

PREGLED METODA ZA OPTIMIZACIJU GUBITAKA SINHRONIH MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA

Marko Gecić, Darko Marčetić, Vladimir Katić, Đura Oros, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*
Petar Matić, *Elektrotehnički fakultet u Banja Luci*

Sadržaj – U ovom radu su opisane metode za optimizaciju gubitaka snage pogona sa sinhronim motorima sa stalnim magnetima na rotoru. Sinhroni motori sa stalnim magnetima zbog svoje velike efikasnosti sve češće zamenjuju asinhronne motore i motore jednosmerne struje. Energetska efikasnost ovih motora se može dodatno uvećati optimalnim upravljanjem. Kao rezultat optimalnog upravljanja je vektor struje ili napona statora koji za date uslove rada pogona (brzina i opterećenje) daje maksimalnu efikasnost. Rad daje pregled metoda za optimizaciju gubitaka i razdvaja ih u dve osnovne grupe. Prva grupa su metode koje se baziraju na algoritmima pretrage dok u drugu grupu spadaju metode koje su zasnovane na modelu procesa. Tokom pregleda su diskutovane prednosti i mane obe grupe metoda.

1. UVOD

U današnje vreme potreba za energetske efikasnim elektromotornim pogonima je sve veća. Skoro dve trećine proizvedene električne energije, u razvijenim industrijskim zemljama, se pretvara u mehaničku. Usled ove konverzije nastaju gubici koje je potrebno optimizovati [1]. Veći udeo u instalisanim elektromotornim pogonima promenljive brzine čine asinhroni motori, ali sve češće se koriste sinhroni motori sa stalnim magnetima, zbog svojih povoljnih karakteristika kao što su velika gustina snage, visoka efikasnost, brz odziv, dobar prenos toplote i sl. Uvođenjem energetske efikasnijih električnih mašina, a i samih pogona, može se smanjiti potrošnja. Smanjenjem potrošnje značajno bi se redukovala potreba za novim elektranama, emisija CO₂, a samim tim sačuvao kapital i resursi.

Sinhronne mašine sa stalnim magnetima danas nalaze veliku primenu u hibridnim i električnim vozilima, raznim servopogonima, kućnim aparatima [2]. Često se ovi pogoni napajaju pomoću baterija, pa poboljšanje energetske efikasnosti ima veliki prioritet [3], [8]. Pored modelovanja i izrade električnih mašina sa povećanom efikasnošću razvoj energetske elektronike i digitalnog upravljanja doprinosi dodatnoj optimizaciji gubitaka. 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. Gubici u gvožđu se sastoje od gubitaka usled histerezisa i gubitaka usled vihornih struja. Mehanički gubici se ne mogu kontrolisati i zavisi su od brzine obrtanja rotora, dok se gubici u bakru i gvožđu mogu kontrolisati odgovarajućim upravljanjem. Gubici u bakru mogu se smanjiti pomoću strategije kojom se ostvaruje maksimalni mogući momenat za zadatak amplitudu vektora struje statora (eng. MTPA – *Maximum Torque per Ampers*). Gubici u gvožđu mogu se smanjiti smanjenjem fluksa u vazдушnom zazoru [5]. Konvencionalna metoda upravljanja sinhronim motorima sa stalnim magnetima je postavljanje

direktno komponente vektora struje statora na nulu. Korišćenjem konvencionalne metode nije moguća kontrola fluksa u vazдушnom zazoru, a samim tim ni efikasnost motora nije optimalna. Proteklih godina razvijeno je dosta metoda za optimizaciju gubitaka u regulisanim elektromotornim pogonima sa sinhronim mašinama sa stalnim magnetima. Ove metode se mogu podeliti u dve osnovne grupe: metode zasnovane na algoritmima pretrage [1]-[3] i metode zasnovane na modelu [5]-[14]. Prva grupa metoda je nezavisna od modela motora i uključuje gubitke u invertoru, ali u nekim slučajevima, u stacionarnom stanju, dovodi do pojave ripla u momentu. Kod druge grupe modeluju se gubici i potrebno je poznavati parametre motora (i pretvarača) tokom upravljanja pogonom.

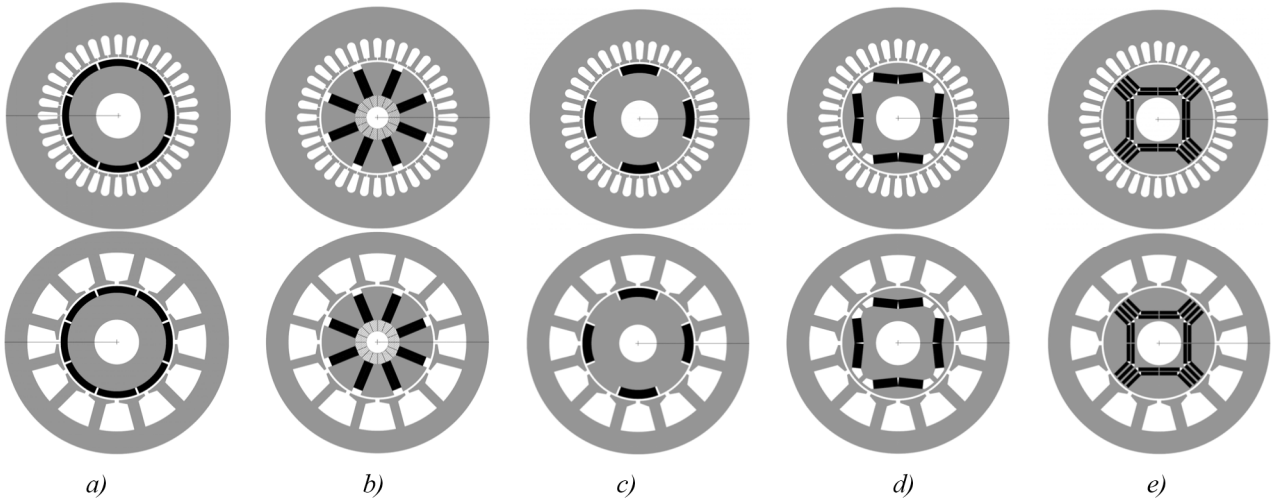
U drugom poglavlju rada predstavljena je podela sinhronih mašina sa stalnim magnetima na osnovu postavljanja magneta na rotor, dat je matematički model i opisani gubici u mašini. Treće poglavlje predstavlja pregled metoda za optimizaciju gubitaka zasnovanih na algoritmima pretrage, dok je u četvrtom delu dat pregled metoda zasnovanih na modelu procesa.

2. SINHRONE MAŠINE

Stator sinhronog motora je po konstrukciji istovetan statoru asinhronne mašine, tj. ima trofazni namotaj, dok se na rotoru nalaze stalni magneti. Postavljanjem stalnih magneta na rotor umesto namotaja, kao u slučaju asinhronog motora, smanjeni su gubici u bakru mašine, a samim tim i odvođenje toplote je znatno efikasnije. U radu će se posmatrati sinhronne mašine kod kojih je statorski namotaj konstruisan tako da indukovana elektromotorna sila ima sinusoidalni oblik (eng. *Permanent Magnet Synchronous Machine* - PMSM).

Za izradu stalnih magneta potrebno je koristiti materijale koji stvaraju veliku remanentnu indukciju i veliko koercitivno polje. Magnetni materijali se mogu podeliti u klasične i moderne. U klasične spadaju anlico i feritni materijali, dok se u moderne svrstavaju samarijum-kobalt i neodijum-gvožđe-bor. Način ugradnje magneta ima veliki uticaj na parametre mašine i njene eksploatacione karakteristike. U zavisnosti od načina ugradnje magneta značajno se menja magnetska otpornost, a samim tim i induktivnost statora.

Ukoliko se posmatra PMSM za rad sa trofaznim sistemom naizmeničnih napona i struja na statoru postoje tri namotaja, tj. tri faze. Provodnici koji čine namotaj mogu biti koncentrisani u dva naspramna žleba i tada se radi o koncentrisanom namotaju. Ukoliko se namotaji izvode tako da se provodnici polažu u veći broj žlebova reč je o raspodeljenom namotaju. Sinhronne mašine koje na statoru imaju koncentrisan namotaj su jeftinije u odnosu na one sa distribuiranim namotajem i veoma su popularne u uređajima za kućnu upotrebu.



Sl. 1. Vrste sinhronih motora sa stalnim magnetima: a) površinski postavljeni magneti (Surface Mounted PM), b) motori sa koncentrisanim fluksom, c) utisnuti magneti u površinu rotora (Inset PM), d) jednoslojni unutrašnji magneti (Internal PM), e) višeslojni unutrašnji magneti

Na slici 1 prikazane su vrste PMSM s obzirom na način postavljanja stalnih magneta na rotor. U gornjem redu nalaze se mašine kod kojih je namotaj na statoru raspodeljen, dok se u donjem redu nalaze mašine sa koncentrisanim namotajem na statoru. PMSM sa površinski postavljenim magnetima (Surface PMSM) imaju izotropan rotor, što znači da su induktivnosti po podužnoj (d) i poprečnoj (q) osi približno jednake ($L_d \approx L_q$), slika 1a. Induktivnost statora SPMSM je mala pa je moguća brza promena statorske struje, a samim tim i momenta. Pored ove konstrukcije postoje i druge koje su napravljene tako da rotor ima magnetnu anizotropiju. Rotor sa koncentrisanim fluksom (Sl.1b) i rotor sa utisnutim magnetima u površinu magnetskog kola (Sl.1c) ima umerenu magnetsku anizotropiju, dok rotor sa unutrašnjom montažom (Sl.1d i Sl.1e) magneta (eng. *Interior PMSM*) karakteriše velika magnetska anizotropija. Ovakvom konstrukcijom značajno se umanjuje količina gvožđa u d osi što čini da je induktivnost L_d mnogo manja od induktivnosti L_q ($L_d \ll L_q$). Takođe, postoji značajna zavisnost induktivnosti statora od ugla rotora koja dovodi do pojave reluktantnog momenta [4].

Ekvivalentna šema PMSM u d i q osi predstavljena je na slici 2. Gubici u bakru modeluju se pomoću otpornosti R_s , dok se gubici u gvožđu mogu modelovati na više načina. Jedan od načina je pomoću otpornosti R_c . Na osnovu ekvivalentne 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 izrazem:

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

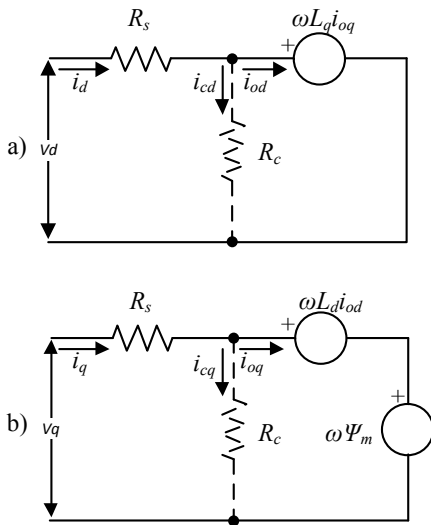
Vidi se da pored osnovnog postoji i dodatni reluktantni moment za mašine sa $\rho \neq 1$.

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

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

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

Mehanički gubici mogu se predstaviti sledećim izrazom:



Sl. 2. Ekvivalentna šema PMSM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

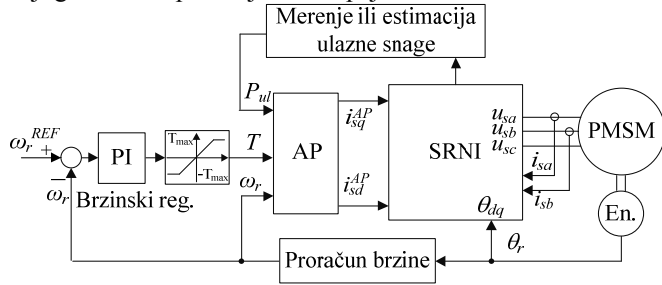
$$P_{mec} = \omega_r T_{mech}. \quad (8)$$

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

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

3. ALGORITMI PRETRAGE

Kod algoritama pretrage ulazna snaga se meri, a zatim se promenom neke veličine u sistemu ona smanjuje, tj. traži se minimalna vrednost. Prilikom optimizacije potreban uslov je da izlazna snaga bude konstantna. Algoritmi pretrage se najčešće koriste u stacionarnom stanju, ali postoji mogućnost kombinovanja sa metodama zasnovanim na modelu tokom prelaznih procesa. Na sl. 3 prikazan je blok dijagram uopštenog optimizovanog upravljanja PMSM primenom algoritma pretrage. Pozicija rotora se meri enkoderom, a zatim se računa brzina rotora. Ukoliko se, zbog cene, ne koristi enkoder poziciju je moguće estimirati. Tokom rada sistema meri se (ili estimira) ulazna snaga pretvarača i ona se pored trenutne brzine rotora i referentnog momenta prosleđuje u algoritam pretrage (AP). Na osnovu metode implementirane u AP dobijaju se referentne struje koje se dalje vode u blok strujno regulisan naponski inverter (SRNI) koji generiše napon kojim se napaja PMSM.



Sl. 3. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom algoritma pretrage

Autori u [1] na osnovu merenih struja i napona jednosmernog međukola estimiraju ulaznu snagu, i u stacionarnom stanju pomoću algoritma pretrage traže optimalnu i_d struju. Algoritam počinje proverom da li je motor u stacionarnom stanju. Ukoliko nije dostignuto stacionarno stanje pretraga se zaustavlja, a ukoliko jeste u određenom broju ciklusa menja se struja i_d sa zadatim inkrementom i računa aktivna snaga. Kada se pronadje minimalna aktivna snaga generiše se referentni vektor struje statora koji odgovara tom slučaju.

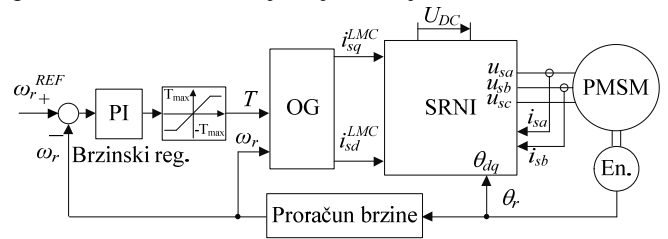
Adaptivni algoritam za *on-line* optimizaciju gubitaka IPMSM predstavljen je u radu [2]. Algoritam radi samo u stacionarnom stanju. Ulazi u adaptivni algoritam su ulazna snaga i greška u zadatoj i ostvarenoj brzini, dok se izlaz koristi kao korekcija d komponente vektora struje statora kako bi se ostvarila minimalna ulazna snaga. Na osnovu greške brzine detektuje se stacionarno stanje i tada startuje algoritam. Menja se struja u d osi sa određenim inkrementom kako bi se pronašla minimalna ulazna snaga, a istovremeno se koriguje i brzinski regulator kako bi se virtuelno očuvala zadata brzina i moment.

Autori su u [3] predstavili algoritam pogodan za skalarno upravljanje PMSM u pogonu električnih vozila koje se napaju iz baterije. Za proračun ulazne snage koristi se struja i napon jednosmernog kola. Promenom izlaznog napona traži

se minimalna ulazna snaga. Eksperimentalno je pokazano da je ovaj jednostavni algoritam pretrage pogodan za mala električna vozila.

4. METODE ZASNOVANE NA MODELU

Kod metoda zasnovanih na modelu potrebno je modelovati gubitke u motoru i pretvaraču, a zatim koristiti ovaj model prilikom optimizacije. Parametri moraju biti poznati, a u većini slučajeva potrebno je uvažiti i uticaj zasićenja magnetskog kola. Na sl. 4 prikazan je blok dijagram algoritma optimalnog upravljanja PMSM pomoću metoda zasnovanim na modelu. Pozicija i brzina rotora se mere pomoću enkodera ili estimiraju. Izlaz brzinskog regulatora je moment potreban da se ostvari zadata brzina. Na osnovu trenutne brzine i potrebnog momenta blok za optimizaciju gubitaka (OG) na osnovu modela generiše optimalne referentne struje koje se dalje vode na SRNI.



Sl. 4. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom metode zasnovane na modelu

Otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu se menja sa promenom brzine. Dominantni gubici u praznom hodu su gubici u gvožđu i na osnovu merenja tih gubitaka može se izračunati otpornost R_c na osnovu sledećeg izraza [11]:

$$R_c = \frac{3 (\omega \Psi_m)^2}{2 P_{Fe}}. \quad (10)$$

Pomoću strategije kojom se ostvaruje maksimalni mogući moment za zadatu amplitudu vektora struje statora (eng. MTPA – *Maximum Torque per Ampers*) moguće je smanjiti gubitke u bakru IPMSM [5]. MTPA daje maksimum momenta tj. rezultat je izjednačavanja prvog izvoda momenta po amplitudi statorske struje sa nulom:

$$\frac{dT}{di_s} = 0, \text{ uz } |i_s| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (11)$$

Rešenje (11) po d komponenti vektora statorske struje je rešenje koje daje najveći momenat:

$$i_d^{MTPA} = \frac{\Psi_m - \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \quad (12)$$

Optimalna struja q komponente vektora statorske struje se proračunava na osnovu zadate amplitude statorske struje i izračunate optimalne vrednosti d struje, uz rekonstrukciju znaka komande momenta:

$$i_q^{MTPA} = \text{sign}(i_s) \sqrt{i_s^2 - i_d^{MTPA^2}} \quad (13)$$

Jedno rešenje optimizacije ukupnih gubitaka (9) u SPMSM koje može direktno da se implementira u upravljačkom procesoru dato je u [6]. Gubici (9) su predstavljeni u funkciji i_{od} , T i ω_r a zatim je urađen izvod po

i_{od} i izjednačen sa nulom. Rešenje po i_{od} dato je sledećim izrazom:

$$i_{od} = \frac{\omega^2 L_d (R_s + R_c) \Psi_m}{R_s R_c^2 + \omega^2 L_d^2}, \quad (14)$$

dok se i_{oq} računa na osnovu izraza (3)-(5).

Autori u [7] koriste vektor statorskog fluksa kao nezavisnu promenljivu u jednačinama naponske ravnoteže i momentnoj jednačini, a predlažu optimizaciju gubitaka korekcijom ugla napona. Rešenje predviđa rad u oblasti slabljenja polja u kojoj je amplituda napona statora fiksna. Predloženo rešenje uzima u obzir i naponske i strujne limite, takođe izražene preko vektora statorskog fluksa. Optimalne komponente vektora struje statora se nalaze kao presek tangencijalne krive momenta i naponskog limita. Presek između naponskog limita i krive momenta se dobija rešavanjem polinoma četvrtog stepena, koji se može aproksimirati Tejlorovim redom.

Pored optimizacije gubitaka potrebno je estimirati fluks kako bi se poboljšale dinamičke performanse kontrolnog algoritma. U [8] predstavljena je jedna takva strategija, čija je stabilnost dokazana Lapljunovom analizom. Prilikom određivanja momenta na osnovu (5) i izvoda ukupnih kontrolabilnih gubitaka (9) koristi se estimirani fluks. Izvod ukupnih gubitaka se pomoću regulatora svodi na nulu, a pored toga se pomoću regulatora i referentni moment izjednačava sa izračunatim. Na osnovu rezultata simulacije potvrđene su poboljšane dinamičke karakteristike.

Izbor optimalnih struja moguć je pomoću *look-up* tabela koje su generisane *off-line* korišćenjem različitih programskih paketa. Autori u [9] generišu tabelu korišćenjem softverskog paketa *Matlab*. Predloženi algoritam pokušava da smanji gubitke u bakru i gvožđu u oblasti konstantnog momenta i u oblasti slabljenja polja pod strujnim i naponskim ograničenjima, uključujući promene parametara motora. Gubici u bakru su modelovani na osnovu otpornosti statorskog namotaja. Gubici u gvožđu opisuju se izrazom u kojem konfigurišu dve komponente od kojih je jedna pridružena magnetišućoj, a druga demagnetišućoj komponenti fluksa. Komponente fluksa su računane na osnovu metoda konačnih elemenata, a zatim i induktivnosi L_d i L_q u funkciji struja i_d i i_q . Algoritam startuje sa parametrima koji su dati u specifikaciji motora, izračunavaju se optimalne struje, a zatim na osnovu njih i nove vrednosti induktivnosti za sledeću iteraciju. Optimalne struje se zapisuju u *look-up* tabele koje se implementiraju u mikroprocesoru. Za određenu brzinu i moment isčitavaju se optimalne struje koje se dalje vode na ulaze strujnih regulatora. Takođe, analiziran je uticaj pada napona na otpornosti statora na optimizaciju i pokazano da za dati slučaj ima značajni uticaj u oblasti slabljenja polja.

Nelinearno programiranje je jedan od načina za rešavanje problema optimizacije gubitaka u PMSM [11]. Korišćenjem ove metode moguće je smanjiti ukupne gubitke u bakru i gvožđu za širi opseg brzina, uključujući i oblast slabljenja polja. Potrebno je d i q komponente vektora struje statora, a zatim i moment predstaviti kao funkciju ugla struje statora. Moment se može uvećati promenom ugla struje statora. Ukupni gubici se optimizuju uz određena ograničenja. Pokazano je da se dobijaju isti rezultati ako se pored MTPA i metod nelinearnog programiranja pri nemodelovanim gubicima u gvožđu. Ukoliko su gubici u gvožđu modelovani

MTPA ostavljuje manju efikasnost, naročito na velikim brzinama. Efikasnost je povećana približno 1,5 %.

PMSM se često koriste u električnim vozilima (EV) kao pogonske mašine. Pored gubitaka u mašini postoje i gubici u invertoru. Gubici u invertoru se sastoje od gubitaka usled prekidanja i provođenja poluprovodničkih komponenti. Gubici usled provođenja rastu sa porastom struje statora, dok gubici usled prekidanja zavise od napona jednosmernog međukola, frekvencije prekidanja i struje statora. Za optimalan rad vozila potrebno je povećati ukupnu efikasnost. U radu [12] poređene su dve metode: MTPA i predložena metoda za povećanje ukupne efikasnosti pogona (uključeni gubici mašine i invertora). Druga metoda se zasniva na upotrebi *look-up* tabela. Ulaz u kontrolni algoritam su napon jednosmernog kola, brzina rotora i referentni moment. Na osnovu napona jednosmernog kola i brzine rotora računa se maksimalni fluks, koji se zatim poređi sa fluksom dobijenim na osnovu zadatog momenta i optimalnog strujnog vektora. Fluks manje vrednosti se uzima kao parametar prilikom proračuna ograničenja momenata i proračuna referentnih struja. Pokazano je da se korišćenjem predložene metode efikasnost poveća 0.3% za isto opterećenje.

Autori u [13] predlažu optimizaciju rada PMSM korišćenog kao pogonskog kod električnog vozila napajanog pomoću gorivih ćelija korišćenjem *look-up* tabele. Napon jednosmernog međukola pretvarača varira pošto izlazni napon gorive ćelije varira sa opterećenjem, temperaturom, vazдушnim pritiskom, itd. S obzirom na ovu činjenicu napravljena je takva *look-up* tabela koja uključuje promenu napona jednosmernog međukola. Na osnovu jednačine ukupnih gubitaka, naponskih i strujnih ograničenja računaju se optimalne komponente vektora statorske struje. Zatim, proverava se da li je napon jednosmernog međukola promenjen i ako jeste koriguju se komponente vektora statorske struje.

PMSM se koriste i u pumpnim sistemima. S obzirom na karakteristike takvih sistema potrebno je povećati efikasnost, odnosno smanjiti potrošnju u celom operativnom ciklusu. Autori u [14] integrišu dve metode optimizacije. Prva je MTPA zasnovana na modelu koja se koristi u prelaznim procesima i metod pretrage zasnovan na *fuzzy* logici koji se koristi u stacionarnom stanju. U stacionarnom stanju algoritam pretrage startuje sa vrednošću dobijenom pomoću MTPA tokom završetka prelaznog procesa. Pokazano je da je srednja vrednost povećanja efikasnosti 2.1%.

5. ZAKLJUČAK

Sinhronne mašine sa stalnim magnetima na rotoru imaju veliku primenu u pogonima u kojima se očekuje velika efikasnost. Razvoj algoritama za povećanje efikasnosti takvih pogona se deli na dva osnovna pravca. Jedan je razvoj algoritama pretrage, a drugi razvoj algoritama baziranim na modelu. U radu su opisani neki od razvijenih algoritama, date prednosti i mane. Ukoliko se tokom rada pogona brzina i/ili opterećenje često menjaju bolje je koristiti metode zasnovane na modelu procesa. Pojedine metode zasnovane na algoritmima pretrage daju veću efikasnost u stacionarnom stanju, a kao jedno od boljih rešenja pokazala se strategija koja kombinuje obe vrste metoda.

6. LITERATURA

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hirasaka, T., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.41, no.5, pp.511,517, Oct 1994
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Pohlenz, D.; Bocker, J., "Efficiency improvement of an IPMSM using Maximum Efficiency operating strategy," *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, vol., no., pp.T5-15,T5-19, 6-8 Sept. 2010
- [13] Junggi Lee; Kwanghee Nam; Seoho Choi; Soonwoo Kwon, "A Lookup Table Based Loss Minimizing Control for FCEV Permanent Magnet Synchronous Motors," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, vol., no., pp.175,179, 9-12 Sept. 2007
- [14] 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

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 – In this paper methods for PMSM losses minimization are discussed. PMSM are more efficient than IM and DC motors and take their place in most of novel drive applications. Energy efficiency of PMSM can be further increased by optimal control. The results of optimal control are vector of stator current or voltage, which for given conditions maximize energy efficiency. This paper gives one review of methods for losses optimization and separates them into two basic groups. The first group consists of search algorithm methods, while the second groups are model based methods. During the review are discussed the advantages and disadvantages of this methods.

REVIEW OF METHODS FOR OPTIMIZING LOSSES OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS

Marko Gecić, Darko Marčetić, Vladimir Katić, Đura Oros, Petar Matić