

PRAVCI RAZVOJA SAVREMENIH ENERGETSKI EFIKASNIH ELEKTROMOTORNIM POGONIMA NAMENJENIM ZA UREĐAJE ŠIROKE POTROŠNJE

Darko Marčetić, Marko Gecić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*

Sadržaj – Rad se bavi trendovima u razvoju pogona za uređaje široke potrošnje pogonjenih kaveznim asinhronim motorom i sinhronim motorom sa permanentnim magnetima na rotoru. Prvo su opisana rešenja pomoću kojih se dolazi do uobičajenih pogona opšte namene koji su relativno niske cene i relativno jednostavni za masovnu proizvodnju. Zatim je diskutovana sigurnost rada tih pogona i robusnost rada pri značajnim ekskurzijama parametara motora i napojne mreže. Konačno, obrađeni su postupci kojim se uvećava i energetska efikasnost ovih pogona i time prati globalni razvojni trend. Opisane su metode za optimizaciju gubitaka snage sinhronih i asinhronih mašina. Za oba tipa motora dat je pregled metoda koje se baziraju na algoritmima pretrage, kao i metoda koje su zasnovane na modelu procesa. Na kraju, dati su primeri poboljšanih energetske efikasnosti oba tipa motora u jednoj primeni pogona opšte namene.

1. UVOD

Globalno tržište tradicionalno zahteva umanjeње cene, povećanje robusnosti rada i uprošćenje instalacije pogona opšte namene. Na ovom tržištu opstaju samo oni pogoni koji se proizvode u masovnim serijama, čija izrada zahteva minimalni utrošak materijala i energije, i čija je konačna proizvodna cena mala. Najnoviji zahtev pred pogonima opšte namene je i uvećanje energetske efikasnosti [1].

Zbog svoje cene i robusnosti motori naizmjenične struje (asinhroni motor - AM i sinhroni motor - SM) su potpuno potisnuli motore jednosmene struje u pogonima opšte namene. Ovim izborom se pokreće razvoj niza metoda za upravljanje ovim motorima bez upotrebe velikog broja skupih senzora, kablova i signal konvertora koji su sada neprihvatljivi, a bili su sastavni deo jednog servo pogona. Dodatno, pokreće se i rešavanje problema robusnosti rada pogona bez senzora, pogotovo pri značajnim ekskurzijama parametara motora i uz značajne varijacije napojne mreže. Ovim se rešava i problem raznih sigurnosnih regulativa, koje dozvoljavaju umanjeње broja senzora samo u slučaju da se pri tom ne naruši sigurni rad pogona u svim mogućim uslovima. Umanjenje cene i uvećanje robusnosti predstavljaju oprečne zahteve koji su bili pokretački mehanizam razvoja pogona opšte namene [1]–[13]. Prvobitno, u većini pogona za široku potrošnju je korišćen AM, uglavnom zbog mogućnosti skalarne kontrole koja je dozvoljavala rad u režimu slabljenja polja, ali i start motora sa punim opterećenjem bez početne informacije o položaju vratila. SM sa stalnim magnetima na rotoru (PMSM), iako atraktivan zbog veće efikasnosti na malim i srednjim brzinama, ulazi u pogone opšte namene tek primenom vektorske kontrole i metoda za procenu položaja rotora. Ovim je omogućeno stabilno upravljanje SM bez davača na vratilu u širokom opsegu brzina, uključujući sam start pod opterećenjem [8] i rad u režimu slabljenju polja. Istovremeno, pogoni sa AM takođe koriste prednosti vektorske kontrole i uvećavaju kvalitet rada procenom brzine

i položaja rotora kao i raspregnutim upravljanjem fluksom i momentom.

Najnoviji izazov za pogone opšte namene je potreba za uvećanjem energetske efikasnosti, tj. smanjenje gubitaka nastalih tokom elektromehaničke konverzije koji se mogu kontrolisati. Gubici u pogonu se sastoje od gubitaka u pretvaraču i gubitaka u motoru. Gubici u motoru se sastoje od gubitaka u bakru statora, mehaničkih gubitaka i gubitaka u gvožđu. Gubici u bakru su proporcionalni kvadratu struje kroz namotaje, dok se gubici u gvožđu sastoje od histerezisnih gubitaka i gubitaka usled vihornih struja. Dok se mehanički gubici ne mogu kontrolisati, gubici u bakru i gvožđu se mogu smanjiti odgovarajućim upravljanjem. Veliki broj autora danas paralelno radi na smanjenju ukupnih kontrolisanih gubitaka konverzije kod AM i SM [14]–[38]. Ova borba se prenosi i na tržište pogona opšte namene, pogotovo ako je pogon predviđen za rad na velikim brzinama. Pri malim brzinama, SM ima prednost po pitanju energetske efikasnosti jer ima nultu rotorsku struju i manju struju statora. Na velikim brzinama, SM gubi ovu prednost. Prvo, gubici u gvožđu postaju značajni kod oba tipa motora. Drugo, gubici u bakru SM naglo rastu sa brzinom uvećanjem amplitude statorske struje radi ostvarenja slabljenja polja. Ovo opet daje prednost AM koji na velikim brzinama ima zanemarljivo malu struju magnećenja, pa se deo gubitaka u bakru proporcionalan kvadratu struje statora smanjuju sa brzinom.

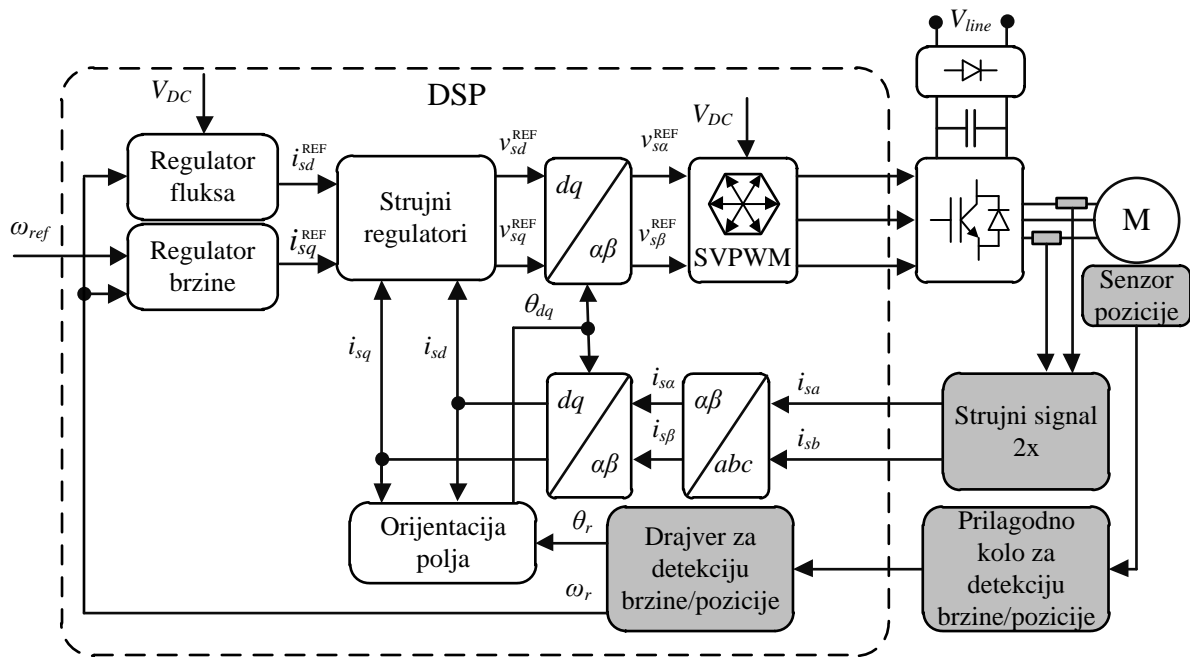
Ovaj rad obrađuje problematiku izrade modernog energetske efikasnog pogona namenjenog za potrebe uređaja široke potrošnje. U poglavlju dva su obrađeni trendovi u razvoju jeftinih ali robusnih pogona opšte namene sa AM i SM. U trećem poglavlju je dat pregled metoda za uvećanje efikasnosti SM u ovim pogonima, dok su u četvrtom poglavlju date metode za uvećanje efikasnosti AM.

2. VEKTORSKI POGONI OPŠTE NAMENE SA MINIMALNIM BROJEM SENZORA

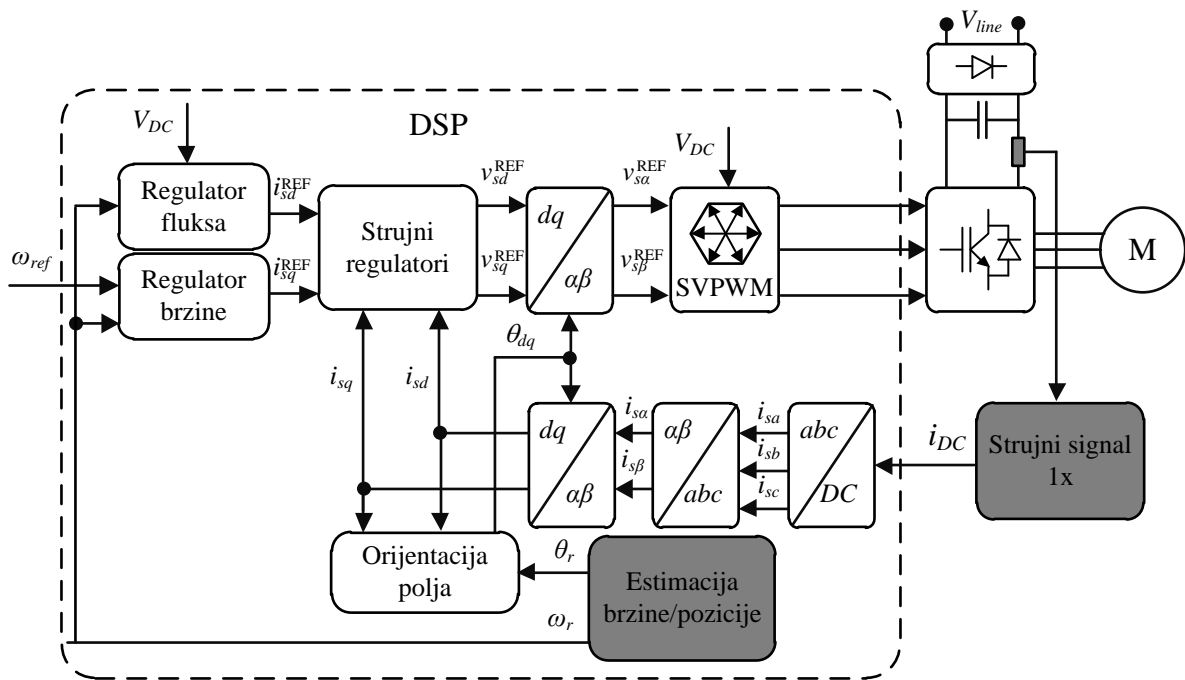
Da bi zadovoljili sve gore pomenute zahteve tržišta većina pogona široke potrošnje danas je vektorski upravljano. Vektorsko upravljanje poboljšava dinamičke performanse pogona i kontrolu vektora struje statora čime se omogućuje robusniji rad pri promeni parametara motora i pri promeni uslova napajanja. Ovim upravljanjem se i proširuje opseg brzina pogona, pogotovo u slučaju SM. Konačno, vektorsko upravljanje omogućuje i umanjeње gubitaka kod oba tipa motora. Ipak, mana vektorskog upravljanja je skup hardver za merenje vektora struje statora i trenutnog položaja rotora.

Na slici 1 je prikazan blok dijagram tradicionalnog rešenja vektorski upravljano pogona sa AM ili SM. U pogon su ugrađena dva LEM senzora struje i jedan davač položaja na vratilu. Oba senzora zahtevaju i dodatna kola za obradu signala pre ulaska u mikroprocesor ili DSP.

Na slici 2 je prikazan blok dijagram pogona široke potrošnje sa AM ili SM koji mora da bude jeftin i prost za ugradnju, tako da poseduje minimalan broj senzora.



Sl. 1. Blok dijagram vektorski upravljano servo pogona.



Sl. 2. Blok dijagram vektorski upravljano pogona za široku potrošnju sa minimalnim brojem senzora.

Da bi pogon opšte namene dobio sve prednosti vektorskog upravljanja i ostvario optimalan rad neophodno je na neki način proceniti položaj i brzinu rotora i time ostvariti raspregnuto upravljanje fluksom i momentom. Brzina i položaj rotora se procenjuju na osnovu raspoloživih terminalnih veličina, struja i napona namotaja statora. Radi daljeg umanjenja broja senzora u pogonu uobičajeno je da se napon motora ne meri direktno, već procenjuje na osnovu napona jednosmernog međukola i PWM povorke impulsa.

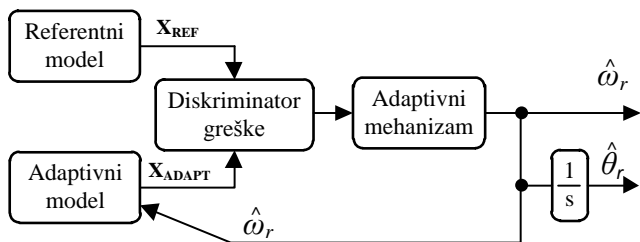
Rad bez senzora na vratilu dovodi do različitih izazova kod AM i SM, [2]–[10]. Danas se sve manje koriste prosti ali

parametarski zavisni kalkulatori ili *open-loop* estimatori položaja fluksa i brzine rotora. U literaturi se uglavnom izdvajaju dva načina procene položaja i brzine rotora, MRAS (*Model Reference Adaptive Systems*) estimatori (slika 3) i potpuni observeri fluksa i brzine rotora (slika 4). MRAS princip se zasniva na dva modela različitih struktura koji procenjuju istu promenljivu stanja motora. Model čija procena odabrane promenljive stanja ne zavisi od brzine i položaja rotora se uzima za referentni dok se rezultat drugog modela adaptira upravo korekcijom informacije o brzini rotora. Kod AM se koriste razne promenljive stanja, kao što

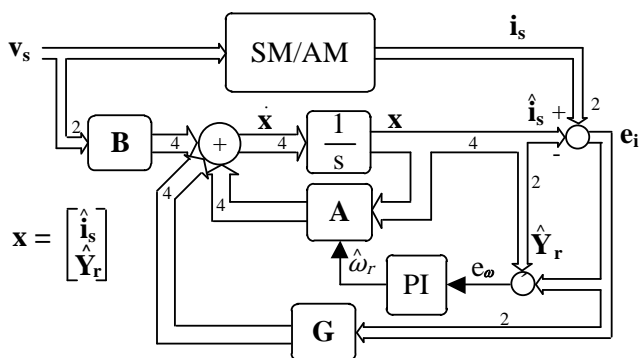
je vektor fluksa rotora, vektor napona, reaktivna snaga itd. [2]–[4]. Kod SM za referentni model se često koristi sam motor, čiji se napon, struja ili aktivna/reaktivna snaga mere i porede sa izlazom adaptivnog modela [5].

Opserver sistema (eng. Observer) je estimator stanja koji ima povratnu spregu tj. korektivno dejstvo. Observeri AM i SM se grade na osnovu modela motora u prostoru stanja $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}$, $\mathbf{y} = \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}$, gde je \mathbf{x} odabrani vektor stanja, \mathbf{A} matrica stanja, \mathbf{B} matrica ulaza i \mathbf{C} matrica izlaza sistema. Vektor stanja \mathbf{x} uobičajeno čine kombinacija dva vektora, vektor statorske struje \mathbf{i}_s kao merljivo stanje i odabrani vektor stanja motora \mathbf{Y}_r kao na primer fluks ili elektromotorna sila. Pošto se statorska struja ujedno i meri, poređenjem merene i u opserversu izračunate struje dobija se informacija o grešci ($\mathbf{e}_i = \mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s$) koja služi kao korektivna akcija. Opserver vrši korektivno dejstvo preko korektivne matrice \mathbf{G} , $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u} + \mathbf{G}\cdot\mathbf{e}_i$. Korektivna akcija potpuno ili delimično eliminiše grešku u modelu ili parametrima opserversa i time dovede do tačnije procene odabranog stanja, ali i brzine i položaja rotora, što je bio i cilj [6]–[7].

Dodatni problem se javlja pri startu sa punim opterećenjem SM bez davača položaja. Za razliku od AM, optimalan start SM zahteva poznavanje početnog položaja rotora. U režimu mirovanja SM ne postoji indukovana EMS rotora tako da se estimatori i observeri zasnovani na modelu ne mogu koristiti. Iz tog razloga se razvija čitav niz metoda za procene položaja SM koje se zasnivaju na odzivu motora na utisnuti test signal [8]–[10].



Sl. 3. Blok dijagram MRAS estimacije brzine i položaja rotora u pogonu sa AM/SM

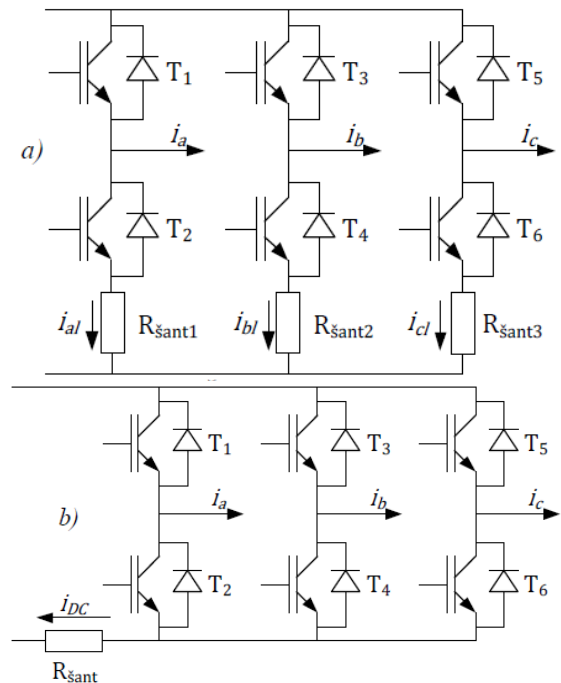


Sl. 4. Blok dijagram opserversa u pogonu sa AM/SM

Tradicionalno rešenje vektorski regulisanog pogona srednjih i visokih performansi sa trofaznim motorom naizmenične struje podrazumeva merenje dve linijske struje pomoću dva LEM davača. Ovo rešenje je po svojoj ceni neprihvatljivo za pogone namenjene uređajima široke potrošnje u koje se ugrađuju pogoni srednjih performansi. Ukoliko pogon nema davač na vratilu logično je da njegovu cenu ne treba opteretiti ni sa dva LEM davača struje. Iz gore

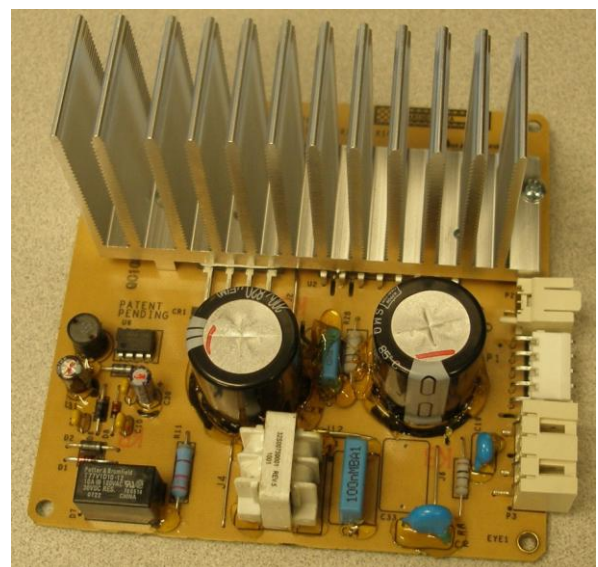
navedenih razloga, naponski inverter sa tri otpornička davača u granama invertora ili jednim otporničkim davačem u jednosmernom međukolu su jedino prihvatljivo rešenje za merenje struje u pogonima opšte namene, slika 5.

Ugradnja jednog strujnog davača značajno umanjuje cenu pogona, ali uvodi potrebu za rešavanjem problema rekonstrukcije faznih struja motora [11]–[13].



Sl. 5. Šema invertora sa tri šanta u granama (a) i jednim šantom u jednosmernom međukolu (b)

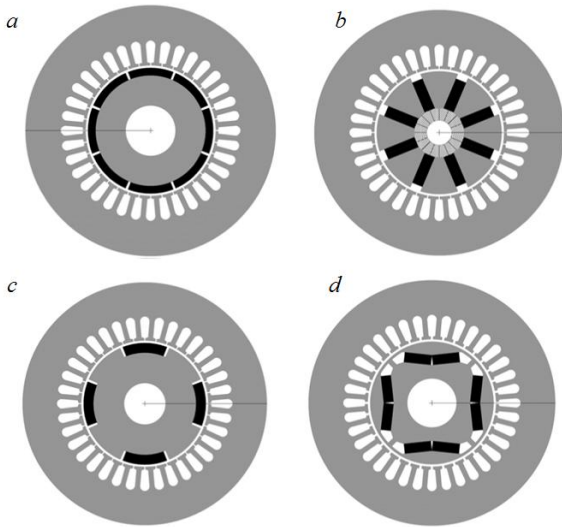
Jedan jeftin 1kW inverter namenjen za ugradnju u pogone opšte namene dat je na slici 6. Prilikom dizajna i izrade ovog pretvarača ostvarene su sledeće uštede: 1. korišćen je jeftini Freescale DSP, 2. modularni inverter (smešten ispod hladnjaka), 3. znatno jeftinija jednoslojna štampa, 3. za programiranje su korišćeni jeftini ivični konektori, 4. od senzora pogon poseduje samo jedan strujni šant u jednosmernom međukolu, 5. značajna ušteda je načinjena i optimalnim dizajnom hladnjaka.



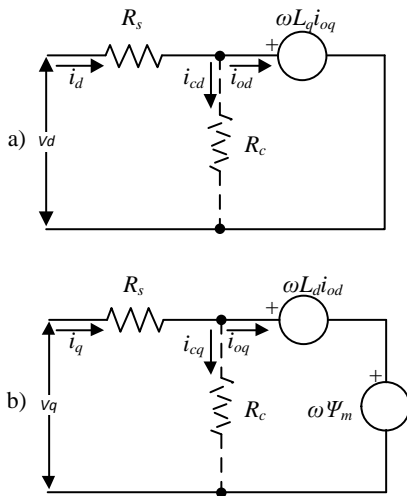
Sl. 6. Slika 1kW invertora namenjenog pogonu opšte namene

3. UVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA OPŠTE NAMENE SA PMSM

Stator SM ima trofazni namotaj i po konstrukciji istovetan statoru AM, dok se na rotoru SM nalaze stalni magneti. U radu će se posmatrati SM kod kojih je statorski namotaj raspodeljen i konstruisan tako da indukovana elektromotorna sila ima sinusoidalan oblik (eng. *Permanent Magnet Synchronous Machine* - PMSM). Na slici 7 prikazane su vrste PMSM s obzirom na način postavljanja stalnih magneta. PMSM sa površinski postavljenim magnetima (7.a) (*Surface PMSM-SPMSM*) imaju izotropan rotor, tj. jednake induktivnosti po podužnoj d i poprečnoj q osi ($L_d \approx L_q$). Rotor sa koncentrisanim fluksom (7.b) i rotor sa utisnutim magnetima (7.c) imaju umerenu magnetsku anizotropiju, dok rotor sa unutrašnjom montažom (7.d) magneta (eng. *Interior PMSM*) karakteriše velika magnetska anizotropija. Ove tri konstrukcije karakteriše manje gvožđa u d osi ($L_d < L_q$) i pojava značajnog reluktantnog momenta.



Sl. 7. Vrste SM sa stalnim magnetima: a) površinski magneti, b) rotor sa koncentrisanim fluksom, c) utisnuti magneti u površinu rotora, d) rotor sa unutrašnjim magnetima



Sl. 8. Ekvivalentna šema PMSM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

Ekvivalentna šema PMSM u d i q osi predstavljena je na slici 8. Gubici u bakru se modeluju pomoću otpornosti R_s , dok se gubici u gvožđu modeluju pomoću otpornosti R_c . Na osnovu šeme može se napisati sledeći matematički model:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \rho L_d \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_m \end{bmatrix}. \quad (2)$$

gde je $\rho = L_q/L_d$ i:

$$i_{od} = i_d - i_{cd}, i_{oq} = i_q - i_{cq}. \quad (3)$$

$$i_{cd} = -\frac{\omega \rho L_d i_{oq}}{R_c}, i_{cq} = \frac{\omega(\psi_m + L_d i_{od})}{R_c}. \quad (4)$$

Elektromagnetni moment dat je sledećim izrazom:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_m i_{oq} + (1 - \rho) L_d i_{od} i_{oq}). \quad (5)$$

Vidi se da pored osnovnog elektromagnetnog momenta postoji i dodatni reluktantni moment za mašine sa $\rho \neq 1$.

Na osnovu prethodnih jednačina mogu se napisati izrazi koji modeluju gubitke u bakru statora P_{Cu} i gvožđu P_{Fe} :

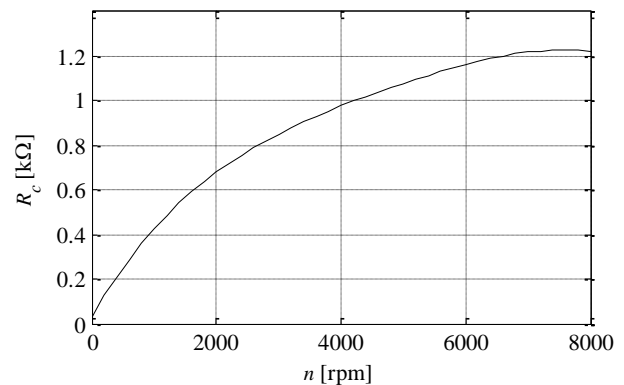
$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s \cdot (i_d^2 + i_q^2). \quad (6)$$

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2). \quad (7)$$

Ukupni gubici koji se mogu kontrolisati predstavljaju zbir gubitaka u bakru i gvožđu:

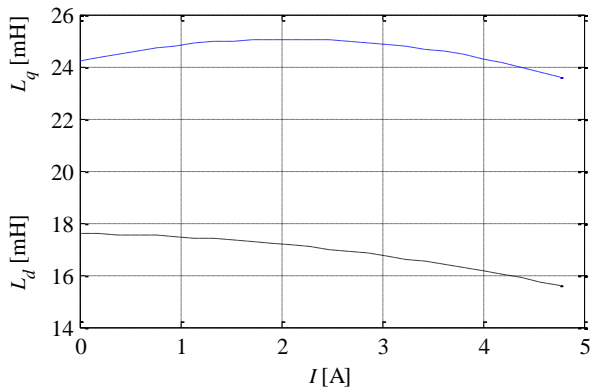
$$P_L = P_{Cu} + P_{Fe}. \quad (9)$$

Gubici u gvožđu SM su uvaženi promenljivim otpornošću R_c . Ova otpornost se značajno menja sa brzinom (frekvencijom), primer dat na slici 9.



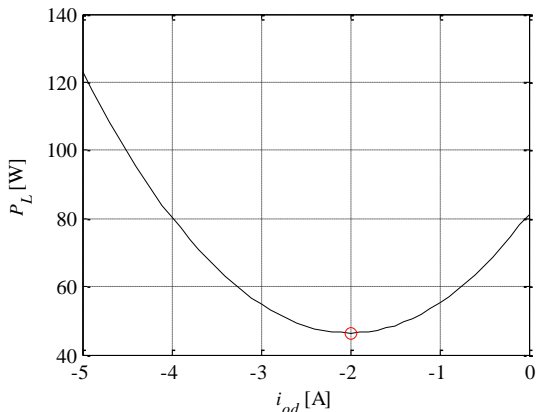
Sl. 9. Primer promene R_c sa brzinom kod PMSM

Model gubitaka SM je tačniji ako se uvaži promena L_d i L_q induktivnosti statora SM sa porastom struje statora. Ove induktivnosti kod SM namenjenih uređajima široke potrošnje sa porastom struje ulaze u zasićenje relativno brzo, kao što je prikazano na slici 10.



Sl. 10. Primer promena L_d i L_q sa strujom kod PMSM

Osnovna ideja optimizacije rada PMSM je da se za svaku brzinu i za svaki momenat opterećenja može naći takav vektor struje statora za koji su gubici minimalni. Na primer, slika 11 prikazuje promenu gubitaka snage sa promenom struje d ose, za jedan moment opterećenja i jednu brzinu. Optimalna vrednost struje q ose (koja u paru sa odabranom d strujom daje minimalne gubitke) se računa na osnovu momenta konverzije. Dakle, zadatak algoritma za optimizaciju rada PMSM je da pronade onaj par d i q struja za koji su gubici minimalni a koji i dalje razvija potreban moment pri trenutnoj brzini rotora.



Sl. 11. Kretanje gubitaka snage PMSM sa promenom struje d ose za brzinu (8000 o/min) i moment opterećenja (0.4Nm)

Metode za pronalaženje optimalne vrednosti struja d i q ose PMSM moraju uzeti u obzir strujne (I_{max}) i naponske (V_{max}) limite invertora i PMSM. Uglavnom, strujni limit je dominantan na malim brzinama dok je naponski limit dominantan na velikim brzinama. Po pitanju naponskog limita, kao rezultat optimizacije rada PMSM su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

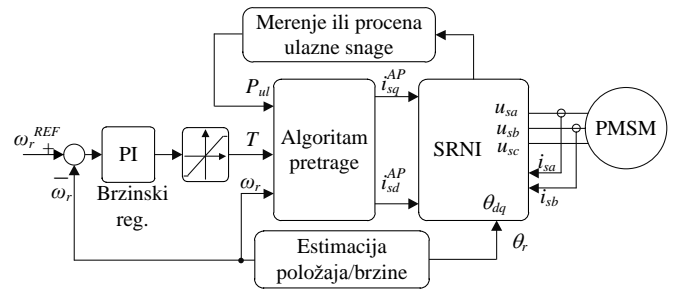
$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max}, \quad (10)$$

$$\left(i_d + \frac{\psi_m}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{L_q}{L_d} i_q\right)^2 \leq \left(\frac{V_{max}}{\omega L_d}\right)^2. \quad (11)$$

3.1. Algoritmi pretrage za uvećanje efikasnosti SM

Algoritmi pretrage u toku rada pogona traže minimum ulazne snage pogona upravljanjem nekim od parametara napajanja SM, uglavnom strujom d ose. Ovi algoritmi konvergiraju ka optimalnom rešenju bez potrebe za detaljnim

poznavanjem parametara pogona. Međutim, problem je njihova brzina konvergencije pri promeni uslova rada kao i moguće oscilacije momenta i brzine u stacionarnom stanju. Iz tih razloga su algoritmi pretrage pogodni samo za primene u kojima ne dolazi do čestih promena opterećenja. Na sl. 12 prikazan je blok dijagram za energetske efikasno upravljanje SM primenom algoritma pretrage. Tokom rada pogona meri se ulazna snaga pretvarača, estimira trenutna brzina rotora i momenat. Na osnovu promene ovih vrednosti algoritam pretrage (AP) podešava strujni vektor statora SM tako da se za date radne uslove smanji ulazna snaga. Referentne struje se dalje vode u strujno regulisan naponski invertor (SRNI).

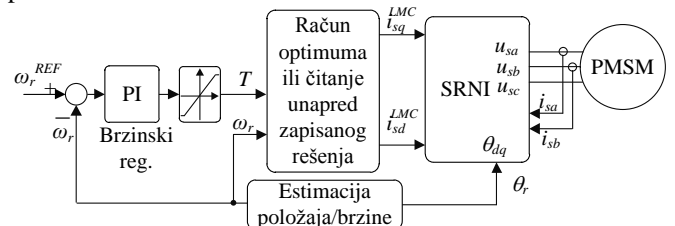


Sl. 12. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom algoritma pretrage

Predloženi algoritmi pretrage su uglavnom namenjeni vektorski upravljanim pogonima [14], [15]. U ovim rešenjima se ulazna snaga meri na osnovu merenih struja i napona jednosmernog medjukola. Uvećanjem negativne vrednosti struje d ose dolazi do povećanja gubitaka u bakru ali i smanjenja gubitaka u gvožđu. Važi i obrnuto. Nakon nekoliko iteracija u promeni d struje algoritam pronalaze minimum snage i optimalnu vrednosti d struje. U [16] je dat sličan algoritam ali pogodan za skalarno upravljanje PMSM. Proračun ulazne snage i AP su slični, jedina je razlika je naponsko napajanje i promena amplitude napona statora, a ne struje d ose.

3.2. Metode za uvećanje efikasnosti SM zasnovane na modelu

Ove metode koriste model motora i pretvarača i za zadate vrednosti brzine i momenta računaju optimalnu vrednost struje d ose, tj. onu koja dovodi do minimuma gubitaka snage. Metode bazirane na modelu brzo konvergiraju, odnosno daju optimalno rešenje, ali su parametarski veoma osetljive. Pošto su modeli SM veoma složeni, obično se optimalne vrednosti d i q struje unapred izračunaju za očekivane radne režime i zapišu u lookup tabele. Ove vrednosti se zatim očitavaju u realnom vremenu u toku rada pogona na osnovu trenutne brzine i opterećenja, kao što je prikazano na slici 13.



Sl. 13. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom metode zasnovane na modelu

Parametri modela gubitaka moraju biti poznati ili po potrebi adaptirani u zavisnosti od uslova rada. Na primer, uvođenjem temperature kao trećeg ulaza moguće je predvideti i promenu otpornosti statora sa temperaturom. Takođe, u model je moguće uključiti i promenu induktivnosti d i q ose sa promenom nivoa zasićenja magnetskog kola, tj. sa promenom nivoa struje d i q ose.

Otpornost R_c kojom su modelovani gubici u gvožđu je najznačajni parametar ovih modela i uvek se menja sa promenom brzine. Ona se može odrediti na osnovu gubitaka u praznom hodu kod kojih je struja statora približno nula i gubici u gvožđu P_{FE} dominantni:

$$R_c = \frac{3 (\omega \Psi_m)^2}{2 P_{Fe}} \quad (12)$$

Prost način minimizacije gubitaka je umanjeње samo jednog od tipa gubitaka. Tako na primer strategija MTPA (*Maximum Torque per Ampers*) zanemaruje gubitke u gvožđu i prostom potragom za maksimum momenta uz istu amplitudu struje statora minimalizuje gubitke u bakru [18]. Ova metoda je popularna za male brzine pri kojima su gubici u gvožđu praktično zanemarljivi. MTPA rešenje ($dT/di_s=0$) za d komponentu vektora statorske struje glasi:

$$i_d^{MTPA} = \frac{\Psi_m - \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \quad (13)$$

dok se optimalna q struja proračunava na osnovu zadate amplitude statorske struje:

$$i_q^{MTPA} = \text{sign}(i_s) \sqrt{i_s^2 - i_d^{MTPA^2}} \quad (14)$$

Ipak, na srednjim i većim brzinama dolazi do porasta gubitaka u gvožđu, tada MTPA strategija nije dovoljna i treba pronaći minimum ukupnih gubitaka.

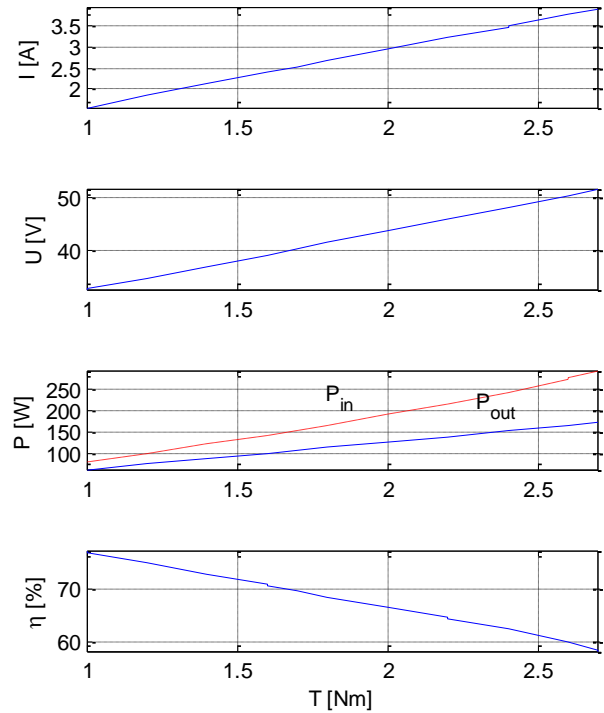
SPMSM ima prost model gubitaka usled $L_d=L_q$ i moguće je njegove ukupne gubitke prikazati analitički u funkciji struje i_{od} , momenta T i brzine ω_r [19]. U tom slučaju je moguće pronaći i analitičko rešenje za optimalnu struju i_{od} :

$$i_{od} = \frac{\omega^2 L_q (R_s + R_c) \Psi_m}{R_s R_c^2 + \omega^2 L_d^2}, \quad (15)$$

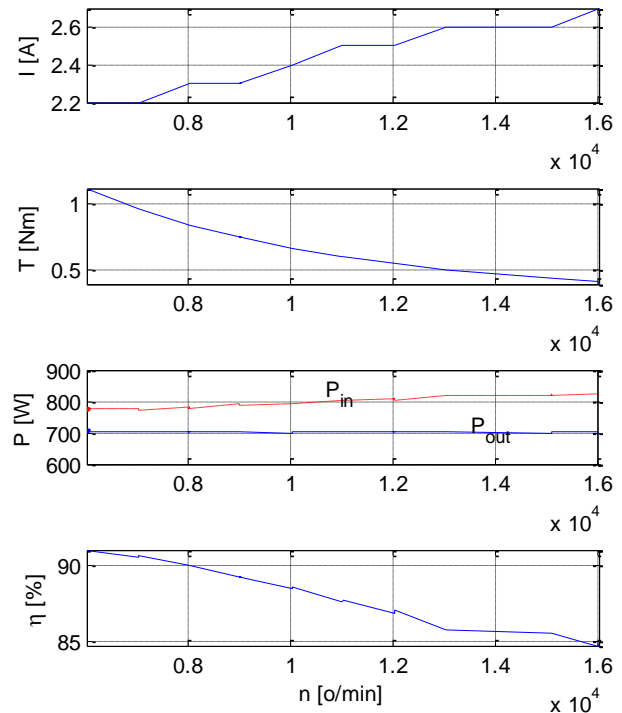
dok se i_{oq} računa na osnovu potrebnog momenta (14).

IPMSM ima složeniji model usled $L_d \neq L_q$ i ne postoji analitičko rešenje za d struju koja dovodi do minimalnih gubitaka. Postoji više načina za rešavanje ovih nelinearnih modela: 1. optimalno rešenje se traži u preseku tangencijalne krive momenta i naponskog limita koji se dobija rešavanjem polinoma četvrtog reda aproksimiranog Tejlorovim redom [20], linearizacijom funkcije prenosa [21], na osnovu metode konačnih elemenata [22], primenom nelinearnog programiranja [24], primenom *fuzzy* logike [25]. Pošto su svi ovi proračuni računarski zahtevni, uglavnom se vrše *offline* i njihovi rezultati se zapisuju u *lookup* tabelu. Tabela optimalnih vrednosti struja se popunjava sa odgovarajućim korakom za širok opseg brzina i momenta, uz odgovarajuća strujna i naponska ograničenja. Pojedini algoritmi uključuju i promenu relevantnih parametara motora. Zapisane optimalne vrednosti struja se očitavaju u toku rada pogona iz *lookup* tabele za trenutni par brzine i momenta, što nije računarski zahtevno a ujedno i omogućuje brzo prilagođenje promenama uslova rada pogona.

Primer ostvarene efikasnosti PMSM ($p = 4$, $R_s = 3.76 \Omega$, $L_d = 14.7\text{mH}$, $L_q = 20.5 \text{mH}$, $\Psi_{PM} = 0.08 \text{Wb}$) u 1kW pogonu opšte namene dat je na slikama 14 i 15.



Sl. 14. Efikasnost PMSM za razna opterećenja na 500 o/min



Sl. 15. Efikasnost PMSM i ostvareni moment na srednjim i velikim brzinama

Ostvarena efikasnost PMSM na malim brzinama obrtanja i raznim opterećenjima (75% – 59%) je znatno veće nego kod sličnog AM (48% – 43%), slika 20. Očigledno je da pri malim brzinama obrtanja SM nema konkurenciju. Sa druge strane, efikasnost PMSM pada sa brzinom i postaje uporediva se efikasnošću AM, što otvara mogućnost izbora između ova dva tipa motora.

4. UVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA OPŠTE NAMENE SA AM

Usled pogodne cene, lake instalacije i robusnog rada, trofazni asinhroni motor se često koristi u pogonima opšte namene, kao što su pumpe, ventilatori, klima uređaji i razni kućni aparati. Kao i u slučaju sinhronog motora, efikasnost AM u zavisnosti od načina kojim se njime upravlja [34]. Dodatni problem kod AM je zavisnosti efikasnosti od opterećenja, ona je relativno velika za veliko opterećenje ali često neprihvatljivo mala za mala opterećenja. Ovo je poseban problem za pogone koji dugo rade rasterećeni ili sa opterećenjem znatno nižim od nominalnog [35].

Model gubitaka AM je predložen u [35] i njegova ekvivalentna šema je prikazana na slici 16. Model je dat za dve ose u rotirajućem dq sistemu osa. Parametri modela su: R_s i L_{ls} su statorska otpornost i induktivnost rasipanja, R_r i L_{lr} su rotorska otpornost i induktivnost rasipanja, s je klizanje, R_m je ekvivalentna otpornost magnetnog kola koja modeluje gubitke u gvožđu i L_m je induktivnost magnećenja.

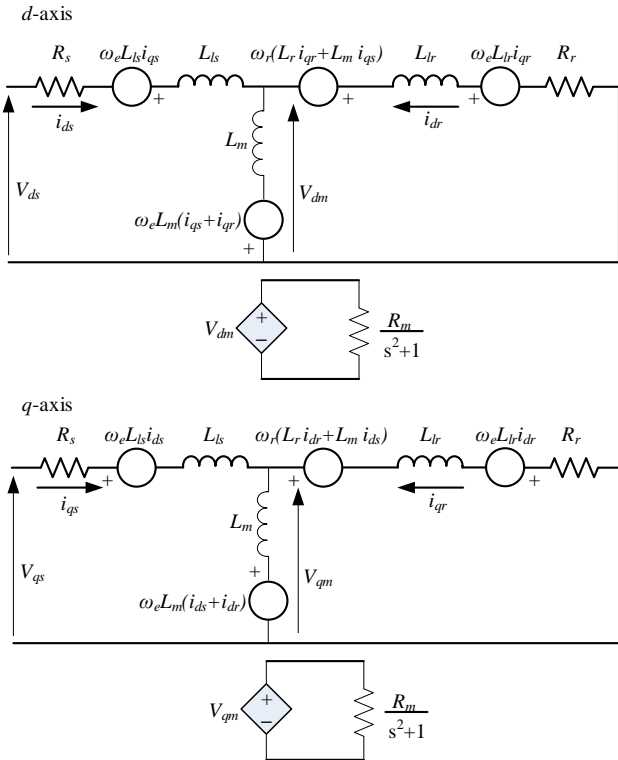
Naponske jednačine za statorsko i rotorsko kolo asinhronog motora glase:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ls} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_{ls} i_{qs} + V_{dm} \quad (16)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_{ls} i_{ds} + V_{qm} \quad (17)$$

$$0 = R_r i_{dr} + L_{lr} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) - \omega_e L_{lr} i_{qr} + V_{dm} \quad (18)$$

$$0 = R_r i_{qr} + L_{lr} \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) + \omega_e L_{lr} i_{dr} + V_{qm} \quad (19)$$



Sl. 16. Ekvivalentna šema AM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

Takođe važi,

$$i_{ds} + i_{dr} = V_{dm} \frac{s^2 + 1}{R_m} + i_{dm} \quad (20)$$

$$i_{qs} + i_{qr} = V_{qm} \frac{s^2 + 1}{R_m} + i_{qm} \quad (21)$$

gde su V_{dm} i V_{qm} naponi na magnetizacionoj grani

$$V_{dm} = L_m \frac{d(i_{ds} + i_{dr})}{dt} - \omega_e L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (22)$$

$$V_{qm} = L_m \frac{d(i_{qs} + i_{qr})}{dt} - \omega_e L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (23)$$

V_{ds} i V_{qs} su komponente vektora statorskog napona u d i q osi, i_{ds} i i_{qs} su komponente statorske struje, i_{dm} i i_{qm} su komponente vektora magnetizacione struje koja teče kroz induktivnost magnećenja.

Konačno, jednačine fluksnih buhvatva AM glase:

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (24)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (25)$$

Ukoliko se koristi dq sistem orijentisan prema vektoru fluksa rotora rotorski fluks u q osi postaje nula i u stacionarnom stanju se dobija:

$$V_{dm} = -\omega_e \frac{L_m L_{lr}}{L_r} i_{qs} \quad (26)$$

$$V_{qm} = \omega_e \frac{L_m}{L_r} (L_{lr} i_{ds} + \psi_{dr}) = \omega_e L_m i_{ds} \quad (27)$$

Ukupni gubici AM su zbir gubitaka u bakru i gvožđu statora i rotora. Statorski i rotorski gubici u bakru se računaju na osnovu odgovarajućih struja i otpornosti. Gubici u gvožđu statora se mogu izračunati na osnovu magnetne otpornosti i napona na induktivnosti magnećenja. Pošto je pri normalnom režimu rada klizanje tj. frekvencija rotora relativno niska, gubici u gvožđu rotora se mogu zanemariti. Na osnovu svega pomenutog, ukupni električni gubici u AM iznose:

$$\begin{aligned} P_{loss} &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{1}{R_m} (V_{dm}^2 + V_{qm}^2) \\ &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^2 \\ &\quad + \frac{1}{R_m} \left(\omega_e^2 L_m^2 \left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 i_{qs}^2 + \omega_e^2 L_m^2 i_{ds}^2 \right) \\ &= i_{ds}^2 \left(R_s + \frac{\omega_e^2 L_m^2}{R_m} \right) + i_{qs}^2 \left(R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} + \frac{\omega_e^2 L_m^2 L_{lr}^2}{R_m L_r^2} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

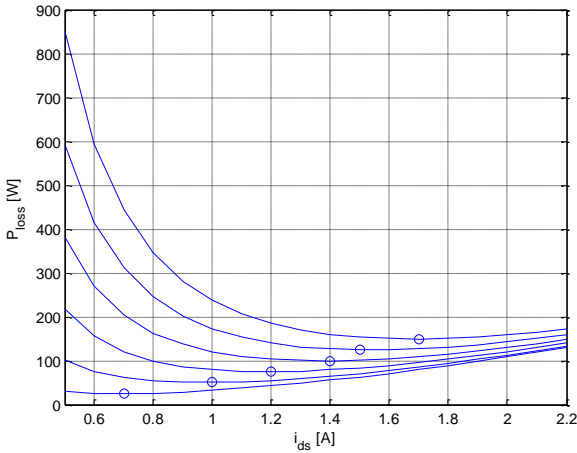
Momenat koji razvija AM u stacionarnom stanju iznosi:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (29)$$

Ukupni električni gubici asinhronog motora P_{loss} se mogu izraziti u funkciji struje d ose i_{sd} , momenta opterećenja T i brzine rotora ω :

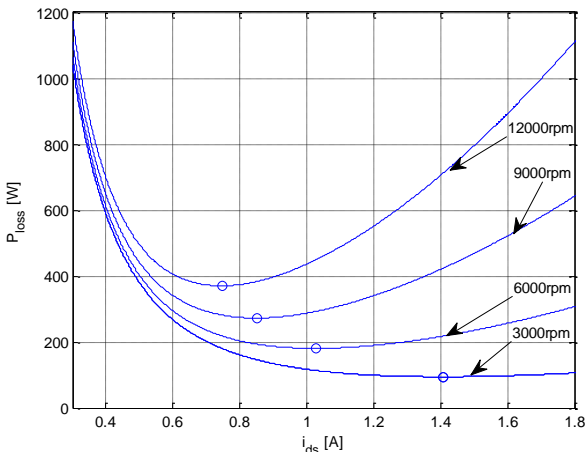
$$P_{\text{loss}} = f(i_{sd}, T, \omega). \quad (30)$$

Slika 17 pokazuje promenu ukupnih gubitaka AM sa promenom struje magnećenja, za konstantnu brzinu rotora od 3200 o/min i pri raznim momentima opterećenja. Slika pokazuje da za svako opterećenje postoji optimalna vrednost d komponente struje statora za koju se dobijaju minimalni ukupni gubici. Ukoliko se izabere vrednost d struje koja je manja od optimalne AM nema dovoljno fluksa i potrebna je velika struja q ose da bi se ostvario potreban momenat. Time se dobija velika vrednost amplitude struje statora i nepotrebno rastu gubici u bakru. Sa druge strane, ukoliko se izabere veća vrednost struje d ose, dobija se prevelika vrednost fluksa i napon statora AM. U tom slučaju nepotrebno rastu gubici u gvožđu.



Sl. 17. Promena ukupnih gubitaka AM sa promenom d struje za razna opterećenja na 3200 o/min

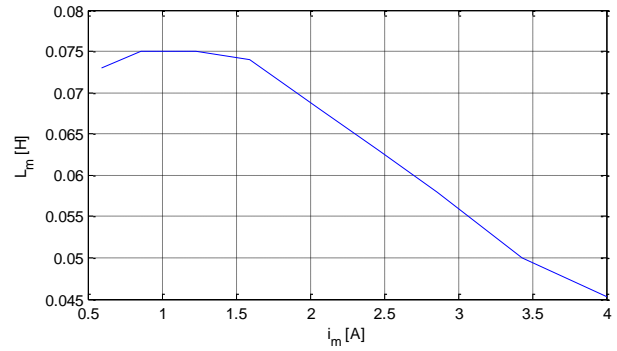
Slika 18 pokazuje promenu ukupnih gubitaka sa promenom struje magnećenja, ali pri konstantnom opterećenju od 1Nm i za više brzina rotora. I ova slika pokazuje da za svaki par brzine i opterećenja postoji optimalna vrednost fluksa statora na koju treba podesiti pogon da bi radio sa minimalnim gubicima.



Sl. 18. Promena ukupnih gubitaka AM sa promenom d struje za opterećenja od 1Nm i razne brzine obrtanja rotora

Prilikom optimizacije gubitaka AM važno je uvažiti efekat zasićenja magnetnog kola i korigovati vrednost induktivnosti magnećenja L_m korišćenu u modelu sa promenom struje

magnećenja. Promena L_m se može izmeriti standardnim testom praznog hoda, primer rezultata dat na slici 19.



Sl. 19. Zavisnost induktivnosti magnećenja od struje d ose

Metoda za pronalaženje optimalne vrednosti struja d i q ose pored samog modela mora uzeti u obzir u strujne (I_{max}) i naponske (V_{max}) limite invertora i AM. Slično kao i kod SM, strujni limit je dominantan na malim brzinama, dok je naponski limit dominantan na velikim brzinama. Po pitanju naponskog limita, kao rezultat optimizacije su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

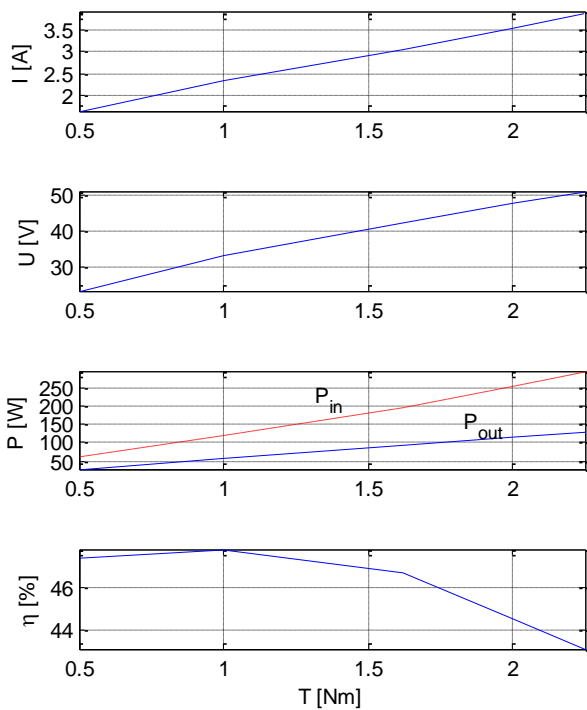
$$(\omega_e L_s i_{ds})^2 + (\omega_e \sigma L_s i_{qs})^2 \leq V_{\text{max}}^2. \quad (31)$$

gde je $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$, $V_{\text{max}} = V_{DC} / \sqrt{3}$ i V_{DC} je napon međukola invertora. Po pitanju strujnog limita, kao rezultat optimizacije su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

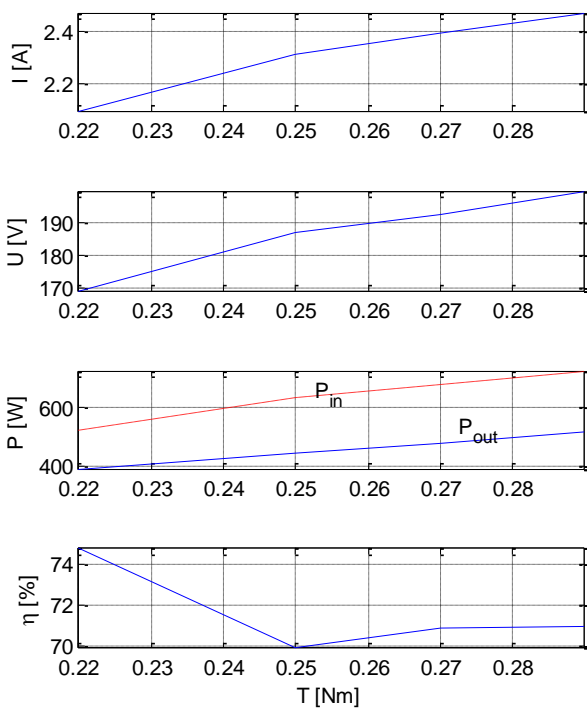
$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{\text{max}}^2. \quad (32)$$

U literaturi su predložene razne metode za minimizaciju gubitaka asinhronog motora. Te metode su u suštini slične metodama za minimizaciju gubitaka snage sinhronog motora i mogu se svesti u iste dve podgrupe: algoritmi pretrage (*the search controller*) i metode zasnovane na modelu (*the loss model controller*). Slično kao kod SM, algoritmi pretrage [28]–[32] računaju ulaznu snagu i promenom struje d ose traže minimalnu vrednost snage za date uslove rada. Prednost i mane algoritama pretrage kod AM su slične kao i kod SM, konvergencija algoritma je nezavisna od parametara ali algoritam se sporo adaptira na promenu opterećenja i/ili izaziva varijacije u ostvarenom fluksu, momentu i brzini. Metode minimizacije gubitaka AM zasnovane na modelu [33]–[38] zahtevaju poznavanje parametara modela AM i po potrebi praćenje njihove promene. Kao i kod SM, metode bazirane na modelu često koriste *lookup* tabele sa unapred upisanim rezultatima. Time se ne opterećuje procesorsko vreme kontrolera pogona. Konačno, isto kao i kod SM, ove metode se praktično trenutno adaptiraju promeni opterećenja ili brzine.

Primeri ostvarene efikasnosti za AM ($R_s = 3.17 \Omega$, $R_r = 1.04 \Omega$, $X_m = 8.11 \Omega$, $X_s = 0.398 \Omega$, $X_r = 0.391 \Omega$, $R_c = 324.6 \Omega$, $f = 20.9$ Hz) koji je namenjen 1kW pogonu opšte namene prikazani su na slikama 20 i 21.



Sl. 20. Efikasnost AM sa promenom opterećenja na brzini rotora 540 o/min



Sl. 21. Efikasnost AM sa promenom opterećenja na brzini rotora 16980 o/min

Iz ostvarenih rezultata je jasno da AM ima izuzetno malu efikasnost na malim brzinama i da u tom režimu rada ne može da konkuriše PMSM. Sa druge strane, efikasnost AM raste sa promenom brzine tako da za relativno velike brzine postaje uporediva sa efikasnošću PMSM.

5. ZAKLJUČAK

U radu su opisani savremeni trendovi u razvoju elektromotornih pogona u uređajima namenjenim za široku potrošnju. Da bi jedan ovakav pogon opstao na globalnom

tržištu, mora da pomiri više oprečnih zahteva. Osnovni cilj su minimalna cena, mogućnost masovne proizvodnje i laka ugradnja pogona. Ali, od modernih pogona ovog tipa se zahteva i sigurnost, robusan rad i prolagođenje ekstremnim ekskurzijama parametara motora i napojne mreže. U savremene pogone opšte namene se danas već ugrađuju i neki od mehanizama za uvećanje efikasnosti, često prosti algoritmi pretrage ali i složeniji algoritmi bazirani na modelu. U radu su opisani najznačajni algoritmi za uvećanje efikasnosti ovih pogona, i diskutovane njihove prednosti i mane. Autori smatraju da su za uvećanje efikasnosti pogona opšte namene pogodniji algoritmi pretrage. Motori i pretvarači primenjeni u ovim pogonima se dizajniraju uz minimalni utrošak materijala što izaziva značajne ekskurzije parametara u toku jednog radnog ciklusa. Dodatno, motori za ove pogone se proizvode u masovnim serijama uz minimalnu kontrolu izrade, uz očekivanu veliku varijaciju inicijalnih parametara. Sve ovo čini bilo koji usvojeni model AM/SM neadekvatnim za uvećanje efikasnosti i ozbiljno ograničava upotrebu metoda baziranih na modelu u pogonima opšte namene.

Iz rada je očigledno da se borba za tržište pogona opšte namene između kaveznog asinhronog i sinhronog motora sa permanentnim magnetima nastavlja. Prednost asinhronog motora je olakšan rad bez skupog senzora položaja, dok sinhroni motori imaju bolju efikasnost sve do ulaska u režim slabljenja polja. Energetska efikasnost daje blagi vetar u leđa sinhronom motoru i čini se da oni polako osvajaju ovo tržište. Dalji prodor sinhronog motora u jeftinije *sensorless* pogone široke potrošnje ograničava njihov nesigurni start pri velikom opterećenjima, problem demagnetizacije i rad na velikim brzinama, kao i problem sigurnog zaustavljanja u slučaju kvara.

6. LITERATURA

- [1] Aengus Murray, Marco Palma and Ali Husain, "Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors and Controlled Induction Motors in Washing Machine Applications using Sensorless Field Oriented Control", Energy Saving Products Division International Rectifier El Segundo, CA 90245.
- [2] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 5, pp. 1054–1061, Sep./Oct. 1992.
- [3] D. P. Marčetić, S. N. Vukosavić, "Speed Sensorless AC Drives with the Rotor Time Constant Parameter Update," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 5, pp. 2618-2625, Oct 2007.
- [4] D. P. Marcetic, I. R. Krcmar, M. A. Gecic, and P. R. Matic, "Discrete rotor flux and speed estimators for high speed shaft-sensorless IM drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 6, pp. 3099–3108, Jun. 2014.
- [5] J.S.V.S. Kumar, P.S. Kumar, M.Rambabu, —Model reference adaptive controller-based speed and q-axis inductance estimation for Permanent Magnet Synchronous Motor drive by utilizing reactive power, International Conf. on Energy, Automation, and Signal, pp. 1- 6, 2011.

- [6] H. Kubota et al., "Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 4, pp. 1081–1086, Jul./Aug. 2002.
- [7] S. Suwankawin and S. Sangwongwanich, "Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction-motor drives—Tracking performance and stabilization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 1, pp. 96–119, Feb. 2006.
- [8] Y.-S. Jeong, R. D. Lorenz, T. M. Jahns and S.-K. Sul, "Initial Rotor Position Estimation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine using Carrier-Frequency Injection Methods," *IEEE Intern. Electric Machines a. Drives Conf. IEMDC*, Madison, WI, June 1-4, 2003, pp. 1218–1223; later in *IEEE Trans. Industry Appl.*, Vol. 41, No. 1, Jan./Feb. 2005, pp. 38-45.
- [9] Y. Li, Z. Q. Zhu, D. Howe, C.M. Bingham, and D. Stone, "Improved rotor position estimation by signal injection in brushless AC motors, accounting for cross-coupling magnetic saturation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1843–1849, Sep./Oct. 2009.
- [10] Darko P. Marcetic, Roberto M. Varga and Mile B. Bozic, "IPMSM model including magnetic saturation and cross-coupling", *International symposium on Power Electronic*, Novi Sad, Oct. 2011.
- [11] Hongrae Kim, Thomas M. Jahns, "Phase Current Reconstruction for AC Motor Drives Using a DC Link Single Current Sensor and Measurement Voltage Vectors", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1413–1419, Sept. 2006.
- [12] Woo-Cheol Lee, Dong-Seok Hyun, Taek-Kie Lee, "A Novel Control Method for Three-Phase PWM Rectifiers Using a Single Current Sensor", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 5, pp. 861–870, Sept. 2000.
- [13] D. Marcetic and E. Adzic, "Improved three-phase current reconstruction for induction motor drives with dc-link shunt", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp.2454 -2462, 2010.
- [14] Zhu, Z.Q.; Gong, L.M., "Improved sensorless operation of permanent magnet brushless AC motors based on online optimal efficiency control," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011 *IEEE International*, vol., no., pp.1591,1596, 15-18 May 2011
- [15] Vaez, S.; John, V.I.; Rahman, M.A., "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.14, no.4, pp.1435,1440, Dec 1999
- [16] Chan, C.C.; Chau, K.T., "An advanced permanent magnet motor drive system for battery-powered electric vehicles," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.45, no.1, pp.180,188, Feb 1996
- [17] Bojoi, R.; Pastorelli, M.; Bottomley, J.; Giangrande, P.; Gerada, C., "Sensorless control of PM motor drives — A technology status review," *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2013 *IEEE Workshop on*, vol., no., pp.168,182, 11-12 March 2013
- [18] Jang-Mok Kim; Seung-Ki Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.33, no.1, pp.43,48, Jan/Feb 1997
- [19] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hirasa, T., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.41, no.5, pp.511,517, Oct 1994
- [20] Sung-Yoon Jung; Jinseok Hong; Kwanghee Nam, "Copper loss minimizing torque control of IPMSM based on flux variables," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.1174,1179, 12-15 May 2013
- [21] Patel, B.; Uddin, M.N., "Development of a nonlinear loss minimization control of an IPMSM drive with flux estimation," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.1196,1203, 12-15 May 2013
- [22] Aorith, H.; Wang, J.; Lazari, P., "A new Loss Minimization Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine drives," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.526,533, 12-15 May 2013
- [23] Botan, C.; Ratoi, M.; Ostafi, F.; Horga, V., "Minimum energy control of servo drive systems with PMSM," *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2010 *International Symposium on*, vol., no., pp.19,23, 14-16 June 2010
- [24] Rabiei, A.; Thiringer, T.; Lindberg, J., "Maximizing the energy efficiency of a PMSM for vehicular applications using an iron loss accounting optimization based on nonlinear programming," *Electrical Machines (ICEM)*, 2012 *XXth International Conference on*, vol., no., pp.1001,1007, 2-5 Sept. 2012
- [25] Zhou, Guangxu ; Ahn, Jin-Woo, "A Novel Efficiency Optimization Strategy of IPMSM for Pump Applications," *Journal of electrical engineering & technology*, vol. 4, no. 4, pp. 515-520, 2009
- [26] Vaez, S.; John, V.I.; Rahman, M.A., "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.14, no.4, pp.1435,1440, Dec 1999
- [27] Junggi Lee; Kwanghee Nam; Seoho Choi; Soonwoo Kwon, "Loss-Minimizing Control of PMSM With the Use of Polynomial Approximations," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.4, pp.1071,1082, April 2009
- [28] M. Waheeda Beevi, A. Sukesh Kumar, H.S. Sabin, "Loss minimization of vector controlled induction motor drive using genetic Algorithm," *Green Technologies (ICGT)*, 2012 *International Conference on*, vol., no., pp.251,257, 18-20 Dec. 2012
- [29] M. N. Uddin, and Sang Woo Nam, "New Online Loss-Minimization- Based Control of an Induction Motor Drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 926-933, March 2008.

- [30] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "A fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, pp. 192-198, Apr. 1995.
- [31] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in scalar controlled Induction motor drives with search controllers", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.11, no.2, pp. 213-220, Mar. 1996.
- [32] Jingchuan Li, Longya Xu, Zheng Zhang, "A New Efficiency Optimization Method on Vector Control of Induction Motors," Electric Machines and Drives," 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1995,2001, 15-15 May 2005
- [33] Cao-Minh Ta and Y. Hori, "Convergence improvement of efficiency optimization control of induction motor drives", IEEE Trans, Ind Appl. , vol.37, no.6, pp. 1746-1753, Nov / Dec 2001.
- [34] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in Induction motor adjustable speed drives", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.43, no.1, pp. 226-231, Feb 1996.
- [35] S. Lim and K. Nam, "Loss-minimising control scheme for induction motors," Electric Power Applications, IEE Proceedings - , vol.151, no.4, pp.385-397, 7 July 2004
- [36] C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and Pramod Agarwal, "Energy efficient control of three-phase Induction motor - a review", International Journal of Computer and Elect. Engg., vol. 1, no.1, pp. 61-70, Apr 2009.
- [37] D.S. Krischen and D. W. Novotny, "On-line efficiency optimization of a variable frequency Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.1A-21, no.4, pp. 610-616, May/June 1985.
- [38] P. Famouri and J. J. Cathey, "Loss minimization control of an Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.27, no.1, pp. 32-37, Jan/Feb 1991.

ZAHVALNICA

Rad je delimično sponzorisan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta III 042004 i od strane Pokrajinskog sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj AP Vojvodine, u okviru projekta 114-451-3508/2013-04.

Abstract – The paper deals with the trends in the development of consumer drives with AC motors, both three phase squirrel cage induction motor and three phase synchronous motor with permanent magnets on the rotor. First, different solutions which lead to relatively cheap and mass production ready general purpose drive are described. Then, the safety of operation and robustness of consumer drives during significant excursions of motor parameters and power supply are discussed. Finally, special attention is paid to methods for improving energy efficiency of consumer drives with both induction motor and permanent magnet synchronous motor. These methods are broadly classified into two basic groups: model based method and search algorithm. Examples of achieved energy efficiency of both motor type in one classical applications are presented.

RECENT DEVELOPMENTS OF ENERGY EFFICIENT CONSUMER ELECTRICAL DRIVES

Darko Marčetić, Marko Gecić