

Energetski efikasno upravljanje pogonom sa sinhronim reluktantnim motorom

Marko Gecić, Mirna Kapetina, Vladimir Popović, Darko Marčetić

Fakultet tehničkih nauka
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija

gecicm@uns.ac.rs, mirna.kapetina@uns.ac.rs, popovicv@uns.ac.rs, darmar@uns.ac.rs

Sažetak— U ovom radu predstavljena je jedna metoda pogodna za optimizaciju rada pogona sa sinhronim reluktantnim motorom. Metoda se zasniva na primeni algoritma roja čestica i modela sistema. Kako bi se smanjili kontrolabilni gubici u motoru, a samim tim i povećala efikasnost, korišćenjem algoritma roja čestica za širok opseg opterećenja i brzina uz pomoć računara su generisane uporedne tabele sa optimalnim komponentama vektora struje statora. Prilikom generisanja optimalnih komponenti korišćena su strujna i naponska ograničenja invertora. Računarske simulacije su detaljnije diskutovane.

Ključne reči— energetska efikasnost; optimizacija; sinhroni reluktantni motor; particle swarm optimization;

I. UVOD

Trenutno najzastupljenija vrsta motora u elektromotornim pogonima su asinhroni motori. Efikasnost pogona se može povećati zamenom pogonskih motora ili odgovarajućim upravljanjem. Efikasnost asinhronih motora je manja nego efikasnost sinhronih motora sa stalnim magnetima na rotoru, ali je cena magneta i dalje visoka pa se u nekim pogonima ne razmatraju kao alternativa asinhronim. Iz tog razloga kao jedno rešenje javljaju se sinhroni reluktantni motori čija je konstrukcija jeftinija, a imaju veću efikasnost [1].

Sinhroni reluktantni motor izmislio je Danielson davne 1900. godine, kao pokušaj da se poveća faktor snage asinhronog motora [2]. Konstrukcija statora je identična statoru asinhronog motora, dok se na rotoru ne nalaze namotaji [3]. Konstrukcija rotora ima veliki uticaj na performanse sinhronog reluktantnog motora [4]. U odnosu na asinhroni motor sa istim namotajima na statoru za istu struju statora sinhroni reluktantni motor proizvodi manje momenta, dok su i gubici manji. Aksijalnim slaganjem limova rotora po uzdužnoj osi na jednostavan način se postiže velika magnetska anizotropija osa pri čemu se zadržava cilindričan oblik rotora kao i kod asinhronih masina. Time je omogućen rad ove masine na velikim brzinama obrtanja bez narušavanja mehaničkog integriteta. Jednostavnost konstrukcije koja povlači za sobom i manju cenu i veću robusnost pogona čine da se ove mašine neizostavno koriste u primenama gde gabarit i masa nisu od presudnog značaja [4]. Dodatna robusnost usled ne postojanja pobudnog polja na rotoru ogleda se i prilikom praznog hoda i kratkog spoja reluktantne mašine gde neće doći do indukovanja

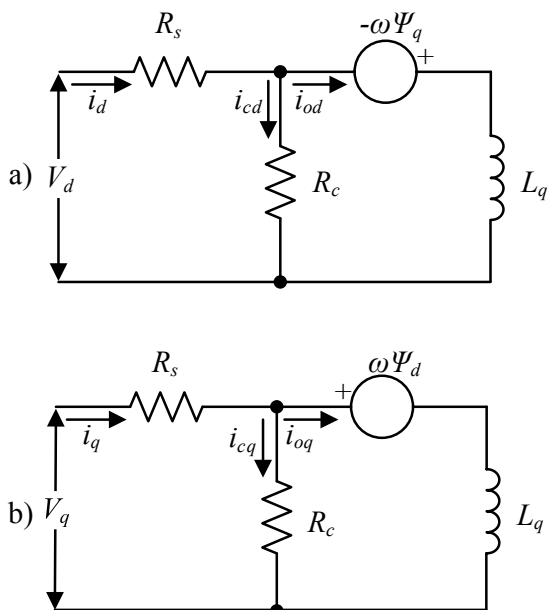
napona na otvorenim priključcima statora odnosno struje kratkog spoja kroz iste priključke, respektivno. Međutim, specifična snaga ovih mašina je značajno manja u odnosu mašine sa pobudom, ali korišćenjem specijalnih upravljačkih strategija (zahtevani momenat sa minimalnom strujom statora) energetske performanse ovih mašina se mogu značajno približiti performansama njihovih ekvivalenata sa pobudnim namotajem.

Različite metode za smanjenje gubitaka su predstavljene u literaturi. Ove metode se mogu klasifikovati u dve osnovne grupe [5] – [10]. Prva grupa je zasnovana na algoritmima pretrage, dok se druga grupa zasniva na matematičkom modelu sistema. U ovom radu predstavljena je metoda zasnovana na modelu. Metoda koristi algoritam roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization – PSO*) kako bi pronašla optimalne komponente vektora statorske struje koje će rezultovati minimalnim gubicima u sinhronom reluktantnom motoru. Algoritam roja čestica su razvili Kenedy i Eberhart 1995. godine prilikom pokušaja simulacije ponašanja i kretanja jata ptica [16]. Zbog svoje jednostavnosti u konceptu našao je primenu u raznim praktičnim problemima [16]. Optimalne komponente vektora statorske struje za širok opseg opterećenja i brzina su proračunate na računaru uz pomoć softverskog paketa MATLAB i sačuvane su uporednim tabelama (eng. lookup table). Ovakvo generisane uporedne tabele se mogu koristiti za upravljane pogonom u realnom vremenu.

Rad je organizovan na sledeći način. U drugom poglavlju je dat matematički model sinhronog reluktantnog motora sa uključenim kontrolabilnim gubicima. Gubici u gvožđu su modelovani pomoću paralelne otpornosti koja je u funkciji brzine. U trećem poglavlju opisan je PSO algoritam korišćen za optimizaciju gubitaka sinhronog reluktantnog motora. U četvrtom poglavlju predstavljena je šema upravljanja pogonom sa sinhronim reluktantnim motorom i simulacioni rezultati optimizacionog algoritma.

II. MATEMATIČKI MODEL SINHRONOG RELUKTANTNOG MOTORA

Ekvivalentna šema sinhronog reluktantnog motora u dq koordinatnom sistemu prikazana je na Sl. 1 [1]. Na Sl. 1, R_s predstavlja otpornost statorskog namotaja, R_c otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu, dok L_d i L_q predstavljaju induktivnosti u popužnoj d i poprečnoj q osi.



Slika 1. Ekvivalentna šema SRM: a) d-osa, b) q-osa

Na osnovu ekvivalentne šeme može se napisati sledeći matematički model u stacionarnom stanju:

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

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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

$$i_{cd} = -\frac{\omega \Psi_q}{R_c}, \quad i_{cq} = \frac{\omega \Psi_d}{R_c}. \quad (4)$$

gde su v_{od} i v_{oq} naponi grane magnećenja, v_d i v_q dq komponente vektora statorskog napona, i_d i i_q dq komponente vektora statorske struje, i_{cd} i i_{cq} dq struje kroz granu magnećenja, i_{do} i i_{qo} struje u vazдушnom zazoru, dok je ω električna ugaona brzina. Komponente vektora fluksa u motoru se računaju na osnovu sledećih jednačina:

$$\Psi_d = L_d i_{od}, \quad (5)$$

$$\Psi_q = L_q i_{oq}, \quad (6)$$

Elektromagnetni moment zavisi od isturenosti polova rotora i proizvoda dq komponenti vektora struje statora. Na osnovu slike 1 moment se može izraziti na sledeći način:

$$T_e = p(L_d - L_q) i_{od} i_{oq}, \quad (7)$$

Gubici u bakru statorskog namotaja su proporcionalni kvadratu amplitude statorske struje i mogu se predstaviti kao:

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= R_s (i_d^2 + i_q^2) \\ &= R_s \left\{ \left(i_{od} - \frac{\omega L_q i_{oq}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{oq} + \frac{\omega L_d i_{od}}{R_c} \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Gubici u gvožđu mogu se izračunati na osnovu R_c otpornosti i struja koje protiču kroz nju:

$$P_{Fe} = R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2) = \frac{\omega^2 (L_d i_{od})^2}{R_c} + \frac{\omega^2 (L_q i_{oq})^2}{R_c}. \quad (9)$$

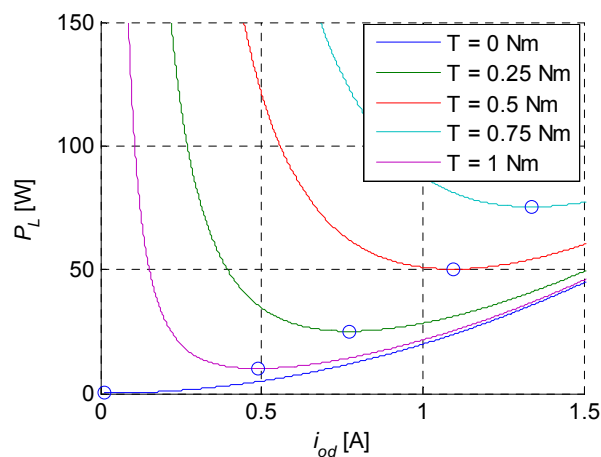
Ukupni kontrolabilni električni gubici se dobijaju kao zbir gubitaka u bakru i gvožđu:

$$P_L = P_{Cu} + P_{Fe}. \quad (10)$$

Ubacivanjem (1) - (7) u (10) ukupni kontrolabilni gubici se mogu izraziti kao funkcija od i_{od} , T i ω :

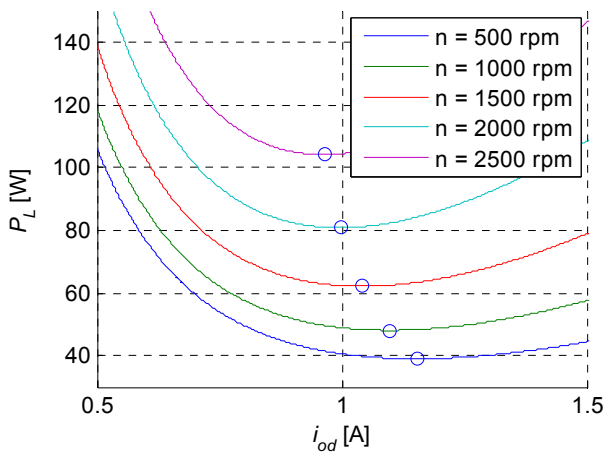
$$P_L = f(i_{od}, T, \omega) \quad (11)$$

Na Sl. 2 prikazana je zavisnost ukupnih električnih gubitaka u funkciji struje i_{od} za više opterećenja na jednoj brzini. Jasno se može videti da postoje takve struje i_{od} kojima se ostvaruju minimalni gubici za svako opterećenje.



Slika 2. Ukupni električni gubici za različita opterećenja na 1000 rpm

Zavisnost ukupnih električnih gubitaka u funkciji od struje i_{od} za različite brzine, a za jedno opterećenje prikazano je na Sl. 3. Na osnovu Sl. 2 i Sl. 3 može se zaključiti da za svaki par brzina i opterećenja postoji optimalni par komponenti vektora struje statora koji će rezultovati minimalnim gubicima u motoru.



Slika 3. Ukupni električni gubici za različite brzine pri 0.5 Nm

Maksimalni moment koji motor može da razvije zavisi od strujnih (I_{max}) i naponskih (V_{max}) ograničenja invertora tako da ih je potrebno uključiti u proračun optimalnih komponenti vektora struje statora. Strujno ograničenje je dominantno na malim, dok je naponsko na velikim brzinama obrtanja. Naponsko ograničenje može se predstaviti kao:

$$\sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{max} \quad (12)$$

gde V_{max} zavisi od napona jednosmernog međukola invertora, V_{DC} . Strujno ograničenje može se predstaviti kao:

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max} \quad (13)$$

Takođe, komponenta vektora struje statora u podužnoj osi mora biti veća od nule:

$$i_{od} \geq 0. \quad (14)$$

III. ALGORITAM ROJA ČESTICA (PSO)

Za minimizaciju kriterijuma optimalnosti (11) odabran je PSO algoritam sa modifikacijom predloženom u [17]. PSO je razvijen tokom devedesetih godina dvadesetog veka od strane Kenedija i Eberharta [16]. To je relativno nova, stohastička evolutivna tehnika. Algoritam je inspirisan ponašanjem životinja koje se kreću u jatima (konkretno, kretanjem jata ptica ili riba). Svaka tačka u prostoru rešenja predstavlja jedinku (česticu) koju karakterišu tekuća brzina i tekuća pozicija. Veličina populacije (broj čestica) se bira unapred i ne menja se u toku izvršavanja algoritma. Inicijalna pozicija i

brzina svake čestice se biraju na slučajan način, unutar nekog dozvoljenog opsega. Označimo sa $x_i[k]$ vektor položaja, a sa $v_i[k]$ brzinu i -te čestice u k -tom trenutku. Svaka čestica pamti najbolju poziciju koju je ikada dostigla, $p_i[k]$. Takođe, pamti se i najbolja pozicija ikada postignuta od strane ma koje čestice u populaciji, $g[k]$. Osnovna ideja PSO algoritma jeste da se čestice istovremeno usmeravaju ka sopstvenoj najboljoj i globalno najboljoj ikada postignutoj poziciji. Brzina svake čestice se, dakle, računa na osnovu diferencne jednačine:

$$v_i[k+1] = w \cdot v_i[k] + c_1 \cdot r_{1,i}[k] \cdot (p_i[k] - x_i[k]) + c_2 \cdot r_{2,i}[k] \cdot (g[k] - x_i[k]), \quad (15)$$

gde su w , c_1 i c_2 parametri definisani u algoritmu, dok su r_1 i $r_{2,i}$ slučajni, najčešće uniformno raspoređeni brojevi u opsegu $[0,1]$. Parametar w se naziva faktorom inercije, dok se c_1 i c_2 nazivaju faktorima ubrzanja. Pozicija svake čestice se menja po formuli:

$$x_i[k+1] = x_i[k] + v_i[k+1] \quad (16)$$

Algoritam okončava svoje izvršavanje po dostizanju unapred propisanog broja iteracija. Naravno, moguće je definisati i drugačije kriterijume zaustavljanja, ali oni nisu korišteni u okviru ovog rada. Jedinku (česticu) u našem slučaju predstavlja vrednost struje i_{od} . Za svaki set ulaznih vrednosti (jedinki) se vrši izračunavanje vrednosti kriterijuma optimalnosti (11), na osnovu čega se iz iteracije u iteraciju primenom PSO algoritma modifikuje položaj jedinki i određuje ona koja obezbeđuje minimalnu vrednost kriterijuma optimalnosti. Na ovaj način pronalazi se optimalna vrednost struje i_{od} motora koja obezbeđuje optimizaciju gubitaka uz zadovoljenje ograničenja (12)-(14).

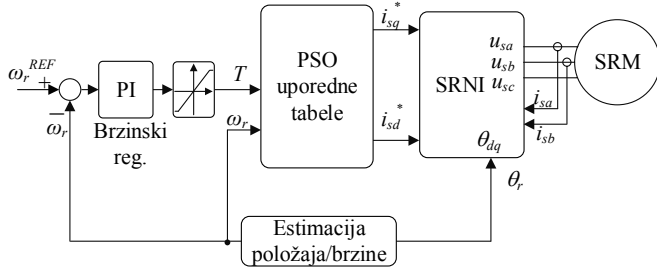
U jednačini (15) figurišu tri parametra čiju vrednost treba izabrati u cilju postizanja željenog ponašanja algoritma. Izborom ovih parametara utiče se na sposobnost eksploatacije i eksploracije algoritma, odnosno na brzinu konvergencije i sposobnost prevazilaženja lokalnih minimuma.

Faktor inercije w je po prvi put uveden u [18], dok u originalnoj implementaciji nije postojao (bio je identički jednak jedinici). Njegova vrednost treba da bude u intervalu $(0,1)$. U [18] se takođe preporučuje postepeno smanjivanje inercije tokom vremena.

Međusobni odnos faktora ubrzanja c_1 i c_2 utiče na težnju svake pojedinačne čestice da se približava sopstvenoj, odnosno zajedničkoj najboljoj poziciji. Faktor c_1 definiše „kognitivnu“, a c_2 „socijalnu“ komponentu algoritma [18]. Drugim rečima, relativno velike vrednosti faktora c_1 utiče da čestice prvenstveno teže sopstvenim najboljim pozicijama, dok će relativno velika vrednost faktora c_2 uticati da se čestice primarno usmeravaju ka najboljoj poziciji pronađenoj na nivou čitave populacije. Najčešće se faktori ubrzanja biraju u opsegu $(0, 2]$. Pored prethodno pobrojanih empirijskih preporuka, u literaturi postoje i preporuke i modifikacije PSO algoritma [19-20].

IV. ŠEMA ENERGETSKI EFIKASNOG POGONA SA SINHRONIM RELUKTANTNIM MOTOROM

Šema energetski efikasnog pogona sa sinhronim reluktantnim motorom predstavljena je na Sl. 4. Brzina i položaj rotora se procenjuju na osnovu raspoloživih terminalnih veličina, struja i napona namotaja statora. Brzina se reguliše linearnim PI regulatorom, koji zadaje potrebnu vrednost momenta potrebnog da se greška između zadate i ostvarene brzine svode na nulu. Na osnovu momenta i ostvarene brzine iščitavaju se referentne struje iz PSO uporednih tabela. Referentne struje se dalje vode u strujno regulisan naponski inverter (SRNI).

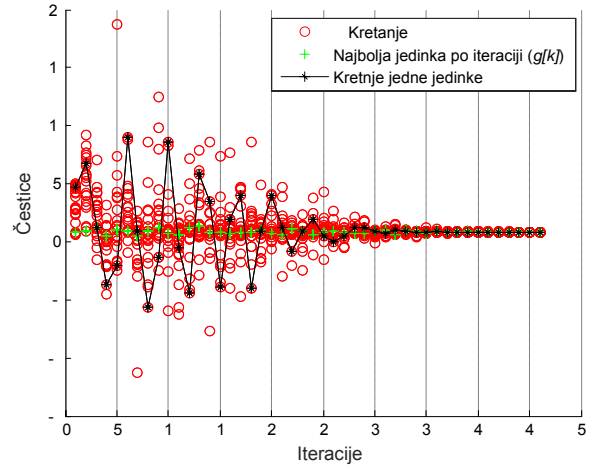


Slika 4. Blok dijagram optimizovanog upravljanja pogona sa sinhronim reluktantnim motorom

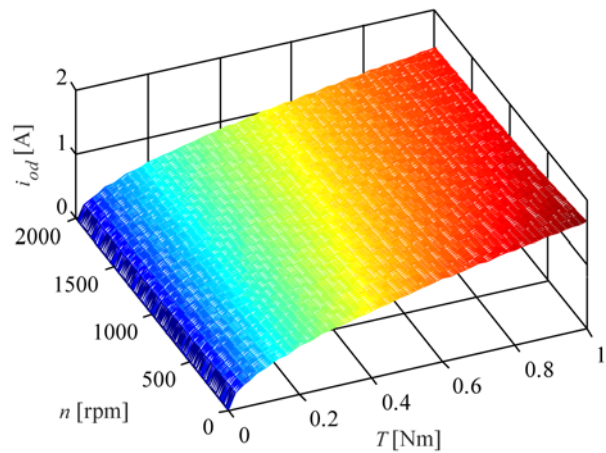
Računarske simulacije predloženog PSO optimizacionog algoritma su izvršene uz pomoć programskog paketa MATLAB. Parametri korištenog motora u simulacijama su: $R_s = 12,75\Omega$, $L_d = 0,38H$, $L_q = 0,2H$, $p = 2$, dok je ekvivalent gubicima u gvožđu $K_{rm} = 0.0336628 \Omega/s \text{ rad}$ [1]. Otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu zavisi od brzine obrtanja i može se definisati kao [1]:

$$R_c = \frac{\omega^3 L_d L_q}{K_{rm}} \quad (17)$$

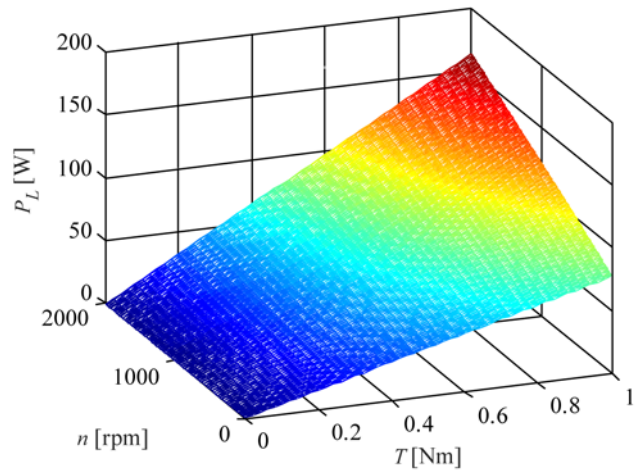
Potruga za optimalnom vrednošću dq komponenti vektora statorske struje zasnovana na PSO algoritmu pokretana je jednom za svaki par opterećenja i brzine obrtanja. Pri pokretanju optimizacionog algoritma broj jedinki populacije je 20, a broj iteracija 45. U prvom koraku se inicijalizuje vrednost svake od 20 jedinki u preporučenom opsegu od [0A, 5A], a potom se izračunava funkcije kriterijuma (11) koja je 'kažnjena' sa ograničenjima (12)-(14). Na osnovu izračunatih vrednosti određuje se najbolja jedinka na nivou celog roja g , kao i najbolja lična pozicija svake jedinke p_i . Primenom izraza (15) i (16) određuje se položaj jedinki u sledećoj iteraciji. Opisani postupak se ponavlja za svaku iteraciju, tokom čega ceo roj konvergira ka optimalnoj vrednosti što je ilustrovano na slici 5. Ukupan broj poziva PSO algoritma zavisi od zadatog opsega brzina i opterećenja, kao i koraka inkrementiranja istih. Prilikom simulacije korišćen je opseg brzina od 0 do 2000 rpm, sa korakom 10 rpm, dok su opseg opterećenja i korak opterećenja od 0 do 1 Nm i 0.02 Nm, respektivno.



Slika 5. Konvergiranje celog roja ka optimalnoj vrednosti



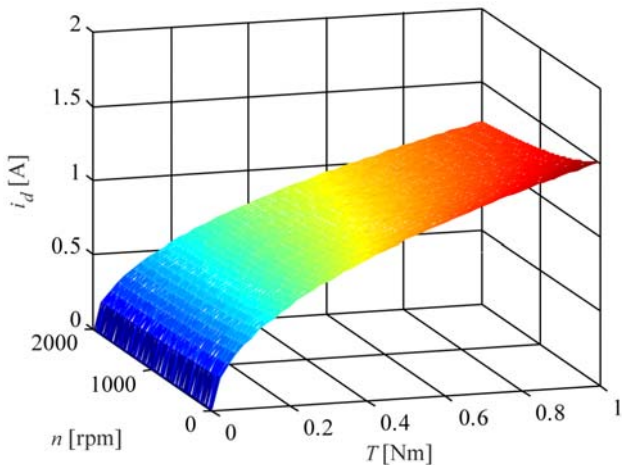
Slika 6. Optimalna i_{od} za dato opterećenje i brzinu



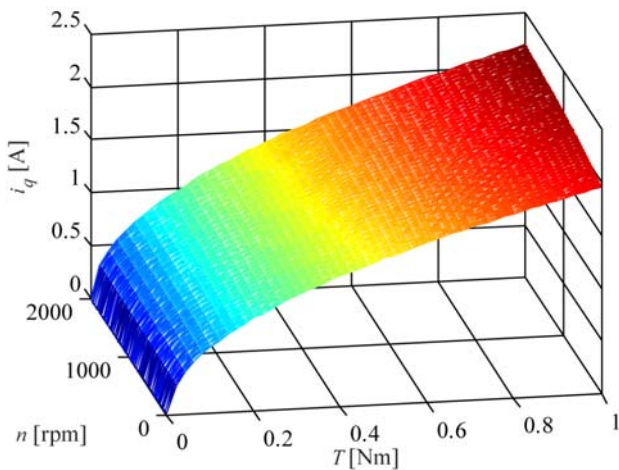
Slika 7. Minimalni električni gubici za dato opterećenje i brzinu

Izračunata optimalna vrednost i_{od} struje i mnimalni električni gubici za širok opseg opterećenja i brzinu prikazani su na slikama 6 i 7. Na osnovu optimalne i_{od} struje i (3) – (7)

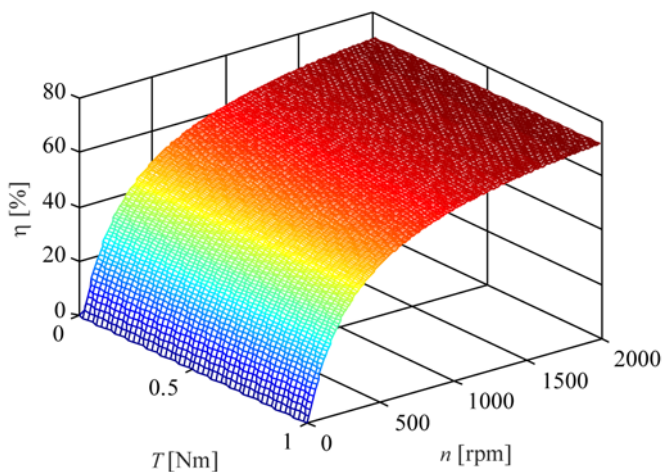
optimalne komponente vektora struje statora u dq koordinatnom sistemu su prikazane na slikama 8 i 9. Energetska efikasnost motora prikazana je na Sl. 10.



Slika 8. Optimalna i_d za dato opterećenje i brzinu



Slika 9. Optimalna i_q za dato opterećenje i brzinu



Slika 10. Energetska efikasnost za dato opterećenje i brzinu

V. ZAKLJUČAK

Predložen je metod sa energetske efikasno upravljanje pogonom sa sinhronim reluktantnim motorom. Algoritam roja čestica je iskorišćen za generisanje uporednih tabela sa optimalnim komponentama vektora statorske struje. Računarskim simulacijama pokazano je da se primenom predložene algoritma ukupni gubici mogu smanjiti. Metod može biti unapređen ako se uvaži promena induktivnosti sa statora sa porastom struje statora.

ZAHVALNICA

Rad je sponzorisan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta 42004.

LITERATURA

- [1] T. Senjyu, K. Kinjo, N. Urasaki and K. Uezato, "High efficiency control of synchronous reluctance motors using extended Kalman filter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.50, no.4, pp.726-732, Aug. 2003
- [2] M. Hortman, "Implementation and evaluation of a full-order observer for a synchronous reluctance motor," Georgia Institute of Technology, April 2004.
- [3] T. Matsuo, A. El-Antably and T.A. Lipo, "A new control strategy for optimum efficiency operation of a synchronous reluctance motor," in Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, vol.1, no., pp.109-116 vol.1, 6-10 Oct 1996
- [4] S. Vukosavić, Električne mašine, Akademska misao, Beograd, 2010, pp. 544-545.
- [5] Q. Zengcai and M. Hinkkanen, "Loss-minimizing control of synchronous reluctance motors — A review," 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), vol., no., pp.350-355, 25-28 Feb. 2013
- [6] Ju Hui Mun, Jae Sub Ko, Jung Sik Choi, Mi Geum Jang and Dong Hwa Chung, "Efficiency optimization control of SynRM Drive using multi-AFLC," International Conference in Electrical Machines and Systems (ICEMS), vol., no., pp.908-913, 10-13 Oct. 2010
- [7] M. Hsieh, I. Tsai and Y. Weng, "Cost-effective Design for high efficiency synchronous reluctance motor," in Magnetics Conference (INTERMAG), 2015 IEEE, vol., no., pp.1-1, 11-15 May 2015
- [8] I. Kioskeridis and C. Mademlis, "Energy efficiency optimisation in synchronous reluctance motor drives," IEE Proceedings in Electric Power Applications, vol.150, no.2, pp.201-209, Mar 2003
- [9] S. Yamamoto, J.B. Adawey and T. Ara, "Maximum efficiency drives of synchronous reluctance motors by a novel loss minimization controller considering cross-magnetic saturation," in Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, vol., no., pp.288-293, 20-24 Sept. 2009
- [10] S. Yamamoto, H. Hirahara, A. Tanaka, T. Ara and K. Matsuse, "Maximum efficiency drives of synchronous reluctance motors with on-line stator resistance estimator," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, vol., no., pp.3140-3145, 15-19 Sept. 2013
- [11] S. Yamamoto, H. Hirahara, A. Tanaka, T. Ara and K. Matsuse, "Maximum efficiency drives of synchronous reluctance motors by a novel loss minimization controller with inductance estimator," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 6, pp. 2543-2551, Nov.-Dec. 2013.
- [12] K. Yahia, D. Matos, J. O. Estima and A. J. Marques Cardoso, "Modeling synchronous reluctance motors including saturation, iron losses and mechanical losses," 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, pp. 601-606, 2014.
- [13] J. H. Lee and H. S. Song, "Loss & efficiency evaluations of SynRM according to windings type by coupled Preisach models & FEM and

- experiment," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, Raleigh, NC, pp. 884-891, 2012.
- [14] P. H. Truong, D. Flieller, N. K. Nguyen, J. Mercklé and M. T. Dat, "Optimal efficiency control of synchronous reluctance motors-based ANN considering cross magnetic saturation and iron losses," Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE, Yokohama, pp. 004690-004695, 2015.
- [15] I-Hsien Lin, Min-Fu Hsieh, Hsiu-Fu Kuo and Mi-Ching Tsai, "Improved Accuracy for Performance Evaluation of Synchronous Reluctance Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015.
- [16] J. Eberhart and R. Kennedy: Particle Swarm Optimization, Proc. of IEEE Int. Conf. Neural Networks, pp. 1942-1948, 27 Nov.-1 Dec, Perth, Australia, 1995
- [17] Z. Kanovic, M. Rapaic and Z. Jelicic, "Generalized particle swarm optimization algorithm - Theoretical and empirical analysis with application in fault detection," Applied Mathematics and Computation, vol. 217, 2011
- [18] Ying Dong, Jiafu Tang, Baodong Xu and Dingwei Wang, "An Application of Swarm Optimization to Nonlinear Programming", Computers and Mathematics with Applications No.49/2005, 1655-1668.
- [19] A. Ratnaweera, K.H. Saman and H.C. Watson, "Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer With Time-Varying Acceleration Coefficients," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, pp. 240-2558, 2004
- [20] M. Rapaic and Ž. Kanović: "Time-varying PSO - convergence analysis, convergence related parameterization and new parameter adjustment schemes," Information Processing Letters, vol. 109, pp.548552, 2009

ABSTRACT

This paper presents one method suitable for optimizing the synchronous reluctance motor drive. The method is based on the particle swarm optimization algorithm and system model. In order to minimize controllable losses in the motor, and as a result to increase the efficiency, particle swarm optimization algorithm was used for generation of lookup table with the optimal components of the stator current vector for wide load and speed range. The current and voltage constrains of inverter are included in optimization procedure. The computer simulations are discussed in details.

ENERGY EFFICIENT CONTROL OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DRIVE

Marko Gecić, Mirna Kapetina, Popović Vladimir, Darko Marčetić