

Curs 5

**Sisteme de propulsie cu motoare sincrone cu
magneți permanenți în VE și VEH**

Utilizarea magneților permanenți cu densitate mare de energie stocată drept surse de excitație ale motoarelor, duce la realizarea unor mașini electrice cu preformanțe ridicate în ceea ce privește densitatea de putere ridicată, randament și fiabilitate net superioare și viteză mare. Aceste avantaje sunt promițătoare pentru domeniul tracțiunii electrice și hibride. Din segmentul motoarelor cu magneți permanenți, mai precis, din categoria motoarelor sincrone cu magneți permanenți, motoarele de curent continuu cu magneți permanenți sunt candidatul cel mai serios pentru domeniul vehiculelor electrice și hibride. Trebuie să menționăm faptul că, motorul de curent continuu cu magneți permanenți, este derivat din mașina de curent continuu clasică, reversând rotorul cu statorul, iar cum în stator înfășurarea devine trifazată și rotorul are un flux constant invariabil în timp, ea intră în categoria mașinilor sincrone cu magnet permanent. Plasarea la suprafață a magneților face ca tensiunea electromotoare a mașinii să se apropie de forma trapezoidală. Așadar, aceasta este o mașină sincronă cu magneți permanenți și tensiune trapezoidală. În literatura străină ea poartă numele de "brushless DC (BLDC)".

Mașinile sincrone cu magneți permanenți (MSMP) dispun de următoarele avantaje:

1. Randament ridicat: MSMP sunt categoria de mașini electrice cu cel mai ridicat randament. Aceasta se datorește existenței în structura lor a magneților permanenți ca sursă de excitație și care nu necesită consum de energie din exteriorul mașinii. Absența comutatorului mecanic și al sistemului inele-perii, reduce frecările mecanice, implicit pierderile mecanice, ceea ce adaugă un plus la randament.

2. Compactizare: Apariția relativ recentă a magneților permanenți cu densitate mare de energie (magneți de pământuri rare) permit obținerea unor densități mari de flux în MSMP. Asta duce la obținerea de densitate mare de cuplu, deci implicit, reduce dimensiunile și greutatea mașinii.

3. Simplitate în control: MSMP pot fi controlate foarte simplu, invocând strategii și metode foarte bine puse la punct actualmente.

4. Simplitate în răcire: Nefiind o circulație de curent electric în rotor, acesta nu se încălzește, deci nu are nevoie de răcire. Statorul mașinii este cel parcurs de curent electric, și nevoia lui de răcire este satisfăcută la nivelul periferiei exterioare a carcasei mașinii.

5. Mentenanță simplă, longevitate pronunțată și fiabilitate ridicată: Absența periilor și a comutatorului mecanic suprimă necesitatea mentenanței periodice și al riscului de defect al acestor componente.

6. Emisii de zgomot foarte reduse: Nefiind o comutație mecanică ci una electronică, mașina este foarte silențioasă, iar dacă convertorul electronic de comandă este operat la frecvențe ridicate, zgomotul produs de comutație trece peste zona de perceptibilitate a urechii umane.

Așa cum e firesc să fie, orice serie de avantaje atrage după sine și o serie de dezavantaje. Dezavantajele care trebuie menționate și la MSMP sunt:

1. Preț: Magneții de pământuri rare sunt mult mai costisitori decât alte tipuri de magneți, ceea ce duce la ridicarea prețului motorului.

2. Plajă limitată de putere constantă: O plajă cât mai largă de putere constantă este curcicală pentru implementare în vehicule electrice sau hibride. MSMP sunt

incapabile de a servi viteze de două ori mai mari decât viteza nominală, ceea ce reduce plaja de putere.

3. Siguranță: mangeții din pământuri rare au forța de atracție a metalelor foarte puternică, ca atare pot atrage orice bucată metalică din jurul lor, aceasta făcând dificilă asamblarea mașinii. Pe de altă parte, atunci când motorul este învârtit în gol din exterior (asemenea mersului la liber din inerție a vehiculelor) datorită MP, în înfășurări se induc tensiuni mari ceea ce poate pune în pericol sistemele din jurul motorului.

4. Demagnetizarea magneților: Magneții permanenți pot fi demagnetizați dacă acestora li se aplică câmpuri intense în opoziție de câmpul lor propriu sau sunt supuși la temperaturi mari. Ca atare, trebuie luate foarte serios în atenție sistemele de răcire și supunerea la demagnetizare pentru creșterea duratei de viață a mașinii.

5. Capacitatea de viteză mare: MSMP având magneții montați la suprafață nu pot atinge viteze mari deoarece există riscul desprinderii mecanice a acestora din ansamblul rotoric.

6. Defecțiunea invertoarelor pentru MSMP: Deoarece există în rotor MP, aceste mașini prezintă riscul ridicat de distrugere în cazul în care apare un scurt circuit în convertorul electronic. Acest fenomen se datorează faptului că, mașina aflată în mișcare de rotație induce tot timpul tensiune electromotoare în spire. În caz de scurt circuit la inverter, un curent foarte mare se va stabili în înfășurări, ceea ce duce implicit la producerea unui cuplu foarte mare care tinde să blocheze rotorul. Pericolul de blocare a roților vehiculului este foarte mare în acest caz, iar la viteze de deplasare mari, acesta poate produce avariarea vehiculului și punerea în pericol a vieților omenești. Un alt risc care apare și în acest caz este cel menționat anterior, anume demagnetizarea permanentă a magneților permanenți.

Defectele de circuit deschis ale MSPM nu reprezintă un pericol pentru stabilitatea vehiculului. Totuși, lipsa controlului motorului în caz de asemenea defect poate să prezinte o problemă serioasă. Datorită faptului că magneții sunt mereu încărcăți cu energia proprie, și prin lipsa controlului asupra mașinii, este dificil de minimizat efectul defectului asupra comportamentului vehiculului. Acest aspect reprezintă un reper de interes în special atunci când mașina este operată în regim de putere constantă. În acest regim, fluxul generat de stator se opune fluxului produs de magneți și permite mașinii să se rotească la viteze peste cea nominală. Dacă fluxul statoric dispare, fluxul rotorului va induce tensiuni electromotoare în înfășurările statorului care poate să distrugă circuitele electronicii de putere.

5.1. Principiul de operare al MSMP

O MSMP este controlată dintr-un inverter electronic de putere, precum e ilustrat în fig. 5.1. Senzorii de poziție $H1$, $H2$ și $H3$ determină poziția rotorului mașinii. Aceasta este transmisă controlerului DSP care realizează calculul semnalelor de comandă pentru grilele tranzistoarelor din convertorul de putere. Astfel, fazele mașinii sunt alimentate cu tensiune controlată pentru a obține curentul dorit și implicit cuplul și viteza mașinii.

Din punct de vedere constructiv, MSMP au rotorul cu magneți montați la suprafață sau sunt îngropați în rotor. Fig. 5.2a prezintă varianta de rotor cu magneți plasați la suprafața rotorului. Această structură este relativ ușor de realizat în special atunci când se doresc poli rotorici răsușiți pentru a obține ripluri de cuplu parazit

reduse. Problema aici apare atunci când mașina se supratorează și există riscul desprinderii lor de pe suprafața rotorului.

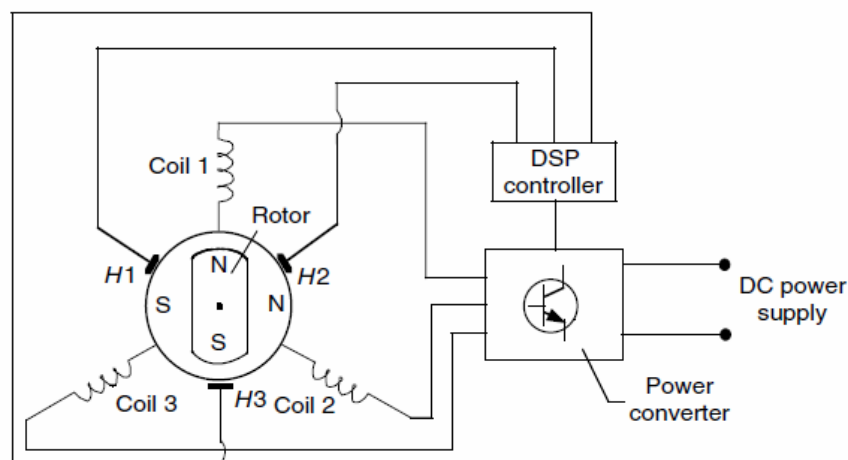


Fig. 5.1 Sistemul de control al MSMP

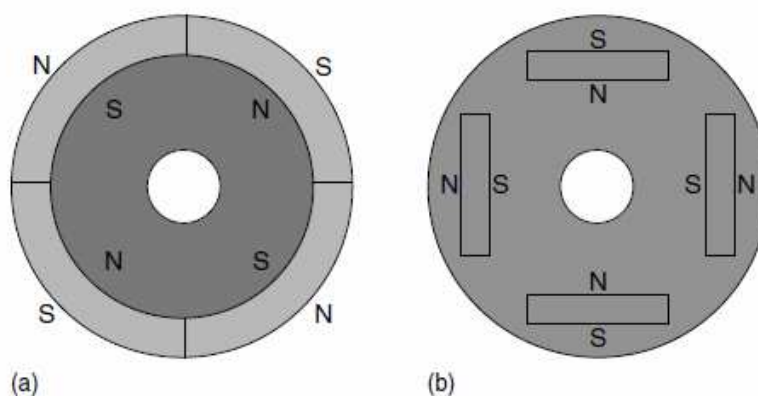


Fig. 5.2 Structuri de rotor cu magneți la suprafață (a) și magneți îngropați (b)

Fig. 5.2b ilustrează structura în care magneții sunt plasați în interiorul rotorului. Această construcție este mai rară dată fiind dificultatea de realizare, dar este un candidat ideal pentru mașini de turație mare. La această variantă, există o variație a inductivității rotorului, deoarece, magneții permanenți, din punct de vedere al inductivității sunt văzuți ca aer, spre deosebire de partea de fier dintre doi magneți care are o cu totul altă inductivitate. Acest aspect se ia în considerare la construcția circuitului magnetic echivalent al mașinii.

Din punct de vedere al statorului, mai precis al circuitului electric al acestuia, există două categorii de MSMP. Acestea sunt caracterizate din punct de vedere al formei tensiunii electromotoare induse, și anume: sunt mașini cu tensiune electromotoare trapezoidală și altele cu tensiune electromotoare sinusoidală.

Cele cu tensiune electromotoare trapezoidală au următoarele caracteristici:

1. Distribuție rectangulară a fluxului magnetic în întrefier
2. Formă rectangulară a curentului
3. Plasarea concentrată a înfășurărilor în creștăturile statorice

Curenții pentru structura aceasta au formă cvasi-trapezoidală, cu câte două intervale a 60° electrice cu curent zero de excitație pe un ciclu de rotație. Natura undelor de excitație pentru mașini cu tensiune electromotoare trapezoidală permite o

serie de simplificări comparativ cu cele de formă sinusoidală. Mai concret, nu e nevoie de determinarea poziției rotorice cu rezoluție foarte mare, cum doar șase comutații au loc pe revoluție.

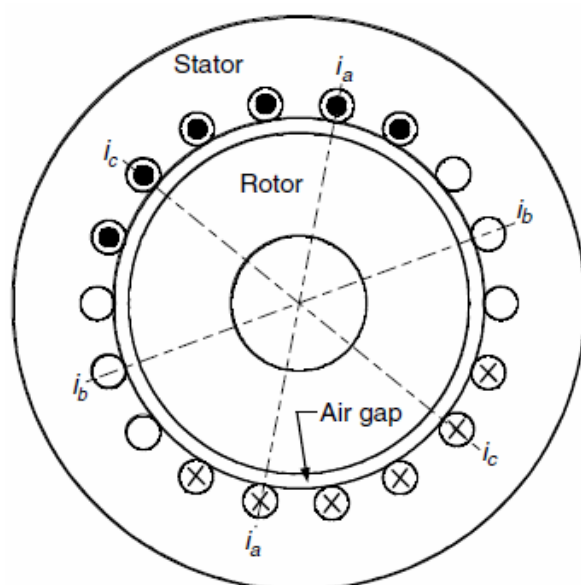


Fig. 5.3 Dispoziția înfășurărilor statorice la mașina cu tensiune electromotoare trapezoidală

În fig. 5.3 este ilustrată dispoziția înfășurărilor pentru o mașină cu tensiunea electromotoare trapezoidală. În fig. 5.4b este ilustrată tensiunea electromotoare trapezoidală a mașinii, respectiv curenții și semnalele senzorilor Hall, iar în fig. 5.4a este detaliat circuitul echivalent al înfășurărilor statorice. Tensiunile ilustrate sunt tensiuni de fază (între fază și neutru). Dispoziția înfășurărilor statorice este de tip trifazat, de un pas polar și concentrate, ca atare, tensiunea electromotoare prezintă un defazaj de 120° electrice. Pulsurile de curent sunt în regim de "120° ON și 60° OFF", adică curentul parcurge timp de 2/3 dintr-o perioadă de 360° , 120° pozitiv și 120° negativ. Pentru a controla motorul cu raport maxim și constant de cuplu/curent, este de dorit ca pulsurile rectangulare de curent să fie sincronizate cu tensiunea electromotoare de fază pe fiecare fază.

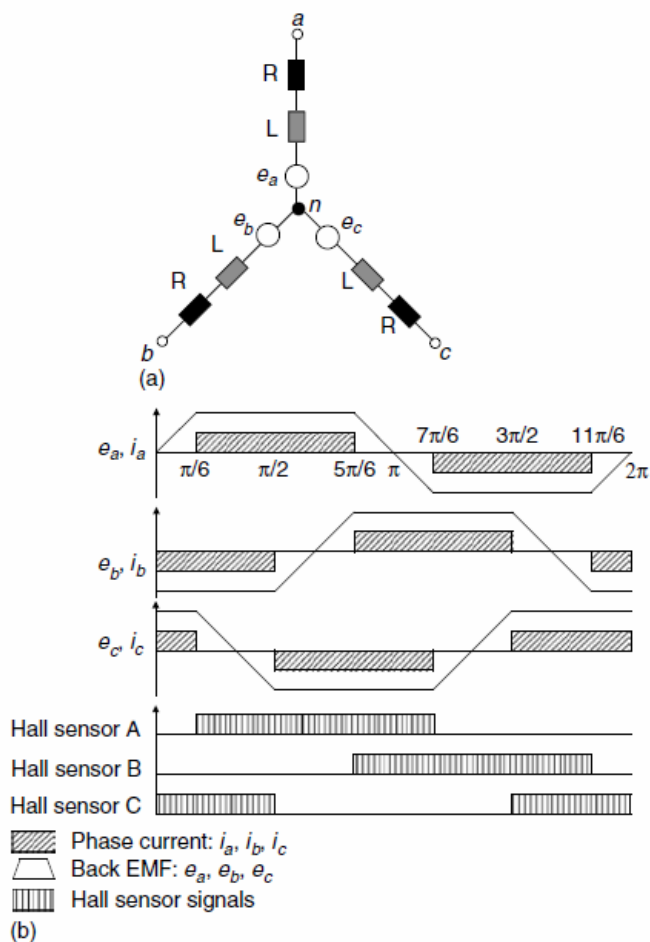


Fig. 5.4 Circuitul echivalent trifazat (a) și tensiunile electromotoare induse, semnalul de la senzorii Hall și curenții pentru o structură trapezoidală

MSMP cu tensiune electromotoare sinusoidală au următoarele caracteristici:

1. Distribuție sinusoidală a fluxului magnetic în întrefier
2. Formă sinusoidală a curentului
3. Plasarea distribuită a înfășurărilor în creștăturile statorice

Aspectul fundamental al acestor mașini este faptul că tensiunea electromotoare are formă sinusoidală, a cărei variație fiind funcție de poziția rotorică. Operarea unui asemenea motor, în ceea ce privește controlul ei, este asemenea unui motor sincron clasic. La nivelul statorului ia naștere un câmp magnetic învârtitor care face ca mașina să poată fi analizată prin prisma unei diagrame fazoriale.

În fig. 5.5 este ilustrată configurația înfășurărilor unei asemenea mașini respectiv a tensiunii electromotoare induse.

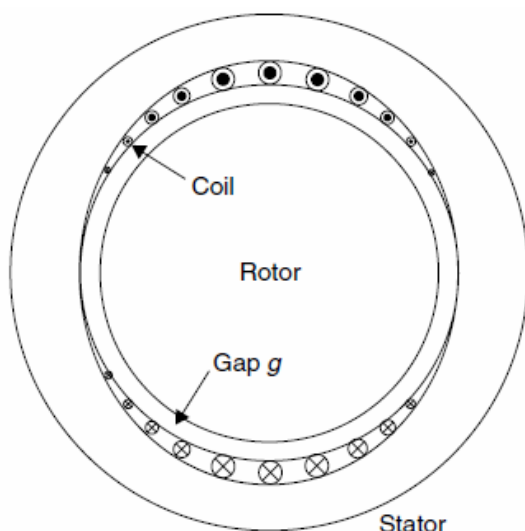


Fig. 5.5 Configurația înfășurării unei MSMP cu tensiune electromotoare sinusoidale

5.1.1. Proprietățile magneților permanenți

Există trei clase de magneți permanenți actualmente utilizați la mașini sincrone cu MP:

1. AlNiCo (Al, Ni, Co, Fe)
2. Ceramice (ferite), de exemplu ferite de bariu ($\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) și ferite de stronțiu ($\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)
3. Pământuri rare, care sunt samariu cobalt SmCO și neodim-fier-bor NdFeB.

Curbele de demagnetizare pentru fiecare sunt date în fig. 5.6.

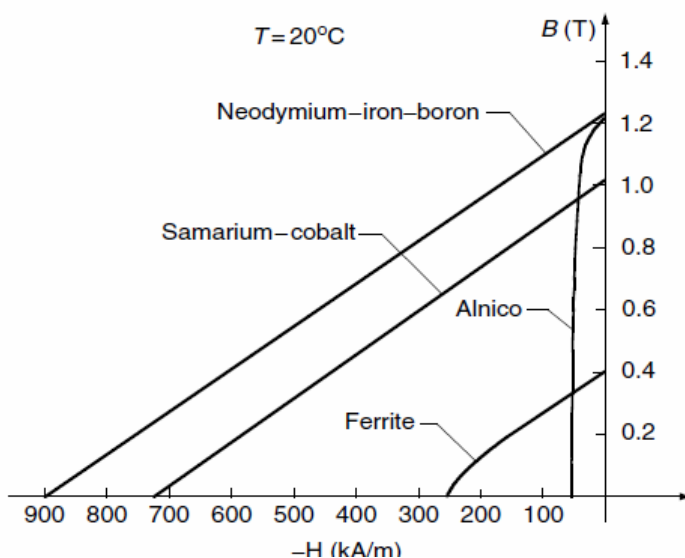


Fig. 5.6 Curbele de demagnetizare pentru magneți permanenți

Avantajele principale ale **AlNiCo** constă în remanența mare a fluxului magnetic și a coeficienților de temperatură scăzută. Coeficientul de temperatură al fluxului magnetic remanent B_r este de $0,02\%/^{\circ}\text{C}$ iar temperatura de serviciu maximă

este de 520°C. Aceste avantaje fac ca la nivelul întrefierului să existe un câmp magnetic consistent la temperaturi de funcționare ridicate. Din păcate însă, forța coercitivă este de valoare mică iar curba de demagnetizare este extrem de neliniară. Ca atare, este foarte ușor nu doar să magnetizezi acești magneți, dar și să îi demagnetizezi. AlNiCo se utilizează în motoare de la câțiva wattți până la cca. 150kW. Acești magneți au dominat industria mașinilor electrice de la mijlocul anilor 40 până în anii 70, când feritele au devenit foarte larg răspândite.

Feritele de bariu sau stronțiu au fost inventat în anii 50. Ele au forța coercitivă mai mare decât AlNiCo dau în același timp au inducția remanentă mai mică. Coeficienții de temperatură sunt relativ mari, ca de exemplu 0,2%/°C iar câmpul coercitiv, H_c , de 0,27%/°C. Temperatura maximă de serviciu este de 400°C. Principalele avantaje ale feritelor constă în preț redus și resistivitate electrică mare, ceea ce face ca să nu existe, sau să fie extrem de mici curenții turbionari induși în structura lor. Asta face ca randamentul total al mașinii să crească.

Magneții de **pământuri rare** au semnalat un real progres în ultimii treizeci de ani, având o cantitate mare de energie disponibilă $(BH)_{max}$. Primele generații de asemenea magneți au avut o compoziție bazată pe samariu-cobalt (SmCo_5) și au fost inventați în anii 60 și produși pe scară largă în anii 70. Azi, este cunoscut ca fiind un material puternic magnetizat. Avantajele lui sunt marcate de un flux magnetic remanent și câmp coercitiv mari. Coeficientul de temperatură al B_r este 0,03-0,045%/°C iar coeficientul de temperatură al H_c este 0,14-0,4%/°C. Temperatura maximă de serviciu este de 250-300°C. Ca atare este propice pentru construcția motoarelor de volum redus, și implicit densitate de putere specifică ridicat, dar și de inerție mică. Singurul dezavantaj major este prețul ridicat al magneților. Atât Sm cât și Co au preț relativ ridicat datorită restricțiilor de aprovizionare.

O dată cu descoperirea magneților de pământuri rare de a doua generație, bazate pe neodim (Nd) și fier, ambele materiale relativ ieftine, s-a realizat un progres remarcabil în acest domeniu, prețul fiind cel care dicta utilizare lor. Magneții de NdFeB care azi sunt produși pe scară largă, au proprietățile celor de SmCo, dar, doar la temperatura ambientală. Caracteristicile lor, în special cea de demagnetizare sunt puternic influențate de variația temperaturii. Coeficientul de temperatură al B_r este 0,095-0,15%/°C iar coeficientul de temperatură al H_c este de 0,4-0,7%/°C. Temperatura maximă de serviciu este de 150°C iar temperatura Curie este de 310°C.

Ultimele îmbunătățiri care s-au adus magneților de NdFeB au fost stabilitatea termică, permițând ridicare temperaturii de lucru cu 50°C, pe de o parte, iar pe de altă parte li s-a crescut rezistența față de coroziune.

5.2. Analiza performanțelor și controlul MSMP

Performanțele viteză-cuplu ale MSMP sunt cele mai importante atunci când discutăm despre sisteme de tracțiune. Ca în orice mașină electrică, cuplul este produs de interacțiunea dintre câmp și curent, altfel spus, interacțiunea dintre câmpul statoric produs de curentul electric și cel câmpul rotoric. Curentul prin stator se stabilește din diferența dintre tensiunea de alimentare a mașinii și tensiunea electromotoare indusă, care este determinată de mișcarea rotorului în stator. Pentru a obține o anumită turație și un anumit cuplu, în mașină trebuie să se controleze obținerea unui anumit curent, ca atare, trebuie ca mașina să fie alimentată la o tensiune bine determinată.

5.2.1 Analiza performanțelor MSMP

Discuție în cele ce urmează, privind performanțele MSMP se realizează în următoarele ipoteze:

1. Circuitul magnetic al mașinii este nesaturat
2. Rezistența electrică a fiecărei faze sunt perfect egale și inductanțele mutuale și proprii sunt constante
3. Componentele semiconductoare din invertorul electronic sunt ideale
4. Pierderile în fier sunt neglijabile raportate la puterea mașinii

O variantă de circuit simplificat al mașinii este prezentat în fig. 5.7, unde V_t este tensiunea de alimentare, R_s este rezistența fazei, L_s inductivitatea ei, unde $L_s = L - M$ (L este inductivitatea proprie iar M este inductivitatea mutuală), E_s este tensiunea electromotoare produsă de rotor în stator.

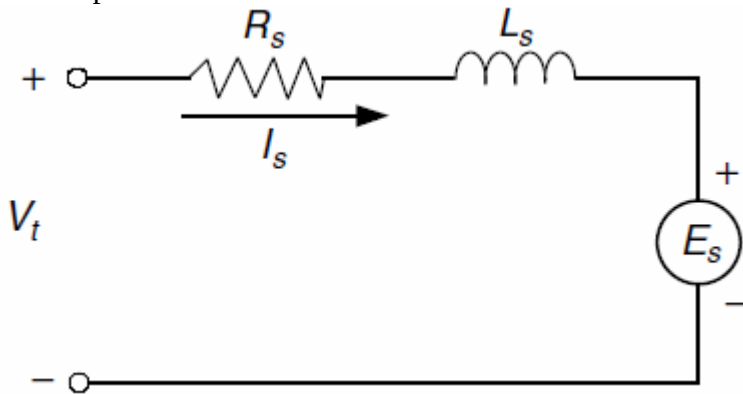


Fig. 5.7 Circuitul electric simplificat al MSMP

Pe maginea circuitului simplificat se pot scrie următoarele ecuații pentru MSMP:

$V_t = R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + E_s$ $E_s = k_E \omega_r$ $T_e = k_T I_s$ $T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r$	(5.1)
--	-------

În ecuațiile de mai sus, k_E este constanta tensiunii electromotoare, care este asociată cu structura rotorului și implicit cu MP, ω_r este viteza rotorului, k_T este constanta de cuplu, T_L este cuplul de sarcină și B este coeficientul de frecări vâscoare. Pentru regim stabilizat ec. (5.1) se poate reduce la:

$T_e = \frac{(V_t - k_E \omega_r) k_T}{R_s}$	(5.2)
--	-------

Performanțele caracterizate prin variația cuplu-viteză la tensiune de alimentare constantă sunt ilustrate în fig. 5.8. Se poate observa din figură că la viteze mici, în special la viteza de pornire, se produce un cuplu foarte mare, care se manifestă prin

curent foarte mare, și deci, tensiune electromotoare mică, dată fiind viteza mică. Acest curent foarte mare poate pune în pericol integritatea înfășurărilor mașinii.

Alimentând dintr-o sursă variabilă de tensiune, acest curent de pornire poate să fie rezumat la o valoare pe care mașina o poate accepta, ca atare un cuplu maxim, constant, se poate dezvolta la arborele mașinii. Acest fenomen este ilustrat în fig. 5.9.

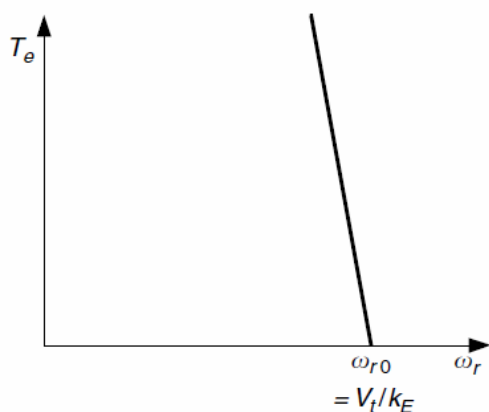


Fig. 5.8 Caracteristica viteză-cuplu în regim stabilizat la tensiune constantă

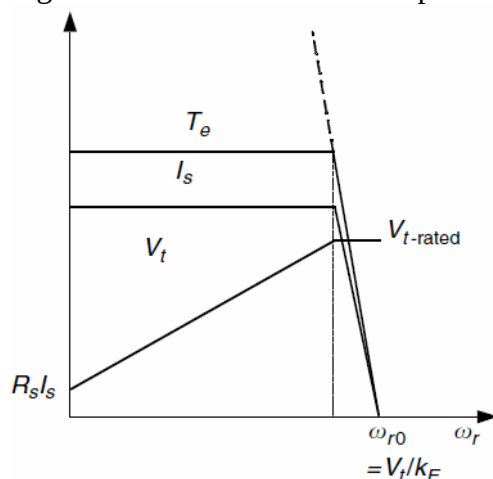


Fig. 5.9 Caracteristica viteză-cuplu în regim stabilizat la tensiune variabilă

Pentru regimuri dinamice sau tranzitorii, performanțele mașinii sunt descrise de grupul de ec. (5.1). Transformarea acestor ecuații în domeniul Laplace simplifică mult analiza mașinii; forma lor în Laplace devenind:

$V_t(s) = E_s(s) + (R_s + sL_s)I_s(s)$ $E_s(s) = k_E \varpi_r(s)$ $T_e(s) = k_T I_s(s)$ $T_e(s) = T_L(s) + (B + sJ) \varpi_r(s)$	(5.3)
--	-------

Ca atare, funcția de transfer a MSMP poate fi scrisă ca:

$\varpi_r(s) = \frac{k_T}{(R_s + sL_s)(sJ + B) + k_T k_E} V_t(s) - \frac{R_s + sL_s}{(R_s + sL_s)(sJ + B) + k_T k_E}$	(5.4)
---	-------

În ec. (5.4) L_s și J reprezintă decalajele electrice și mecanice în regim tranzitoriu, fiind acum în domeniul Laplace. L_s determină cât de repede curentul din stator ajunge la valoarea dorită, cu alte cuvinte, caracterizează durata de răspuns la un

o modificare tip pas a tensiunii de alimentare atunci când viteza rotorului se consideră constantă. J pe de altă parte, arată cât de repede se modifică viteza mașinii la un o modificare tip treaptă a tensiunii de alimentare.

5.2.1 Controlul sistemelor cu MSMP

În sistemele de tracțiune electrică, cuplul produs trebuie să urmeze foarte precis o caracteristică dorită de către șofer, comandate prin pedala de accelerație și cea de frână. Așadar, controlul de cuplu al mașinii este metoda de bază pentru aceste mașini.

În fig. 5.10 este ilustrată diagrama bloc a unității de control de cuplu a MSMP. Curentul dorit I^* este calculat din cuplul impus T^* prin intermediul unui bloc de calcul de cuplu. Unitatea de control și sincronizare calculează funcție de curenții existenți și de poziția rotorică impulsurile de comandă pentru tranzistoarele inverterului de putere. Aceste impulsuri sunt transmise inverterului electronic care realizează alimentarea mașinii.

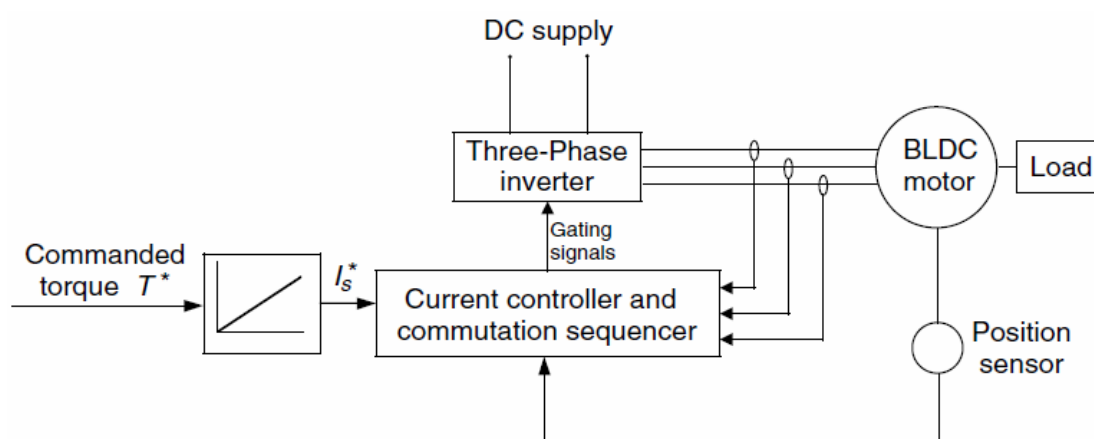


Fig. 5.10 Diagrama bloc cu unitatea de control în cuplu a MSMP

În aplicații de tracțiune electrică, se necesită adesea controlul în viteză a mașinii (vezi fig. 5.11). Multe aplicații care cer performanțe ridicate includ reacția de curent pentru control în cuplu. Oricum, varianta minimă de control include un singur senzor de curent, montat pe nivelul de tensiune continuă (adică pe alimentarea convertorului) din care se calculează valoarea reală a curenților din mașină, și asigură ca în mașină nu ajung supracurenți. Blocul de control de viteză poate să fie orice tip de regulator tip PI sau chiar mai complex, regulatoare implementate cu inteligență artificială. Unitatea centrală de control și sincronizare asigură ca semnalele de grilă transmise inverterului electronic să fie corect sincronizate funcție de curenții reali din mașină. Metoda de calcul a impulsurilor de comandă poate să fie realizată prin comparare cu o referință, în cazul controlului cu histerezis sau prin tehnica modulării pe lățime a impulsurilor (PWM). Detecția poziției rotorului este crucială, pentru că unitatea de control, fiind responsabilă în cele din urmă de realizarea câmpului învârtitor în stator, acesta trebuie să fie în sincron cu câmpul rotorului, deci implicit cu poziția rotorului.

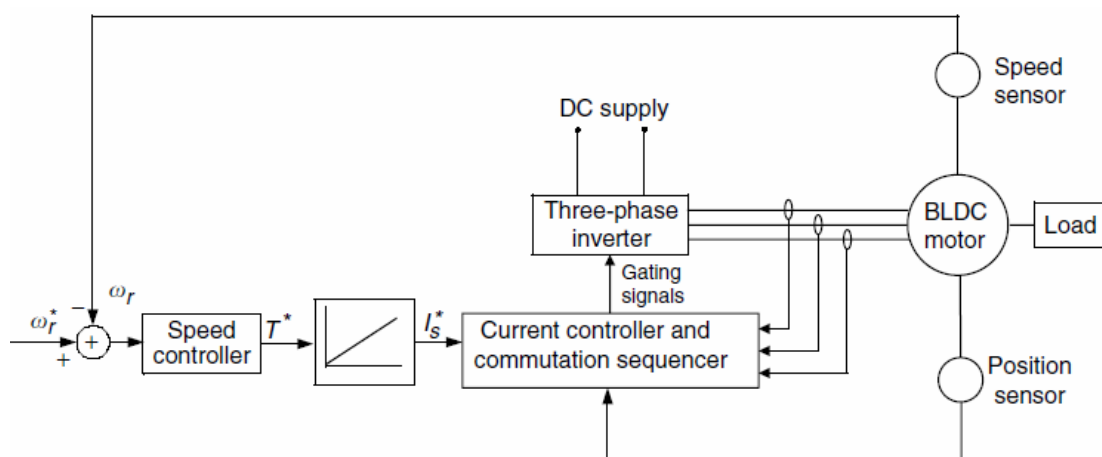


Fig. 5.11 Diagrama bloc cu unitatea de control în viteză a MSMP

5.2.2 Tehnologii ale controlului în viteză

Așa cum s-a mai menționat, MSMP au o plajă mică de putere constantă datorită limitei relativ restrânse de posibilitate de deluxaj a mașinii (reducerea fluxului magneților permanenți). Aceasta se datorește pericolului supunerii magneților permanenți la câmpuri intense inverse câmpului lor propriu. Recent, utilizarea unor înfășurări adiționale de câmp, au permis exinderea plajei de viteză în care aceste mașini pot opera. Ideea acestor înfășurări este de a controla câmpul din întrefier în așa fel încât să se permită mașinii să opereze la viteză mare în regim de putere constantă. Datorită prezenței MP și a înfășurării de câmp la nivelul rotorului, aceste mașini poartă numele de MSMP hibride (MSMPH). MSMPH pot fi duse la viteze de până la de 4 ori mai mare decât viteza nominală. Caracteristicile optime de randament ale MSMPH sunt ilustrate în fig. 5.12.

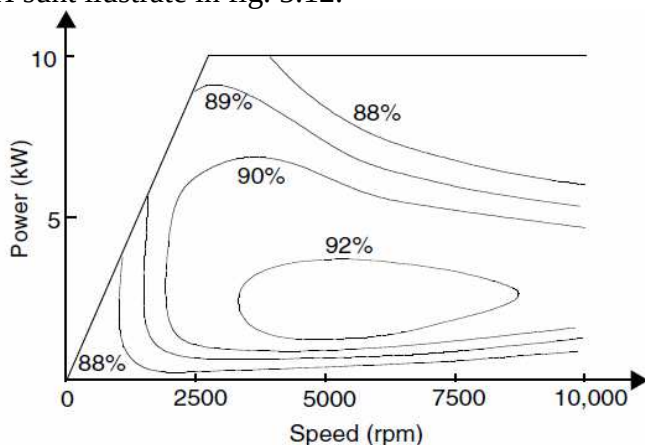


Fig. 5.12 Caracteristicile de randament pentru MSMPH

Dezavantajul major al acestor mașini este faptul că ele au o structură relativ complexă. Totuși, raportul de viteze atins de acestea nu este suficient pentru a satisface cerințele unui VE sau VEH. Ca atare, este necesară implementarea unei transmisii mecanice multitreaptă.

5.2.3 Tehnologii de control fără senzori

După cum s-a observat până acum, pentru controlul acestei mașini este necesar să se implementeze unități de senzori pentru măsura diferitelor mărimi care intervin în calculele blocului de control. Sensorul de poziție este fie de tip Hall, fie encoder, fie resolver. Aceste variante de senzori sunt pe de o parte costisitori, dar pe de altă parte sunt fragili, iar în domeniul VE și VEH, șocurile mecanice sunt la ordinea zilei. Ca atare, prezența lor nu doar crește costurile de implementare, dar reduce consistent fiabilitatea sistemului global. Determinarea poziției rotorului fără utilizarea senzorilor poate rezolva problemele anterior menționate. Aceste cerințe sunt cruciale atunci când ne referim la echipamente navale sau militare, deci trebuie luate serios în considerare.

Prin cercetări au fost implementate mai multe metode de control fără senzor de poziție. Acestea se bazează pe detectarea curentului, a tensiunii și a tensiunii electromotoare a mașinii. Astfel, ele pot fi grupate în trei categorii:

1. Cele care folosesc curenții și tensiunile măsurate, determinând poziția din ecuațiile mașinii prin manipulări algebrice
2. Cele care folosesc metode bazate pe tensiunea electromotoare
3. Cele bazate pe strategii noi, în dezvoltare, care nu intră în categoriile de mai sus.

Tehnologia de control fără senzori bazate pe măsurători și manipulări algebrice constă în două strategii: (1) metode care calculează fluxurile de înlănțuire bazate pe măsurarea tensiunilor și al curenților și (2) metode bazate pe precalcularea tensiunilor și curenților, comparând apoi aceste valori cu cele real măsurate și determinând schimbarea poziției rotorului din eroarea comparatoarelor.

Pentru calculul fluxului modelul se bazează pe ecuația:

$\Psi = \int_0^t (V - Ri) dt$	(5.5)
-------------------------------	-------

Cunoscând poziția inițială, parametrii mașinii și relația dintre acestea și poziția rotorului, se poate determina poziția rotorică la fiecare moment de calcul. Determinând rata de modificare a fluxului rezolvând integrala de mai sus, se poate calcula în același timp și viteza mașinii. Un avantaj al aceste metode este acela că tensiunile de linie pot fi folosite în calcule, ca atare, nu mai este necesar a avea punct de neutru al mașinii. Asta este foarte benefic deoarece foarte multe mașini nu au acces la punctul de neutru al alimentării.

Cea de a doua metodă se bazează în prima fază pe dezvoltarea unui model dq foarte precis al mașinii. Prin măsurarea curenților și transformarea lor în sistem dq , tensiunile de ieșire din unitatea de calcul pot fi comparate cu cele real măsurate. Diferența dintre ele este proporțională cu diferența de unghi dintre modelul analitic al mașinii și unghiul real al ei. Din această diferență, cunoscând precis poziția inițială a rotorului se poate determina direct poziția în timp real.

Se poate observa că în ambele metode, se utilizează măsurarea unor parametri și făcând diferența între aceștia și cei calculați se determină poziția rotorică.

Metodele care folosesc metode bazate pe tensiunea electromotoare fac apel la strategii matematice relativ complexe pe de o parte, iar pe de altă parte necesită creșterea complexității convertorului electronic de putere.