

## Analiza mogućnosti minimizacije gubitaka sinhronog motora sa stalnim magnetima na rotoru pogodnog za primenu u uređajima široke potrošnje

Darko Marčetić<sup>1</sup>, Marko Gecić<sup>2</sup>, Petar Matic<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Republika Srbija

<sup>2</sup>Torqueedo GmbH, Gilching, Germany

<sup>3</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska  
darmar@uns.ac.rs, marko.gecic@torqueedo.com, petar.matic@etf.unibl.org

**Sažetak**—U ovom radu predstavljen je model sinhronog motora sa stalnim magnetima na rotoru, sa uvažanim gubicima u gvožđu. Na osnovu modela analizirana je mogućnost minimizacije ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka motora. Prilikom računarskih simulacija motora pogodnog za korišćenje u uređajima široke potrošnje pokazano je da se odabirom odgovarajuće direktne komponente vektora struje statora mogu minimizirati ukupni kontrolabilni električni gubici.

**Ključne reči**—energetska efikasnost; sinhroni motor sa stalnim magnetima; pogoni široke primene; minimizacija gubitaka;

### I. UVOD

U današnjem, savremenom i industrijalizovanom svetu potreba za električnom energijom je sve veća i potrebno ju je što efikasnije proizvoditi i koristiti [1]. Potrošnja toplotne i električne energije neprestano raste, pa će pre ili kasnije biti potrebno mnogo investirati kako u prenosne, tako i u distributivne mreže, ali i transformatorske stanice. Jedan od najvažnijih faktora za uštedu energije je upotreba energetski efikasnih motora. Standard za klasifikaciju motora po nivoima vrednosti stepena iskorišćenja [2], IEC 60034-30, definiše četiri energetske klase motora: IE1 – motori standardne efikasnosti (*Standard efficiency*); IE2 – motori visoke efikasnosti (*High efficiency*), sa 18-25% manjim gubicima u odnosu na IE1; IE3 – motori vrlo visoke efikasnosti (*Premium efficiency*), sa 15-20% manjim gubicima od IE2; i IE4 – motori super efikasnosti (*Super Premium efficiency*), što se prezentira kao cilj kome se teži. Prema Direktivi 2005/32/EC [3] primena motora navedenih energetskih klasa je obavezna u zemljama Evropske unije. Od 1. januara 2017. svi motori nominalnih snaga od 0,75-375kW moraju biti najmanje klase IE3, ili klase IE2 i opremljeni sa pretvaračima za regulaciju brzine (frekvencije).

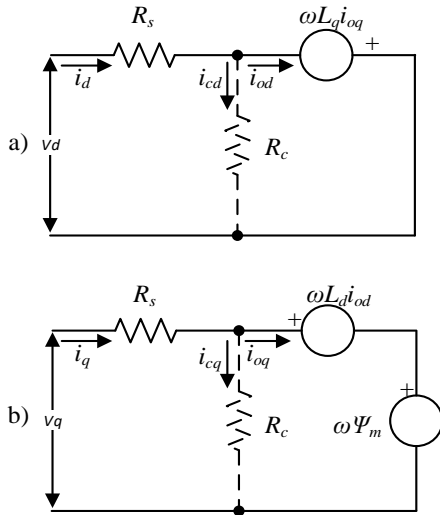
Kod raznih uređaja poput aparata za domaćinstvo, ručnih alata, rashladnih uređaja i ventilatora koriste se pogoni promenljive brzine. Ovi pogoni su veoma osetljivi po pitanju cene, dok u isto vreme zahtevaju visoku pouzdanost i efikasnost. Što se tiče energetskih klasa uređaja široke potrošnje od 2010. godine u Evropskoj uniji važe klase od A do G [4], pri čemu klasa A označava najmanju potrošnju električne energije, a klasa G najveću potrošnju energije. Upotrebom energetski efikasnijih uređaja široke potrošnje može se uštedeti značajna količina energije, a samim tim i smanjiti potreba za investicijama u prenosnim i distributivnim mrežama. U uređajima široke potrošnje u poslednje vreme najčešće se koriste sinhroni motori sa stalnim magnetima na rotoru, jer u odnosu na druge vrste raspoloživih obrtnih mašina imaju najveću efikasnost [5].

Gubici sinhronih mašina mogu se podeliti u nekoliko grupa. Prvu grupu čine gubici u bakru mašine ( $P_{Cu}$ ) koji nastaju u namotajima na statoru. Gubici u namotajima statora su gubici zbog prolaska struje  $I$  kroz namotaj izazvane opterećenjem. To su gubici Džulove toplote i dodatni gubici. Džulovi gubici su proporcionalni  $RI^2$ , gde je  $R$  otpornost namotaja. Kako su Džulovi gubici zbog nametnute struje opterećenja proporcionalni otpornosti namotaja, oni se povećavaju sa porastom temperature namotaja. Dodatni gubici nastaju usled pojave potiskivanja, kao i zbog dodatnog magnetisanja feromagnetnog kostura i konstruktivnih delova. Ove gubitke je teško tačno odrediti. U digitalno regulisanim pogonima promenljive brzine smatra se da su Džulovi gubici u namotaju mašine kontrolabilni, a svi ostali gubici u bakru se zanemaruju. Drugu vrstu čine gubici u gvožđu ( $P_{Fe}$ ) tj. gubici u feromagnetnom magnetskom kolu. Ovi gubici se sastoje od gubitaka izazvanih usled vrtložnih (vihornih) struja i gubitaka usled histereze. U digitalno regulisanim pogonima promenljive brzine smatra se da su gubici u gvožđu kontrolabilni, jer se promenom napajanja mašina može dovesti u radni režim u kome se ima manja snaga gubitaka u gvožđu. Treću vrstu gubitaka čine mehanički gubici koji se sastoje od gubitaka (usled) trenja i ventilacije. Smatra se da ovi gubici nisu kontrolabilni.

Vektorskim upravljanjem se postiže raspregnuto upravljanje momentom i fluksom sinhronih mašina. Regulacijom poprečne komponente vektora struje statora (struja  $q$  ose) reguliše se momenat, dok se regulacijom direktne komponente vektora struje statora (struja  $d$  ose) reguliše fluks mašine [6]. Konvencionalna metoda upravljanja sinhronim motorima sa stalnim magnetima je postavljanje direktne komponente vektora struje statora na nulu, za brzine obrtanja manje od nominalne. Za brzine pri kojima amplituda fazne EMS statora postaje veća od maksimalnog mogućeg faznog napona na izlazu invertora ( $\approx U_{dc}/\sqrt{3}$ ) neophodno je umanjiti polje [7] i time izbeći zasićenje strujnih regulatora. Potrebno je smanjiti ukupan fluks statora u  $d$ -osi, što se postiže negativnom strujom u  $d$ -osi. U ovom radu analiziraće se promena ukupnih kontrolabilnih gubitaka u zavisnosti od struje  $d$  ose pri određenim parovima brzina i opterećenja.

### II. MATEMATIČKI MODEL SINHRONOG MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA

Ekvivalentna šema sinhronog reluktantnog motora u  $dq$  koordinatnom sistemu prikazana je na slici 1 [1]. Na slici,  $R_s$  predstavlja otpornost statorskog namotaja,  $R_e$  otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu,  $\Psi_m$  fluks stalnog magneta dok  $L_d$  i  $L_q$  predstavljaju induktivnosti u podužnoj  $d$  i poprečnoj  $q$  osi.



Sl. 1. Ekvivalentna šema PMSM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

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

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

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

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

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

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 vazdušnom zazoru,  $\rho = L_q/L_d$ , dok je  $\omega$  električna ugaona brzina.

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_L &= P_{Cu} + P_{Fe} = \frac{3}{2} (R_s (i_d^2 + i_q^2) + R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)) \\ &= \frac{3}{2} \left( R_s (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\omega^2 ((\rho L_d i_{oq})^2 + (\Psi_m + L_d i_{od})^2)}{R_c} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

a mogu se izraziti kao funkcija od  $i_{od}$ ,  $T$  i  $\omega$ :

$$P_L = f(i_{od}, T, \omega) \quad (9)$$

Iz jednačine za elektromagnetni moment može se izraziti komponenta struje  $i_{oq}$ :

$$i_{oq} = \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \quad (10)$$

a zatim uvrštavanjem (10) u (1) – (4) dobijaju se komponente vektora struje statora:

$$i_d = i_{od} - \frac{2T\omega\rho L_d}{3pR_c(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \quad (11)$$

$$i_q = \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} + \frac{\omega(\Psi_m + L_d i_{od})}{R_c} \quad (12)$$

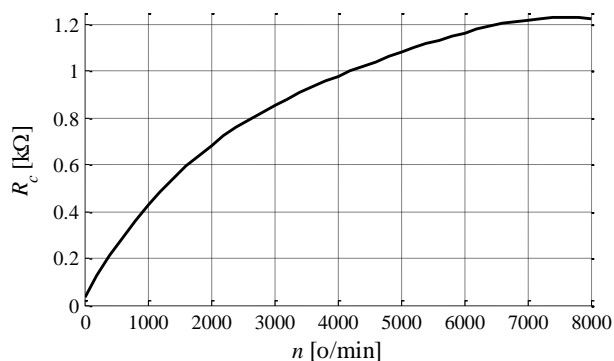
Ako se dobijene komponente vektora struje statora uvrste u (9) dobija se:

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{3}{2} R_s \left( \left( i_{od} - \frac{2T\omega\rho L_d}{3pR_c(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} + \frac{\omega(\Psi_m + L_d i_{od})}{R_c} \right)^2 \right) \\ &\quad + \frac{3}{2} \frac{\omega^2 \left( \left( \rho L_d \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \right)^2 + (\Psi_m + L_d i_{od})^2 \right)}{R_c} \end{aligned} \quad (13)$$

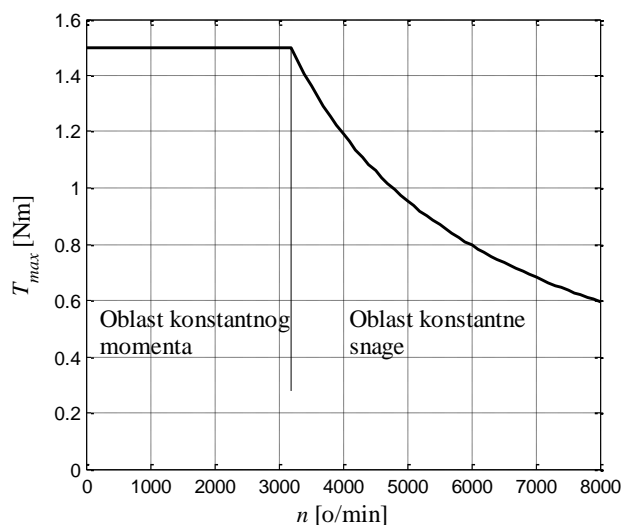
### III. REZULTATI RAČUNARSKIH SIMULACIJA

Zavisnost snage gubitaka od struje  $i_{od}$  za različita opterećenja i na različitim brzinama dobijena simulacijama prikazana je u ovom poglavlju. Prilikom simulacija korišćeni su nominalni parametri motora korišćenog u mašini za pranje veša:  $p = 4$ ,  $L_d = 16.84$  mH,  $L_q = 24.67$  mH,  $R_s = 2.73$ . Otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu menja se sa promenom brzine. Dominantni gubici u praznom hodu su gubici u gvožđu i na osnovu merenja tih gubitaka može se odrediti otpornost  $R_c$  pomoću sledećeg izraza:

$$R_c = \frac{3(\omega\Psi_m)^2}{2P_{Fe}} \quad (14)$$



Sl. 2. Zavisnost  $R_c$  od brzine obrtanja

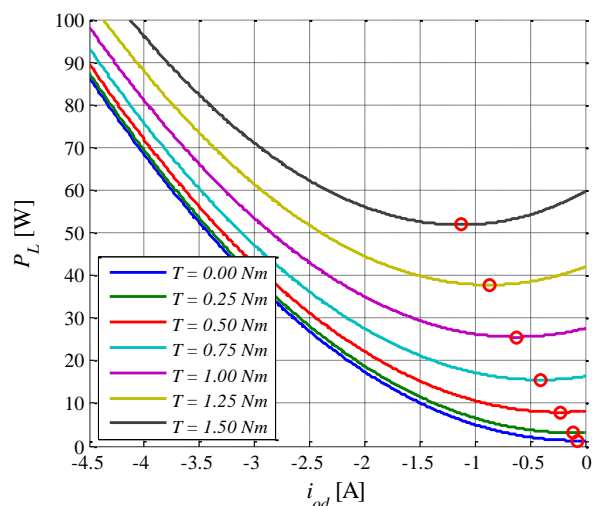


Sl. 3. Zavisnost momenta od brzine

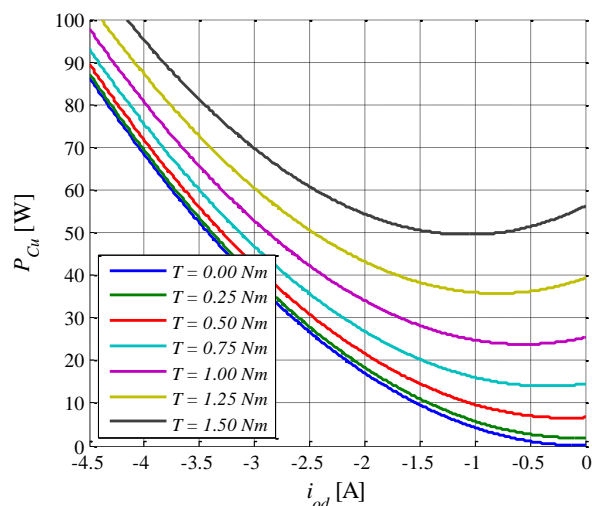
Zavisnost maksimalnog momenta od brzine sinhronog motora sa stalnim magnetima napajano iz invertora korišćenog u ovoj analizi ilustrovana je na slici 3. Vidi se da je maksimalni momenat konstantan do brzine od 3200 o/min, a nakon toga opada (oblast slabljenja polja). Kako je izlazna snaga jednaka proizvodu momenta i brzine ona raste linearno do brzine od 3200 o/min, a nakon toga ostaje konstantna. Na srednjim i velikim brzinama električni pogon mora raditi sa konstantnom snagom.

#### A. Male brzine obrtanja rotora

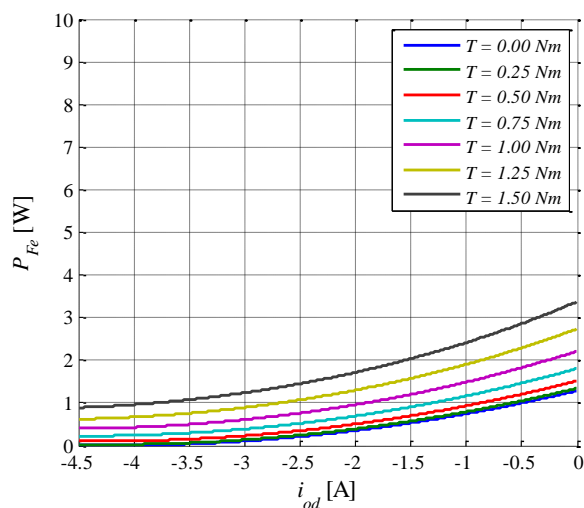
Na slici 4 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje  $i_{od}$  za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 500 o/min. Povećanjem negativne struje kontrolabilni gubici se smanjuju, a zatim povećavaju. Funkcija gubitaka je konveksna i za svako opterećenje postoji takva struja  $i_{od}$  kojima se ostvaruju minimalni gubici.



Sl. 4. Zavisnost  $P_L$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 500 o/min



Sl. 5. Zavisnost  $P_{Cu}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 500 o/min



Sl. 6. Zavisnost  $P_{Fe}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima pri brzini od 500 o/min

Na slici 4 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje  $i_{od}$  pri brzini od 500 o/min. Jasno se može videti da se

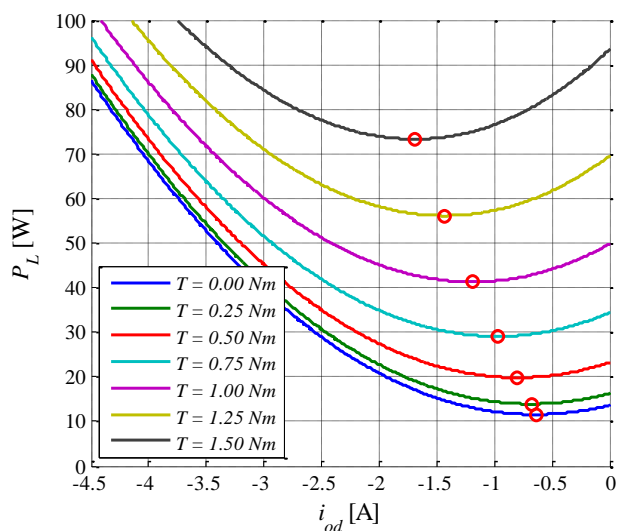
povećanjem negativne struje  $i_{od}$  povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Sa slike 5 može se videti da se povećanjem negativne struje  $i_{od}$  smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli I predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri malim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje  $i_{od}$  kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 13%.

**TABELA I. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA MALIM BRZINAMA**

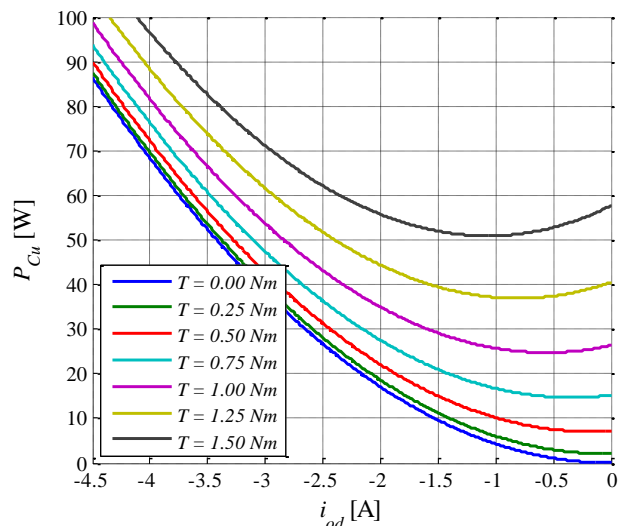
T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	$P_L$ pri $i_{od} = 0$	$P_L$ min	$\Delta P_L$ [%]
0	13,6	1,28	1,69
0,25	3,17	3,11	1,77
0,50	8,18	7,93	2,98
0,75	16,33	15,52	4,97
1,00	27,62	25,56	7,45
1,25	42,06	37,77	10,20
1,50	59,63	51,84	13,07

### B. Srednje brzine obrtanja rotora

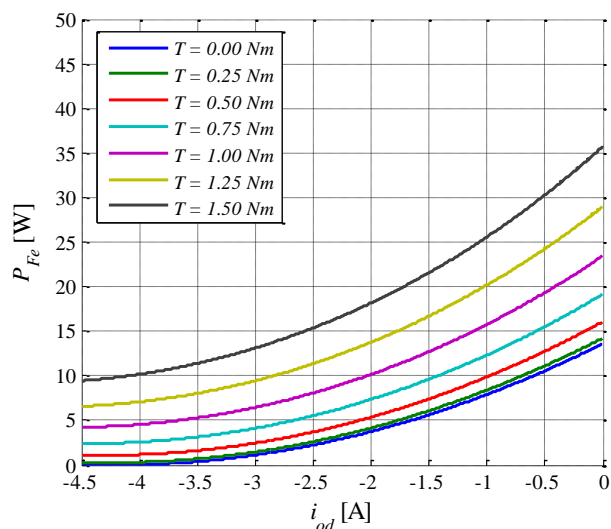
Na slici 3 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje  $i_{od}$  za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 3000 o/min. Jasno se može videti da postoje takve struje  $i_{od}$  kojima se ostvaruju minimalni gubici za pri svakom opterećenju.



Sl. 7. Zavisnost  $P_L$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 3000 o/min



Sl. 8. Zavisnost  $P_{Cu}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 3000 o/min



Sl. 9. Zavisnost  $P_{Fe}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima pri brzini od 3000 o/min

Na slici 4 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje  $i_{od}$  pri brzini od 3000 o/min. Jasno se može videti da se negativnijom strujom  $i_{od}$  povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Na slici 5 može se videti da se negativnijom strujom  $i_{od}$  smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli II predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri srednjim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje  $i_{od}$  kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 21%.

**TABELA II. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA SREDNJIM BRZINAMA**

T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	$P_L$ pri $i_{od} = 0$	$P_L$ min	$\Delta P_L$ [%]
0	13,66	11,57	15,32
0,25	16,31	13,92	14,67

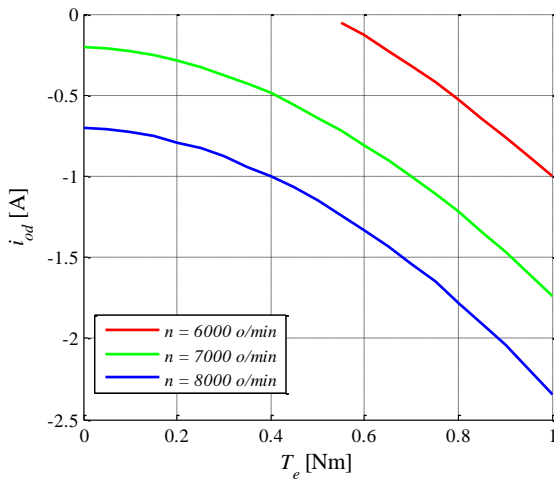
T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	$P_L$ pri $i_{od} = 0$	$P_L$ min	$\Delta P_L$ [%]
0,50	23.22	19.83	14.59
0,75	34.39	29.07	15.49
1,00	49.82	41.28	17.13
1,25	69.50	56.14	19.23
1,50	93.44	73.30	21.55

### C. Velike brzine obrtanja rotora

Maksimalni momenat koji motor može da razvije zavisi od strujnih ( $I_{max}$ ) i naponskih ( $U_{max}$ ) ograničenja invertora. Strujno ograničenje je dominantno na malim, dok je naponsko na velikim brzinama obrtanja. Naponsko ograničenje može se prestaviti kao:

$$v_d^2 + v_q^2 \leq U_{max} (U_{DC} / \sqrt{3}) \quad (15)$$

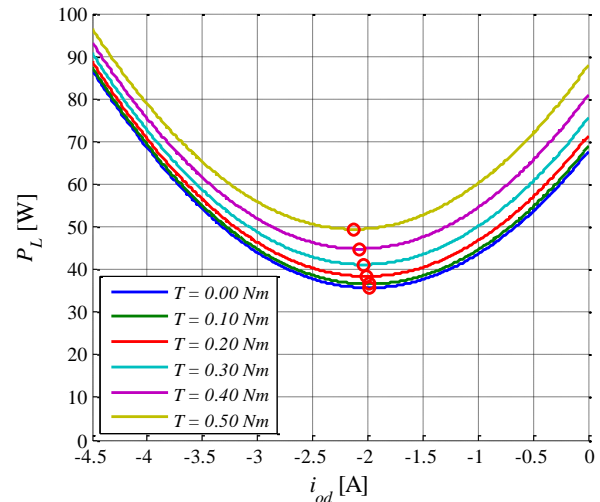
gdje je  $U_{DC}$  napon jednosmernog međukola.



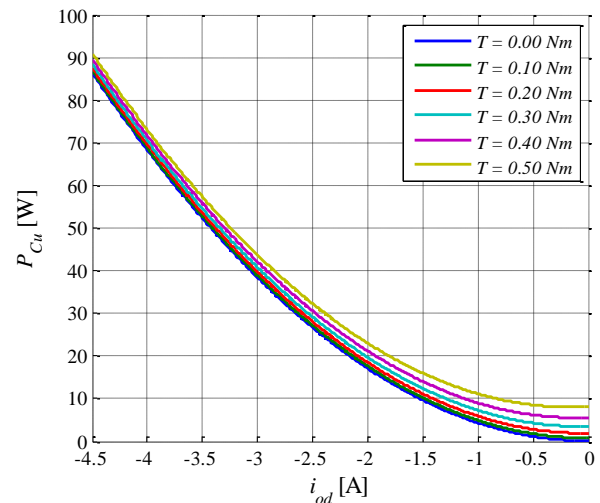
Sl. 10. Struja iod pri kojoj se omogućava rad pogona uz poštovanje limita napona pri različitim opterećenjima i brzinama obrtanja

Na slici 10 prikazana je zavisnost struje  $i_{od}$ , pri kojoj pogon radi na granici naponskog ograničenja, od opterećenja pri različitim brzinama obrtanja. Može se primetiti da pri brzini obrtanja od 6000 o/min pogon radi sa strujom  $i_{od}$  jednakoj nuli do opterećenja od 0,55 Nm, a nakon toga aktivira se naponsko ograničenje. Pri brzini obrtanja od 7000 o/min i 8000 o/min aktivno je naponsko ograničenje čak i kad je pogon neopterećen.

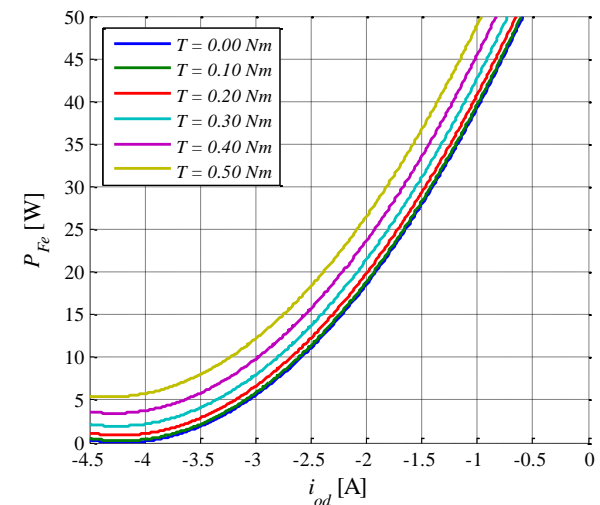
Na slici 11 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje  $i_{od}$  za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 8000 o/min. Jasno se može videti da postoje takve struje  $i_{od}$  kojima se ostvaruju minimalni gubici za pri svakom opterećenju.



Sl. 11. Zavisnost  $P_L$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 8000 o/min



Sl. 12. Zavisnost  $P_{Cu}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima i brzini od 8000 o/min



Sl. 13. Zavisnost  $P_{Fe}$  od  $i_{od}$  pri različitim opterećenjima pri brzini od 8000 o/min

Na slici 12 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje i<sub>od</sub> pri brzini od 8000 o/min. Jasno se može videti da se negativnijom strujom i<sub>od</sub> povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Na slici 13 može se videti da se negativnijom strujom i<sub>od</sub> smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli III predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri srednjim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje i<sub>od</sub> kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 27%.

**TABELA III. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA VELIKIM BRZINAMA**

T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	<i>P<sub>L</sub></i> pri <i>i<sub>od</sub></i> = 0 ili <i>i<sub>od</sub></i> naponskog limita	<i>P<sub>L</sub></i> min	$\Delta P_L$ [%]
0	49,14	35,70	27,35
0,10	49,53	36,57	26,17
0,20	50,55	38,39	24,06
0,30	52,20	41,15	21,18
0,40	54,51	44,84	17,74
0,50	57,47	49,43	13,99
0,60	61,16	54,91	10,21

#### IV. ZAKLJUČAK

Kontrolabilni gubici u motorima naizmenične struje su gubici u bakru i gubici u gvožđu. Računarskim simulacijama pokazano je da postoji mogućnost smanjenja kontrolabilnih gubitaka u naizmeničnim motorima korišćenjem odgovarajućih komponenti vektora struje statora. Struja d- ose kojom se ostvaruju minimalni kontrolabilni gubici je uvek više negativna od konvencionalnog upravljanja, što dovodi do smanjenja fluksa u motoru, a samim tim i do manjih gubitaka u gvožđu. U isto vreme se povećaju gubici u bakru, ali su ukupni kontrolabilni gubici manji. Ako se uporede razlike u snazi gubitaka na različitim opterećenjima i pri različitim brzinama može se zaključiti da se u pogonu već mašine može uštedeti značajna snaga tokom samo jednog radnog ciklusa.

#### ZAHVALNICA

Rad je sponzorisan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta III 042004.

#### LITERATURA

- [1] M. Gecic, M. Kapetina, D. Marcetic, "Energy Efficient Control of High Speed IPMSM Drives - A Generalized PSO Approach," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.16, no.1, pp.27-34, 2016.
- [2] Standard IEC 60034-30, 2010: Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single speed three-phase cage induction motors.
- [3] Direktive 2005/32/EC, Commission of the European Communities with regard to ecodesign requirements for electric motors and their variable speed drives, Brussels 2005.
- [4] Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products
- [5] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hirasa, T., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.41, no.5, pp.511,517, Oct 1994.
- [6] Jang-Mok Kim; Seung-Ki Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.1, pp.43,48, Jan/Feb 1997.
- [7] A. Rubaai, D. Ricketts and M. D. Kankam, "Development and Implementation of an Adaptive Fuzzy-Neural Network Controller for Brushless Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 2, pp. 441-447, March/April 2002.

#### ABSTRACT

In this paper a model of a synchronous machine with permanent magnets on the rotor is presented, with included iron losses. Based on the model, the possibilities of minimizing the total controllable electrical losses of the machine were analyzed. In computer simulations of a motor suitable for use in home appliance, it has been shown that by selecting the corresponding d component of the stator current vector, it is possible to minimize total controllable electrical losses.

#### ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF MINIMIZING THE LOSSES OF PMSM USED IN HOME APPLIANCE BASED ON THE MODEL OF LOSSES

Darko Marčetić, Marko Gecić, Petar Matic