupului motor-converter într-o plajă acceptabilă. Fig. 6.14 ilustrează influența selecției unghiului de comandă asupra amplitudinii curenților mașinii.

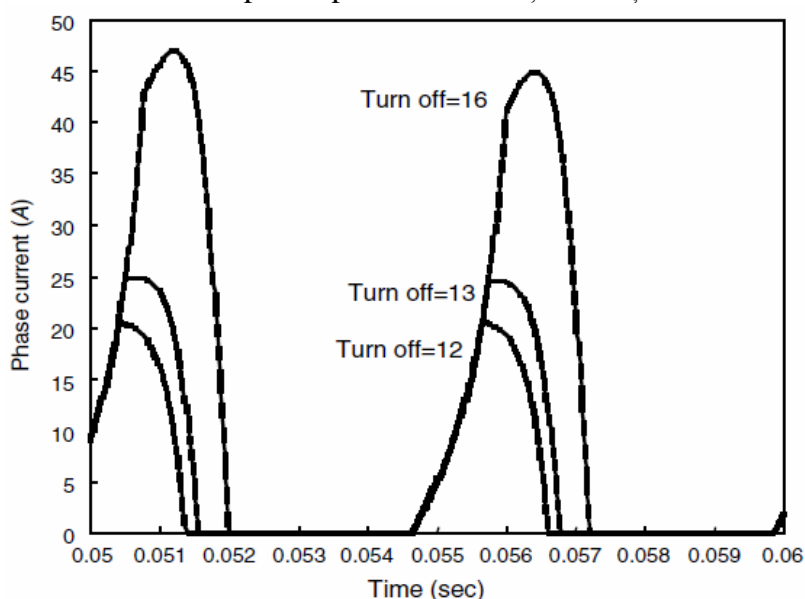


Fig. 6.14 Influența selecției unghiurilor de comandă

6.1.3 Vibrații și zgomote în SRM

Lăsând la o parte atributele excelente ale mașinii din punct energetic și financiar, sistemele de tracțiune cu SRM-uri depășesc cote înalte de riplu de cuplu și zgomot în spectrul auzului uman. Așadar, în aplicații domestice, cum ar fi sisteme electrocasnice, problema zgomotului și al vibrațiilor poate provoca probleme serioase, care ar plasa mașina în domeniul celor inutilizabile în astfel de aplicații. Zgomotul acustic în SRM vine de la variația forței magnetice radiale între polii statorici și rotorici, așa cum este ilustrat în fig. 6.15 și fig. 6.16. Această forță realizează deformarea statorului, deci implicit crearea de zgomote acustice și vibrații.

Rezultatul unei analize structurale asupra unui SRM arată că jugul mașinii este cel mai semnificativ parametru în ceea ce privește comportamentul dinamic la deformarea statorului. Creșterea grosimii jugului duce la deformări mai puțin pronunțate, care automat reduc șansele de deformare mecanică datorită rezonanțelor la viteze mari ale rotorului.

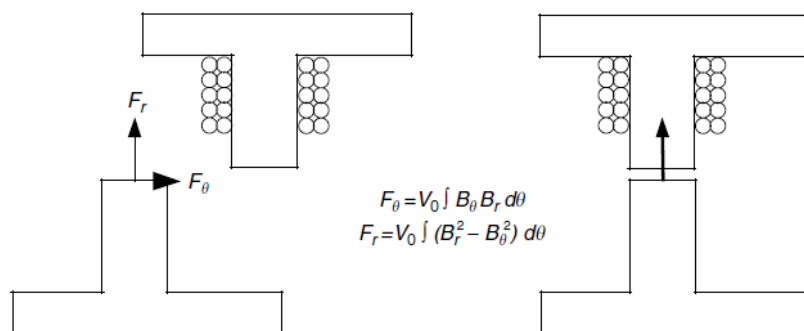


Fig. 6.15 Profil static al forței radiale la un SRM

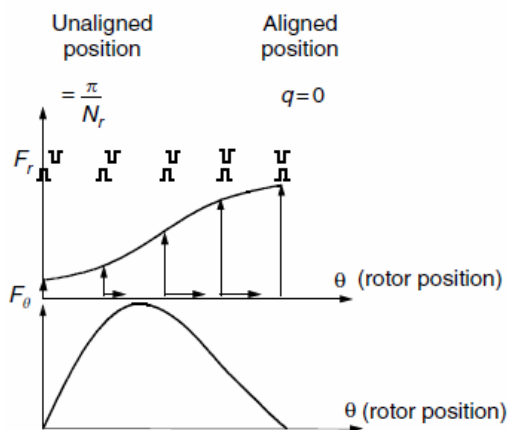


Fig. 6.16 Distribuția forței radiale și tangențiale la un SRM

Creșterea întrefierului mașinii duce la reducerea forțelor radiale. Însă, această modificare diminuează foarte mult performanțele mașinii.

Vibrațiile radiale ale statorului ajută foarte mult la stingerea fazelor mașinii. Acest lucru se datorează amplitudinii mari a forțelor de atracție și la rata rapidă de schimbare a acestora. Pentru a înțelege mai simplu fenomenul, putem presupune că comportamentul statorului este asemănător unei loviri bruște cu un ciocan, la fiecare schimbare a fazei. Minimizarea forței radiale la stingerea fazei este considerat ca fiind cea mai bună metodă de reducere a vibrațiilor mașinii.

Strategia de control bazată pe profilare de curent a mașinii asigură că niciodată nu se produce cuplu negativ. Cu alte cuvinte, metoda asigra că la comutația de la o fază la alta să nu mai existe absolut deloc curent în faza mașinii. Totuși, trebuie menționat faptul că un control complex realizat și asupra curentului de fugă va duce la creșterea directă a pierderilor în comutație. Ca atare, global, această metodă reduce performanțele sistemului. Ca atare, alte strategii de control trebuie abordate, care asigură și un control riguros al mașinii dar și vibrații reduse. Toate strategiile de astfel de control se bazează pe liniarizarea caracteristicii de cuplu a mașinii.

6.2 Elemente de proiectare ale SRM

După cum a mai fost menționat, SRM are o construcție simplă, dar cu toate acestea, proiectarea mașinii nu este ceva la fel de simplu. Acest lucru se datorește faptului că mașina are atât pe stator cât și pe rotor poli aparenti, ca atare apare efectul de dispersie a fluxului magnetic la mișcarea rotorului. Ca atare, proiectarea mașinii este îngreunată de faptul că circuitul magnetic al ei diferă la fiecare mișcare a rotorului. În cele mai multe cazuri de proiectare a mașinii, se realizează un calcul analitic preliminar iar apoi se procedează la validarea mașinii prin intermediul unui program de simulare bazat pe metoda elementelor finite. Din acest program se pot determina cu precizie destul de bună performanțele mașinii viitoare respectiv distribuția câmpului electromagnetic la nivelul circuitului mașinii. În fig. 6.17 este prezentată distribuția câmpului magnetic al unei structuri de 8/6 de SRM, extrasă din programul de simulare.

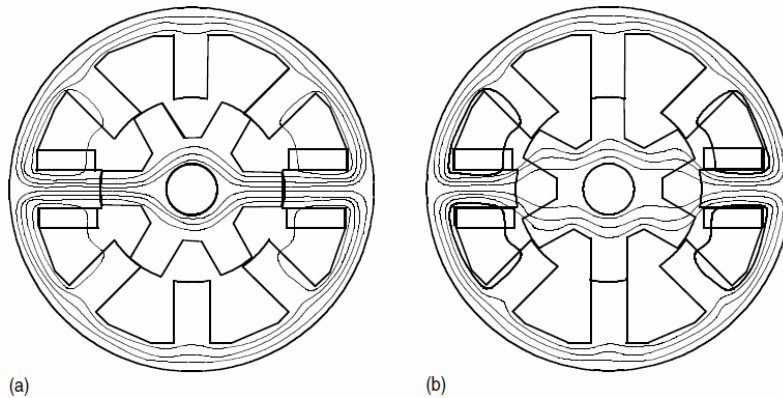


Fig. 6.17 Distribuția de câmp într-un SRM în poziție aliniată (a) și nealiniată (b)

Oricum, în orice proiectare de SRM există o serie de criterii de bază care inițializează proiectarea și implicit performanțele mașinii.

6.2.1 Numărul de poli statorici și rotorici ai unui SRM

Pentru ca mișcarea de rotație să fie continuă, polii statorici și rotorici trebuie să satisfacă o serie de condiții speciale, cum ar fi, ca aceștia să fie distribuiți în mod echilibrat și egal pe circumferința mașinii, iar numărul lor trebuie să satisfacă condițiile:

$N_s = 2mq$ $N_r = 2(mq \pm 1)$	(6.13)
---------------------------------	--------

Unde N_r și N_s sunt numărul de poli rotorici și statorici, respectiv q este numărul de faze al mașinii, iar m este un multiplicator care este fie 1 fie 2. Pentru a reduce comutația fazelor mașinii și implicit pentru a le amorsa pe zona de inductivitate minimă, numărul de poli rotorici trebuie să fie mai mic decât numărul de poli statorici, ca atare, în ec. (6.13) semnul din fața termenului 1 este minus.

Configurațiile cele mai uzuale de SRM sunt cele de patru faze, adică 8/6 și cele de trei faze, adică 6/4. Ultima configurație are avantajul că lasă mai mult loc pentru avansul fazelor la viteze mari. Totodată, structura de 6/4 față de cea 8/6, minimizează cuplajul mutual al fazelor adiacente. Dezavantajul structurilor cu poli

putini este faptul că datorită comutațiilor puține pe revoluție, caracteristica de cuplu prezintă rippluri mari. Ca atare, structura de 8/6 reduce acest ripplu datorită creșterii numărului de poli. Creșterea numărului de faze duce la creșterea complexității convertorului electronic, ceea ce duce la creșterea prețului sistemului. Există variante de mașini care sunt în structuri multiple, cum ar fi 12/8 sau 16/12, care au tot patru faze dar o fază este distribuită pe mai multe perechi de poli. Ca atare puterea mașinii crește iar complexitatea convertorului rămâne tot la patru faze.

6.2.2 Diametrul exterior al statorului unui SRM

De obicei proiectarea diametrului exterior al statorului este restricționată de spațiul în care mașina trebuie inclusă. Defapt, compromisul care trebuie făcut aici este între raportul dintre diametrul exterior al mașinii și lungimea ei. În general, structurile de SRM au diametrul exterior mai mare decât lungimea, aceasta ducând la performanțe mai bune ale mașinii. Dacă totuși se optează pentru structuri care au lungimea mai mare decât diametrul exterior, apar probleme de natură termică. Aici este necesar să se prevadă un sistem de răcire auxiliar al mașinii. Pe de altă parte o altă problemă care poate să apară se referă la riscul de deformare al rotorului acesta fiind supus forțelor de atracție către stator.

6.2.3 Diametrul exterior al rotorului unui SRM

Relația dintre cuplul dezvoltat de SRM și parametrii mașinii este guvernată de relația:

$T = D_r^2 l (Ni)^2$	(6.14)
----------------------	--------

Unde D_r , Ni și l sunt diametrul exterior al rotorului, solenația mașinii și lungimea activă a ei. O dată ce diametrul exterior al mașinii este fixat, creșterea diametrului rotorului, va duce implicit la reducerea solenației mașinii, ca atare reducerea cuplului produs. Trebuie avut în calcul și faptul că rotorul mașinii este cel răspunzător pentru creșterea inerției ei respectiv a vibrațiilor introduse de acesta.

6.2.4 Întrefierul unui SRM

Întrefierul are un rol crucial la această mașină, caracterizând producerea de cuplu și comportamentul dinamic al ei. Reducerea întrefierului duce la creșterea inductivității în poziție aliniată care are ca repercursiune creșterea cuplului produs. Pe de altă parte, un întrefier foarte mic va duce la saturarea drastică a circuitului magnetic al polilor mașinii. Totodată, manufactura unui întrefier mic devine foarte costisitoare și necesită metode avansate de echilibrare a rotorului. Există diferite strategii de calcul a întrefierului mașinii, unele foarte laborioase, altele relativ simple, bazate pe metode empirice, cum ar fi:

$\delta(mm) = 1 + \frac{D_s}{1000}$	(6.15)
-------------------------------------	--------

Dacă se realizează un calcul al inducției în polii mașinii, se poate stabili concret un nivel optim de saturație al lor respectiv lățimea întrefierului.

6.2.5 Deschiderea arcului statoric

Având în vedere faptul că cuplul dezvoltat depinde foarte mult de solenație, implicit de spațiul alocat spirelor mașinii, este important ca la dimensionarea mașinii să se considere un spațiu cât mai mare pentru înfășurări în așa fel încât sonelanția mașinii să fie cât mai mare.

O deschidere a arcului statoric foarte mică va duce la vibrații serioase ale polilor pe de o parte, iar pe de altă parte reduce foarte mult suprafața activă a mașinii care duce la diminuarea cuplului.

Valoarea optimă pentru deschiderea arcului statoric este:

$0.3 \frac{\pi D_R}{N_s} \leq \lambda_s \leq 0.35 \frac{\pi D_R}{N_s}$	(6.16)
--	--------

Tot din cadrul proiectării statorului face parte și etapa de dimensionare a jugului statoric care asigură închiderea circuitului magnetic al polilor statorici. Acesta de obicei se consideră ca fiind cca. de 1.2 ori mai gros decât grosimea polilor statorici, aceasta pentru a asigura o saturație optimă a lui.

Analizele de tip analitic care se fac la aceste mașini sunt bazate pe circuite magnetice echivalente, fie statice fie dinamice. Circuitele la rândul lor sunt realizate din surse de câmp și reluctanțe magnetice calculate aferent fiecărei zone ale mașinii. Cu mașina este distribuită în mai multe reluctanțe în circuitul echivalent, cu atât determinarea inducțiilor aferente lor este mai precisă. Aceste calcule sunt de tip iterativ, adică se realizează o impunere a inducțiilor dorite pentru fiecare zonă, iar apoi modelul de circuit magnetic se iterează modificând dimensiunile mașinii până valorile impuse coincid cu cele rezultate din calcule.