

# Uticaj injektiranja jednosmernog signala za merenje temperature na zasićenje asinhronog motora

Bogdan Brković, Miloš Ječmenica, Zoran Lazarević

Katedra za energetske pretvarače i pogone  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija

[brkovic@etf.rs](mailto:brkovic@etf.rs), [jecmenica@etf.rs](mailto:jecmenica@etf.rs), [lazarevic@etf.rs](mailto:lazarevic@etf.rs)

Saša Štatkic

Katedra za elektroenergetiku  
Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka  
Kosovska Mitrovica, Srbija

[sasa.statkic@pr.ac.rs](mailto:sasa.statkic@pr.ac.rs)

*Sažetak*—Jednosmerna komponenta struje se injektira radi merenja temperature namotaja statora bez prekida napajanja i zaustavljanja motora. Uprkos tome što je vrednost ove struje najčešće značajno manja od nominalne struje motora, istraživanja ukazuju na to da njen uticaj na zasićenje magnetskog kola mašine i valovitost momenta može biti značajan. U ovom radu je izvršena analiza uticaja superponirane jednosmerne komponente struje na zasićenje magnetskog kola trofaznog asinhronog motora. Analiza je sprovedena analitički i primenom metode konačnih elemenata. Pokazano je da injektiranje jednosmerne komponente struje ima relativno mali efekat na povećanje zasićenja magnetskog kola. Dobro poklapanje rezultata dobijenih primenom analitičkog modela i metode konačnih elemenata ukazuje na mogućnost primene razvijenog analitičkog modela na slične probleme, čime bi se značajno skratilo vreme potrebno za izvršavanje proračuna uz zadovoljavajuću tačnost.

*Ključne reči*—asinhroni motor; merenje temperature; injektiranje signala; zasićenje; analitički model; metoda konačnih elemenata

## I. UVOD

Merenje temperature namotaja asinhronih mašina u trajnom radu je veoma značajno sa aspekta njihove zaštite. Najveći broj ispada kod asinhronih mašina uzrokovan je termičkim oštećenjem izolacije statora [1]. Tradicionalne metode za termičku zaštitu namotaja bazirane su na primeni releja sa jednom vremenskom konstantom, koji ne mogu na adekvatan način da uvažavaju promenljive uslove hlađenja mašine. S obzirom na to, javila se potreba za formiranjem zaštite bazirane na složenijim termičkim modelima. Primena ovakvih modela je u prošlosti bila ograničena na fazu projektovanja električnih mašina. U novije vreme, sa razvojem mikroprocesora, javila se mogućnost za primenu složenih termičkih modela u realnom vremenu za potrebe termičke zaštite [2], [3]. Nedostaci zaštitnih metoda baziranih na termičkom modelu su teškoće u proračunu parametara modela kao i zavisnost vrednosti parametara od temperature i uslova hlađenja. Razvijen je veliki broj metoda koje se baziraju na električnom modelu motora i oslanjaju se na proračun temperature na osnovu merenja otpornosti namotaja. Najveći broj ovih metoda baziran je na injektiranju jednosmernog ili naizmjeničnog strujnog signala u namotaj statora [4]-[8].

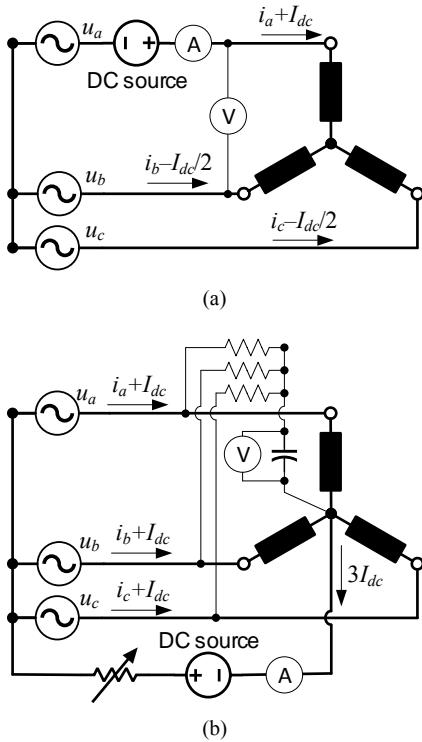
U literaturi postoje indikacije da injektiranje jednosmerne komponente struje u namotaje motora dovodi do povećanog zasićenja magnetskog kola [9] i do pojave valovitosti momenta motora [4]. Injektiranje jednosmerne struje na način predložen u [8] ne dovodi do pojave valovitosti momenta, mada je ova tvrdnja bazirana na pojednostavljenom analitičkom proračunu i zahteva dodatnu verifikaciju.

U ovom radu je detaljno analiziran uticaj injektiranja jednosmerne komponente struje u namotaje statora na zasićenje magnetskog kola. Razmatrane su dve metode za merenje temperature koje podrazumevaju različite načine injektiranja jednosmerne struje. Proračun raspodele polja u mašini sproveden je primenom razvijenog analitičkog postupka i metode konačnih elemenata (FEM – *Finite Element Method*). Dobijeni rezultati pokazuju da je primena metoda za merenje temperature statora baziranih na injektiranju jednosmernog signala opravdana sa aspekta zasićenja.

## II. OPIS METODA ZA MERENJE TEMPERATURE

U ovom radu će biti analizirane dve metode za merenje temperature namotaja statora u trajnom radu. Obe metode su predviđene za mrežno napajane motore i bazirane su na injektiranju jednosmerne komponente struje u namotaje statora. Prva metoda (Metoda 1) je bazirana na superpoziciji jednosmernog signala u jednoj fazi, dok je druga metoda (Metoda 2) bazirana na injektiranju jednosmerne komponente između zvezdišta mašine i neutralnog provodnika. U nastavku će biti dat kratak opis ove dve metode, tačnije, samo onih njihovih aspekata koji su značajni za analizu elektromagnetskih pojava u mašini.

Metoda 1 je bazirana na dodavanju jednosmerne komponente napona u jednoj fazi razvijena je i opisana u [7]. Metoda je bazirana na injektiranju jednosmerne komponente struje dodavanjem jednosmernog naponskog izvora u jedan od linijskih provodnika. Jednosmerni izvor je formiran pomoću MOSFET tranzistora sa paralelno vezanim otpornikom, pri čemu tranzistor provodi tokom jedne polovine periode mrežnog napona. Usled postojanja dodatne jednosmerne komponente napona, u sve tri faze se javlja jednosmerni ofset struje. Principijska šema za injektiranje struje i merenje jednosmerne komponente struje i napona primenom Metode 1 prikazana je na Sl. 1 (a). Može se uočiti da je u sve tri faze



Slika 1. Šeme veza za merenje temperature injektiranjem jednosmerne komponente struje: (a) Metoda 1, (b) Metoda 2

prisutna jednosmerna komponenta struje, pri čemu je ova komponenta u fazi  $a$  jednaka  $I_{dc}$ , a u fazama  $b$  i  $c$   $-I_{dc}/2$ . Merenje otpornosti se vrši merenjem jednosmerne komponente struje u fazi  $a$  i jednosmerne komponente međufaznog napona, a zatim se na osnovu proračunate otpornosti namotaja i vrednosti otpornosti pri poznatoj temperaturi (najčešće temperaturi ambijenta) određuje temperatura namotaja.

Metoda 2 je bazirana na formiranju izvora jednosmerne struje između zvezdišta motora i neutralnog provodnika i opisana je u [8]. Principijska šema za injektiranje struje i merenje jednosmerne komponente struje i napona primenom Metode 2 prikazana je na Sl. 1 (b). Na opisani način ostvaruje se jednaka vrednost jednosmerne komponente struje u sve tri faze motora. Za primenu ove metode je neophodno da zvezdište motora bude dostupno. Pored toga, oprema potrebna za formiranje strujnog izvora čini ovu metodu nešto zahtevnijom za izvođenje u odnosu na Metodu 1. S druge strane, potrebna vrednost jednosmerne komponente struje je znatno manja nego kod Metode 1, zahvaljujući jednostavnom pristupu za merenje jednosmerne komponente napona faznih namotaja.

### III. ANALITIČKI PRORAČUN

U ovom poglavlju biće opisan pojednostavljeni analitički postupak za proračun raspodele polja u asinhronoj mašini prilikom injektiranja jednosmerne komponente struje. Pri tome će biti naglašene suštinske razlike u raspodeli polja u zavisnosti od toga da li se primenjuje Metoda 1 ili Metoda 2. U

predstojećoj analizi smatraće se da su površine statora i rotora glatke, tj. bez žlebova. Biće analizirani samo osnovni prostorni harmonici magnetskog polja, osim u slučaju Metode 2, iz razloga koji će biti izloženi u nastavku.

Kada je mašina napajana trofaznim simetričnim sistemom napona i da radi u ustaljenom stanju, u međugvožđu postoji obrtno polje čija je radialna komponenta data izrazom:

$$H_{3f}(\theta, t) = \hat{H}_{3f} \cos(\theta - \omega t), \quad (1)$$

gde je  $\theta$  ugona pozicija posmatrane tačke u međugvožđu u odnosu na osu faze  $a$ ,  $\hat{H}_{r3f}$  amplituda osnovnog harmonika radialne komponente jačine polja:

$$\hat{H}_{r3f} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N_s k_{w1} I_n \sqrt{2}}{2p\delta} \quad (2)$$

gde je  $N_s$  broj navojaka po fazi statora,  $\delta$  širina međugvožđa,  $p$  broj pari polova i  $k_{w1}$  navojni sačinilac statorskog namotaja za osnovni harmonik.

Injektirana jednosmerna komponenta struje stvara stacionarno magnetsko polje. Kada se injektiranje vrši prema Metodi 1, magnetopobudna sila (mps) statora data je izrazom:

$$F_{dc1,s}(\theta) = \hat{F}_{dc1,s} \cdot \cos\theta = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N_s k_{w1} I_{dc}}{2p} \cos\theta \quad (3)$$

Prema [10], mps u slučaju injektiranja jednake jednosmerne struje u sve tri faze prema Metodi 2 data je izrazom:

$$F_{dc2,s}(\theta) = \hat{F}_{dc2,s} \cdot \cos 3\theta = \frac{4}{\pi} \frac{N_s k_{w3} I_{dc}}{2p} \cos 3\theta \quad (4)$$

gde je  $k_{w3}$  navojni sačinilac za treći prostorni harmonik polja. Primititi da mps koju proizvodi statorski namotaj u slučaju kada su struje faza međusobno jednake sadrži samo treći prostorni harmonik. Drugim rečima, polje koje stvaraju ovakve struje odgovara mašini sa tri puta većim brojem polova.

Magnetopobudne sile date izrazima (3) i (4) predstavljaju samo doprinos statora. Međutim, s obzirom na to da je polje statora stacionarno, a rotor se obrće brzinom koja je bliska sinhronoj, postojaće reakcija rotora koja će doprineti tome da ukupna jačina polja u međugvožđu usled injektirane jednosmerne komponente struje bude manja od datih vrednosti. U slučaju Metode 2 ovo važi ako na rotoru postoji kavezni namotaj, jer je u tom slučaju moguće uspostavljanje nulte komponente struje. Prema ekvivalentnim kolima za dinamičko kočenje asinhronog motora jednosmernom strujom datim u [11], može se ustanoviti da će rezultatna mps u slučaju Metode 1 biti jednaka:

$$F_{dc1}(\theta) = \hat{F}_{dc1,s} \cdot \left| 1 - \frac{j\omega_r L_m}{R_r' + j\omega_r(L_m + L_r')} \right| \cos(\theta - \varphi_1) \quad (5)$$

a u slučaju Metode 2:

$$F_{dc2}(\theta) = \hat{F}_{dc2,s} \cdot \left| 1 - \frac{\frac{1}{3} \cdot j3\omega_r L_m}{R_r' + j3\omega_r(L_m + L_r')} \right| \cos(3\theta - \varphi_2) \quad (6)$$

U prethodnim izrazima,  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  su prostorni pomeraji rezultantne mps u odnosu na statorsku usled reakcije rotorskog kaveza. Ovi prostorni pomeraji nisu od značaja za analizu koja se sprovodi u ovom radu.

Radi procene zasićenja, potrebno je odrediti ukupnu jačinu magnetskog kola u međugvožđu i u jarmu. Pod ukupnom jačinom polja u međugvožđu podrazumeva se suma radijalnih komponenti obrtnog polja i stacionarnog polja nastalog usled jednosmerne komponente struje. Tangencijalna komponenta se u pogledu uticaja na zasićenje može zanemariti. Zasićenje će biti kvantifikovano kroz pad magnetskog napona u jarmu statora. Kako bi se odredio pad magnetskog napona u jarmu, potrebno je primeniti sledeći postupak:

1. Odrediti raspodelu jačine obrtnog magnetskog polja  $H_{3f}(\theta, t)$  i stacionarnog polja  $H_{dc1}(\theta)$ :

$$H_{dci} = F_{dci} / \delta, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

2. Odrediti odgovarajuće raspodele magnetske indukcije u međugvožđu:

$$B_{3f}(\theta, t) = \mu_0 \cdot H_{3f}(\theta, t) \quad (8)$$

$$B_{dci}(\theta, t) = \mu_0 \cdot H_{dci}(\theta, t), \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

gde je  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  permeabilnost vazduha.

3. Odrediti raspodele fluksa u jarmu koji odgovara izračunatim raspodelama indukcije:

$$\Phi_{ys3f}(\theta, t) = \int_{\theta_0}^{\theta} B_{3f}(\xi, t) r l d\xi, \quad B_{3f}(\theta_0 - \pi/2, t) = 0 \quad (10)$$

$$\Phi_{ysdci}(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta} B_{dci}(\xi) r l d\xi, \quad B_{dci}(\theta_0 - \pi/2) = 0 \quad (11)$$

$$B_{dc2}(\theta_0 - \pi/6) = 0$$

gde je  $r$  poluprečnik međugvožđa i  $l$  aksijalna dužina mašine.

4. Odrediti raspodele indukcije u jarmu:

$$B_{ys3f}(\theta, t) = \Phi_{ys3f}(\theta, t) / h_{ys} \quad (12)$$

$$B_{ysdci}(\theta) = \Phi_{ysdci}(\theta) / h_{ys}, \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

gde je  $h_{ys}$  visina jarma statora.

5. Na osnovu  $B(H)$  karakteristike limova odrediti raspodelu jačine polja u jarmu:

$$H_{ys}(\theta, t) = H(B_{ys3f}(\theta, t) + B_{ysdci}(\theta)), \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

6. Odrediti pad magnetskog napona u jarmu kao:

$$U_{ys}(t) = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} |H_{ys}(\theta, t)| \cdot r_{ys} d\theta / p \quad (15)$$

gde je  $r_{ys}$  poluprečnik srednje linije jarma.

Primititi da je u (7) implicitno pretpostavljeno da je magnetski otpor vazduha mnogo veći od magnetskog otpora feromagnetskih delova magnetskog kola, tj. da značajan pad magnetskog napona postoji samo u vazduhu. Ova pretpostavka nije prihvatljiva ukoliko je jezgro mašine u dubokom zasićenju.

#### IV. FEM ANALIZA

Radi preciznije analize dodatnog zasićenja uzrokovanog injektiranjem jednosmerne komponente struje, formiran je model asinhronne mašine u softverskom paketu FEMM 4.2. U FEM analizi je bilo neophodno istovremeno uvažiti uticaj obrtnog polja koje stvaraju simetrične naizmenične struje i uticaj stacionarnog polja koje stvara injektirana jednosmerna struja. Softver FEMM 4.2 omogućava zadavanje proizvoljne učestanosti struja namotaja, međutim, nije moguće istovremeno zadati struje različitih učestanosti u jednoj simulaciji. Zbog toga je FEM analizu potrebno vršiti u tri koraka:

##### 1) Naizmenična analiza, nominalni režim

Učestanost simulacije treba podesiti na učestanost nominalnog klizanja motora ( $s_n f_s$ ,  $f_s = 50$  Hz). Ovo je neophodno jer nije moguće uvažiti brzinu obrtanja rotora. Struju statorskih provodnika treba podesiti na nominalnu vrednost. Na ovaj način, indukovane struje u štapovima rotora i rezultantna raspodela polja u mašini odgovaraće vrednostima koje bi se imale u nominalnom radnom režimu. Izvesna greška se čini zbog toga što će gubici u gvožđu statora biti manji nego što bi to bio slučaj u realnom motoru. Razlog za to je to što je učestanost promene indukcije u gvožđu statora u FEM modelu jednaka učestanosti klizanja, dok je u realnosti jednaka učestanosti napajanja. Simulacija će biti izvršena za različite početne faze struja statora, između 0 i 180°, sa korakom od 10°. Ovo je neophodno kako bi se obuhvatila promena fluksa u mašini tokom jedne poluperiode. U svakom koraku je potrebno odrediti i memorisati vrednosti struja rotorskih štapova. Na ovaj način će u koraku 3) biti moguća reprodukcija raspodele obrtnog polja koja odgovara nominalnom režimu. U svakom

koraku treba proračunati i pad magnetskog napona u jarmu statora.

### 2) Naizmjenična analiza, injektirani signal

U ovom koraku treba uvažiti efekat injektirane jednosmerne komponente struje. Prilikom podešavanja parametara modela potrebno je izabrati učestanost koja odgovara nominalnoj brzini obrtanja –  $(1-s_n)f_s$  – kako bi se na odgovarajući način uvažila reakcija rotora na stacionarno polje koje stvara injektirana jednosmerna komponenta struje. Pri tome, treba imati u vidu da je ovo polje zapravo stacionarno u odnosu na stator, tako da pri izboru materijala za jezgro statora treba izabrati materijal bez gubitaka, što se postiže podešavanjem provodnosti materijala na jako malu vrednost. Kao i u prethodnom koraku, potrebno je posle završetka simulacije sačuvati struje rotora, kako bi se u koraku 3) mogla reprodukovati raspodela polja koja odgovara ovom režimu.

### 3) Jednosmerna analiza, superponirane struje

Učestanost simulacije treba podesiti na 0 Hz. Statorskim i rotorskim provodnicima treba dodeliti sumu vrednosti struja iz koraka 1) i 2). Na ovaj način je uvažena reakcija rotora bez obzira na to što je učestanost simulacije 0 Hz. Pri tome, potrebno je izvršiti set simulacija koje odgovaraju različitim faznim stavovima struja statora iz koraka 1). U svakom koraku treba odrediti i sačuvati raspodelu polja u mašini i pad magnetskog napona u jarmu statora.

Primititi da se simulacije izvršavaju za samo jedan položaj rotora. Svaki od setova opisanih simulacija mogao je biti izvršen za različite ugaone položaje rotora. Na ovaj način bi se uvažio uticaj promenljive permeanse između statora i rotora usled ožlebljenosti, koja bi u realnosti dovela do izvesnih razlika u raspodeli polja. Međutim, ove razlike su od malog značaja sa praktičnog aspekta, a vreme potrebno za sprovođenje dodatnih simulacija bi bilo višestruko veće, tako da je opravdano zanemariti uticaj promene položaja rotora.

## V. REZULTATI I DISKUSIJA

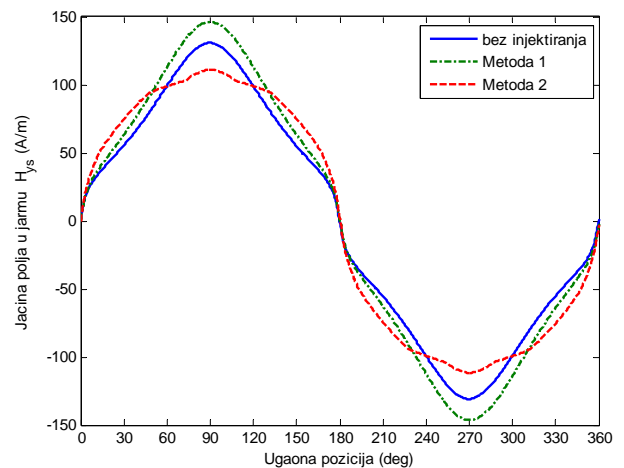
Analizirana je trofazna četvoropolna asinhrona mašina sa sledećim nominalnim podacima:  $P_n = 4$  kW,  $U_n = 380$  V,  $I_n = 8.9$  A,  $n_n = 1440$  o/min. Osnovne dimenzije analizirane mašine date su u Tabeli I.

TABELA I. OSNOVNE DIMENZIJE MAŠINE

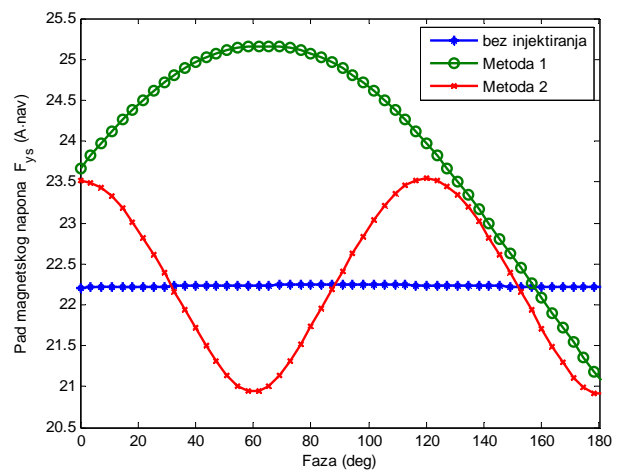
Dimenzija		Vrednost
Parametar	Oznaka	
poluprečnik međugvožđa	$r$ (mm)	58
spoljni poluprečnik statora	$r_{se}$ (mm)	92
dužina međugvožđa	$\delta$ (mm)	0.5
aksijalna dužina mašine	$l$ (mm)	125
broj žlebova statora	$Q_s$ ( $l$ )	36
broj žlebova rotora	$Q_r$ ( $l$ )	28
tip namotaja	/	dvoslojni
broj pari polova	$2p$ ( $l$ )	4

Rezultati su dobijeni primenom analitičkog postupka opisanog u poglavlju III i primenom metode konačnih elemenata opisane u poglavlju IV. Biće prikazani rezultati relevantni za kvantifikaciju zasićenja – raspodela jačine magnetskog polja u jarmu i pad magnetskog napona u jarmu. Raspodela jačine polja biće prikazana za slučaj kada je uticaj injektirane jednosmerne struje najizraženiji, a pad magnetskog napona biće prikazan u funkciji faze statorskih struja, tj. ugaone pozicije obrtnog polja. U oba slučaja, analiziran je režim u kom je motor nominalno opterećen, a injektirana jednosmerna struja  $I_{dc} = 2$  A.

Na Sl. 2 su prikazani rezultati dobijeni primenom analitičke metode. Na Sl. 2 (a) prikazani su dijagrami jačine magnetskog polja u jarmu statora u slučajevima kada injektirana komponenta struje dovodi do najvećeg zasićenja, tj. do najvećeg pada magnetskog napona u jarmu. Na Sl. 2 (b) može se uočiti da se pad magnetskog napona menja periodično sa promenom faze naizmjeničnih struja statora, tj. sa obrtanjem

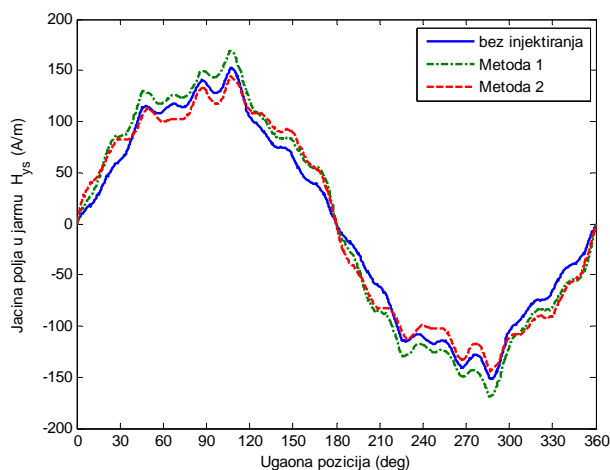


(a)

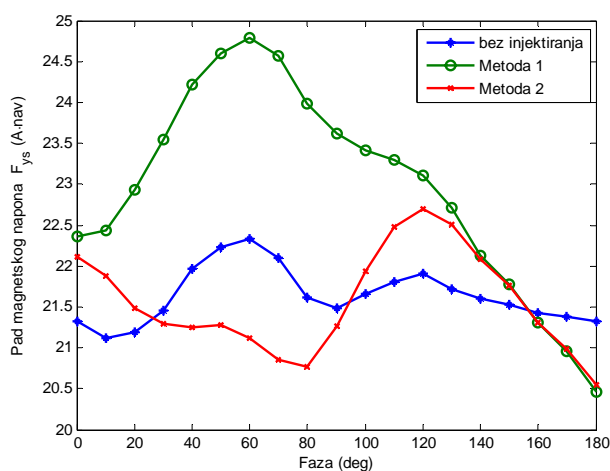


(b)

Slika 2. Rezultati dobijeni primenom analitičke metode: (a) jačina magnetskog polja u jarmu statora; (b) pad magnetskog napona u jarmu statora



(a)



(b)

Slika 3. Rezultati dobijeni primenom metode konačnih elemenata: (a) jačina magnetskog polja u jarmu statora; (b) pad magnetskog napona u jarmu statora

polja koje ove struje stvaraju. Pri tome, učestanost promene jačine polja i posledične promene pada magnetskog napona je tri puta veća u slučaju primene Metode 2, a usled trostruko veće prostorne učestanosti stacionarnog fluksa u tom slučaju (pogledati (6)).

Na Sl. 3 su prikazani rezultati dobijeni primenom metode konačnih elemenata. Može se uočiti dobro poklapanje ovih rezultata sa rezultatima dobijenim primenom analitičke metode. Jedna od najuočljivijih razlika je varijacija pada magnetskog napona u slučaju kada postoji samo naizmenična komponenta struje. Ovaj fenomen je posledica promenljive permeanse usled ožlebljenosti statora i rotora.

Na osnovu rezultata dobijenih primenom analitičkog i FEM proračuna može se zaključiti da ne postoji značajno povećanje zasićenja u mašini usled injektiranja jednosmerne struje. Pri tome je jednosmerna komponenta struje korišćena u analizi imala vrednost od približno 20% amplitude nominalne

struje, tako da se moglo očekivati značajno povećanje fluksa i zasićenja u mašini. Analiza prikazana u [9] takođe navodi na ovakav zaključak. Međutim, fluks jednosmerne struje je značajno prigušen reakcijom rotorskog kaveza, čime je uticaj ovih struja na resultantnu raspodelu polja, a samim tim i na zasićenje, značajno umanjen.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je povećanje pada magnetskog napona veće u slučaju primene Metode 1. Reakcija rotorskog kaveza je izraženija u slučaju Metode 1 u odnosu na Metodu 2 (pogledati (5), (6)), tako da je resultantna jačina polja veća u slučaju Metode 2. Međutim, usled veće prostorne učestanosti polja, integral jačine polja, tj. pad magnetskog napona, je manji u slučaju Metode 2.

## VI. ZAKLJUČAK

Sprovedena je analiza uticaja injektiranja jednosmerne komponente struje u namotaje statora na zasićenje magnetskog kola asinhronne mašine. Potreba za injektiranjem jednosmerne komponente struje javlja se u slučajevima kada je potrebno vršiti estimaciju temperature namotaja tokom rada mašine. Rezultati dobijeni analitičkim proračunom i primenom metode konačnih elemenata pokazali su da injektiranje jednosmerne komponente struje dovodi do povećanog zasićenja magnetskog kola u određenim intervalima. Međutim, ispostavilo se da je uticaj na zasićenje praktično zanemarljiv, tako da je primena ovakvih metoda opravdana sa tog aspekta. Pokazano je i da se injektiranjem jednosmerne struje između zvezdišta motora i neutralnog provodnika ovaj efekat može dodatno umanjiti. Postignuto je dobro poklapanje rezultata dobijenih primenom analitičkog postupka i metode konačnih elemenata, što ukazuje na mogućnost primene analitičkog postupka za relativno pouzdanu procenu zasićenja u mašini u različitim režimima rada.

U daljem radu, autori će se posvetiti proširenju analitičkog modela i FEM procedure u cilju proračuna valovitosti momenta izazvane injektiranjem jednosmerne struje. Na osnovu dobijenih rezultata biće formiran složeni dinamički model čija će tačnost biti eksperimentalno verifikovana.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta TR 33016 "Istraživanje, razvoj i primena programa i mera energetske efikasnosti elektromotornih pogona".

## LITERATURA

- [1] P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, pp. 34–46, Jan-Feb 2011.
- [2] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, "A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 945–952, July/August 2003.
- [3] P. H. Mellor, D. R. Turner, "Real time prediction of temperatures in an induction motor using a microprocessor", Electric Machines & Power Systems, 15:4-5, pp. 333-352, 1988.

- [4] P. R. Matić, M. A. Gecić, Đ. M. Lekić, D. P. Marčetić, "Thermal protection of vector-controlled IM drive based on DC current injection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 2082-2089, April 2015.
- [5] S. Cheng, Y. Du, J. A. Restrepo, P. Zhang, T. G. Habetler, "A nonintrusive thermal monitoring method for induction motors fed by closed-loop inverter drives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 4122-4131, February 2012.
- [6] P. Zhang, Y. Du, B. Lu, T. G. Habetler, "A DC signal injection-based thermal protection scheme for soft-starter-connected induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, pp. 1351-1358, May 2009.
- [7] S. B. Lee, T. G. Habetler, "An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 685-694, May/June 2003.
- [8] A. H. Albla, B. M. Brkovic, Z. M. Lazarevic, "Online temperature monitoring of a grid connected induction motor", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 93, pp. 276-282, 2017.
- [9] P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Lu, "Magnetic effects of DC signal injection on induction motors for thermal evaluation of stator windings", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1479-1489, May 2011
- [10] G. Bottiglieri, A. Consoli, G. Scarcella, G. Scelba, "Zero-sequence flux and voltage of induction motors supplied with low-and high-frequency currents", *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, pp. 1201-1207, Antalya, Turkey, May 2007
- [11] C. Grantham, "Zero-sequence dynamic braking and parameter determination", *IEE Proceedings*, vol. 130, pp. 392-398, November 1983.

#### ABSTRACT

Online temperature monitoring of induction motor winding temperature can be performed by injecting DC current into the stator windings. Even though the injected current is usually of much lower value compared to the rated current, it is indicated by numerous authors that the injected signal may have adverse effects on machine saturation and torque. In this paper, the influence of DC current injection on the magnetic circuit saturation of an induction machine is analyzed. An analytical model and finite element method-based procedure are used for this purpose. It is shown that DC current injection has relatively low influence on the magnetic circuit saturation. A good match between the results of the analytical model and the finite element model indicate the possibility of extending the applicability of the developed analytical model to similar problems, thereby significantly reducing the calculation time while maintaining the required accuracy.

#### **INDUCTION MOTOR SATURATION CAUSED BY DC SIGNAL INJECTION-BASED TEMPERATURE MEASUREMENT**

Bogdan Brković, Miloš Ječmenica, Zoran Lazarević, Saša Štatkic