Prošireni model šestofazne asinhrone mašine

Stevan Stanišić, Bogdan Brković, Miloš Ječmenica, Zoran Lazarević Katedra za energetske pretvarače i pogone Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija

ss165035p@student.etf.bg.ac.rs, brkovic@etf.bg.ac.rs, jecmenica@etf.bg.ac.rs, lazarevic@etf.bg.ac.rs

Sažetak— U radu je prikazan model šestofazne asinhrone mašine koji uvažava efekat zasićenja magnetskog kola na putu glavnog fluksa, efekat zasićenja na putevima rasutog fluksa, kao i pojavu potiskivanja struja u kaveznom rotoru. Prikazan je način na koji je modelovan svaki od prethodnih efekata, kao i kompletan postupak formiranja modela u Matlab/Simulink okruženju na primeru asimetričnog šestofaznog kaveznog asinhronog motora. Izvršeno je poređenje dobijenih rezultata osnovnog i proširenog modela šestofazne mašine što je od značaja pri tranzijentnim i nesimetričnim režimima rada, u kojima se uvažava pojava zasićenja i potiskivanja struja u rotoru.

Ključne reči – šestofazna asinhrona mašina, modelovanje, zasićenje na putu glavnog fluksa, zasićenje na putu rasutog fluksa, potiskivanje struja u rotoru

I. Uvod

Mašine naizmenične struje sa više od tri faze (višefazne mašine) koriste iste principe za generisanje obrtnog polja i momenta kao i trofazne [1]. Prednosti višefaznih u odnosu na trofazne mašine se ogledaju u povećanoj gustini momenta, većoj preopteretljivosti i pouzdanosti pri nastanku kvara, u smanjenju gubitaka i valovitosti [2]. Statorski namotaj višefaznih mašina se formira tako što su fazni namotaji po obimu mašine međusobno adekvatno prostorno pomereni za ugao koji odgovara faznom pomeraju sistema napona napajanja, odnosno struja. Shodno brzom trendu razvoja ove oblasti i implementaciji višefaznih mašina u industriji, javlja se potreba za njihovim detaljnijim modelovanjem. Precizno modelovanje je neophodno kako sa aspekta upravljanja, tako i sa aspekta simulacije rada mašine radi predikcije performansi [3]. Pristup modelovanju višefaznih asinhronih mašina sličan je kao kod modelovanja trofaznih asinhronih mašina, gde se uvodi transformacija faznih veličina u veličine u d-q domenu, a nakon toga definišu naponske jednačine statora i rotora. Uz dodatak Newton-ove jednačine mehaničke ravnoteže i algebarske jednačine za elektromagnetski moment formira se zatvoren sistem jednačina. U radu je prikazana polazna osnova modelovanje šestofazne asinhrone mašine, koja je za zasnovana na razmatranjima iz [4] i [5], a nakon toga su uvedeni efekti zasićenja magnetskog kola na putu glavnog fluksa i fluksa rasipanja, kao i efekat potiskivanja struja u kaveznom rotoru.

II. ZAMENSKA ŠEMA IDEALNOG MODELA ŠESTOFAZNE MAŠINE

Postoje dva osnovna tipa statorskih namotaja šestofaznih mašina: simetrični i asimetrični. Kod simetričnog tipa međusobni ugaoni pomeraj između faza je 60° električnih, i za mašine manjih snaga ovaj tip se ređe koristi. Od svih višefaznih mašina, najzastupljene u praksi su upravo šestofazne asinhrone mašine sa asimetričnim namotajem. Kod njih su dva trofazna simetrična sistema namotaja, mešusobno prostorno pomerena za najčešće 30° električnih, što je i slučaj kod mašine analizirane u ovom radu. Najčešći slučaj formiranja šestofaznog namotaja je supstitucijom trofaznog namotaja postojeće trofazne mašine. U radu je analizirana šestopolna, šestofazna mašina sa 36 žlebova i navojnim korakom koji je skraćen za jedan žleb. Prostorni raspored faznih namotaja asimetrične šestofazne mašine prikazan je šematski na Sl. 1.



Slika 1. Orijentacija faznih namotaja statora šestofazne mašine u odnosu na d-q ose

Sistem napona napajanja, za koji se smatra da je krut, dat je sledećim jednačinama:

$$v_a(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t) \tag{1.1}$$

$$v_b(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t - 2\pi/3) \tag{1.2}$$

$$v_c(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t - 4\pi/3) \tag{1.3}$$

$$v_x(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t - \pi/6) \tag{1.4}$$

$$v_{v}(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{s}t - 2\pi/3 - \pi/6)$$
 (1.5)

$$v_z(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t - 4\pi/3 - \pi/6)$$
 (1.6)

gde je frekvencija napajanja f = 50 Hz, ugaona brzina obrtanja $\omega_s = 2\pi f$, i U efektivna vrednost nominalnog faznog napona. Indeksi *a-b-c* predstavlju oznake faznih napona prvog trofaznog sistema, dok indeksi *x-y-z* predstavljaju oznake napona drugog trofaznog sistema (fazno pomeren za 30° u odnosu na prvi sistem). Transformacija faznih koordinata u *d-q* sistem, koji je nepokretan i vezan za stator, vrši se odvojeno za prvi i drugi trofazni sistem napona i struja.

Matrica transformacije prvog sistema trofaznih napona (a-b-c) šestofazne mašine u d-q sistem (u oznaci d1-q1) je prikazana kao:

$$T_{abc-d1q1} = 2/3 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$
(2.1)

Matrica transformacije drugog sistema trofaznih napona (x-y-z) šestofazne mašine u d-q sistem (u oznaci d2-q2) je prikazana kao:

$$T_{xyz-d2q2} = 2/3 \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$
(2.2)

Ove matrice se nakon množenja koeficijentom 2/3 i izostavljanja poslednje vrste (veličine nultog redosleda ne postoje, s obzirom na pretpostavku da je mreža kruta i naponi napajanja simetrični) svode na matricu (3.1), kojom se množi vektor kolona napona *a-b-c* da bi se dobili v_{q1} i v_{d1} , i matricu (3.2) kojom se množi vektor kolona napona *x-y-z* da bi se dobili naponi v_{q2} i v_{d2} , kao:

$$T_{abc-d1q1} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}$$
(3.1)

$$T_{xyz-d2q2} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & 0\\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$$
(3.2)



Slika 2. Zamenska d-q kola u stacionarnom referentnom sistemu

Naponske jednačine uprošćenog modela za q-sistem [5] glase:

$$v_{q1} = r_{s1} \cdot i_{q1} + \frac{d\lambda_{q1}}{dt}$$
(4.1)

$$_{q2} = r_{s1} \cdot i_{q2} + \frac{d\lambda_{q2}}{dt}$$
(4.2)

$$0 = r_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt}$$
(4.3)

gde su: r_{sl} – otpornost statorskog namotaja; X_{ll} – sopstvena reaktansa rasipanja jednog statorskog namotaja; X_{lm} – ukupna međusobna reaktansa rasipanja između dva statorska namotaja; X_m – reaktansa magnećenja; X_{lr} – reaktansa rasipanja rotorskog namotaja; r_r – otpornost rotorskog namotaja.

Parametri mašine r_{s1} , L_{ll} , L_{lm} , L_m , L_{lr} ', r_r ' su konstantni u uprošćenom modelu mašine. Slične jednačine važe za *d*-sistem, uz obrtanje znaka kod naponskog generatora $\omega_r \cdot \lambda_{qr}$ '.

Newton-ova mehanička jednačina glasi:

v

(

$$T_{el} - T_{load} = \frac{J}{P} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{1}{P} \cdot \mathbf{k} \cdot \omega_r$$
(4.4)

u kojoj su: T_{el} – elektromagnetni momenat; T_{load} momenat opterećenja; J – momenat inercije mašine; P – broj magnetnih polova; ω_r – električna ugaona brzina rotora; k – frikcioni koeficijent.

Dalje se rešavanjem sistema jednačina (4) uz analogne jednačine za d sistem dobijaju rešenja za flukseve u d-q sistemu, a iz njih struje statora i rotora koje se pomoću inverzne transformacije (množenjem matricama koje se dobijaju inverzijom matrica (3)) prebacuju u a-b-c i x-y-z sistem.

Nedostatak prethodno definisanog modela šestofazne mašine je taj što u njemu nije uvažena pojava zasićenja magnetskog kola, zasićenja induktivnosti rasipanja, kao i efekat potiskivanja struja u rotorskom kavezu. Ovi efekti značajno utiču na parametre zamenskog, ekvivalentnog kola, a njihovo adekvatno modelovanje je od velikog značaja za estimaciju stanja mašine pri različitim radnim režimima. Ovo je naročito od interesa za režim rada mašine kao samopobudnog generatora, koji nije ostvariv bez pojave zasićenja [6].

III. PROŠIRENJE MODELA UVAŽAVANJEM EFEKATA ZASIĆENJA I POTISKIVANJA

A. Modelovanje potiskivanja struja u kavezu rotora

Modelovanje efekta potiskivanja dodavanjem paralelnih grana u model rotora bazirano je na zaključcima iz [7] i [8], na osnovu kojih se rotorski štap deli na više sekcija sa približno uniformnom raspodelom struja i na taj način dobija preciznije predstavljanje efekta potiskivanja u tranzijentnim režimima rada. Za potrebe ovog rada mašina je modelovana sa dvostrukom paralelnom granom rotora. Određivanje parametara dvostrukog rotora se izvodi na osnovu postupka iznetog u [9] i [10], a posredstvom zasebnog programa iz [10], koji se koristi da bi se izračunao faktor q kojim se proračunava koliko svaki naredni sloj štapa rotora treba da bude visok da bi se, sa unapred zadatom podelom na n paralelno vezanih kaveza rotora (u ovom slučaju 2), najbolje modelovao efekat potiskivanja struje u štapovima rotora, a dalje, na osnovu tog parametra i izvele i brojne vrednosti parametara otpornosti i induktivnosi svake grane kojom se modeluje jedan od n paralelnih kaveza kao na Sl. 3.



Slika 3. Modelovanje rotora preko više paralelnih grana

B. Zasićenje magnetskog kola na putu glavnog fluksa

Zasićenje magnetskog kola na putu glavnog fluksa modelovano je pomoću promenljive induktivnosti magnećenja. Induktivnost magnećenja je u proširenom modelu izražena u funkciji struje magnećenja preko sledeće formule:

$$L_{m}(i_{m}) = \begin{cases} L_{m0}, & I_{m} \le 1.25 \text{ A} \\ (aI_{m} + b + c / I_{m}), & I_{m} > 1.25 \text{ A} \end{cases}$$
(5)

gde je i_m trenutna vrednost struje magnećenja, I_{baz} bazna struja mašine, a L_{m0} je nezasićena vrednost induktivnosti magnećenja.

C. Zasićenje magnetskog kola na putevima rasipanja statora i rotora

Za uvrštavanje zasićenja rasipnih induktivnosti korišćen je strujno zavisan koeficijent iz [11]:

$$K_{s}(i) = \begin{cases} 1, \\ \frac{2}{\pi} \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{2,5}{\sqrt{i \cdot (i-2,5)}} \right) + \frac{2,5\sqrt{(i-2,5)}}{i^{1,5}} \right], i \ge 2,5 \end{cases}$$
(6.1)

kojim se množi nezasićena vrednost rasipne induktivnosti L_{σ} :

$$L_{\sigma}(i) = L_{\sigma} \cdot K_{S}(i) \tag{6.2}$$

Struja *i* predstavlja trenutnu vrednost struje odgovarajuće grane statora ili rotora u relativnim jedinicama . Za svaku rasipnu induktivnost se posebno uzima struja koja teče kroz odgovarajuću granu i uvrštava se u formulu za $K_s(i)$.

D. Nova zamenska šema

Prilikom proširenja osnovne (polazne) zamenske šeme za d-q sistem sa Sl. 2, glavna izmena odnosila se na uvođenje dodatne grane za modelovanje rotora, kako bi se mogao

modelovati efekat potiskivanja struja u rotorskom kavezu. Pored toga, predstavljene su induktivnosti koje se zasićuju (obeležene strelicama). Na Sl. 4 je prikazana proširena zamenska šema za q-sistem napona i struja, na osnovu sistema jednačina (8). Zamenska šema za d-sistem razlikuje se u tome što su idealni naponski generatori kojima se modeluju indukovani naponi suprotnog polariteta u odnosu na šemu za qsistem.

Jednačine flukseva za q-sistem glase:

$$\begin{aligned} \lambda_{q1} &= i_{q1} \cdot (L_{ll1} + L_{lm} + L_m) + i_{q2} \cdot (L_{lm} + L_m) + i_{qr1} \cdot L_m + i_{qr2} \cdot L_m \\ &(7.1) \\ \lambda_{q2} &= i_{q1} \cdot (L_{lm} + L_m) + i_{q2} \cdot (L_{ll2} + L_{lm} + L_m) + i_{qr1} \cdot L_m + i_{qr2} \cdot L_m \\ &(7.2) \\ \lambda_{qr1}' &= i_{q1} \cdot L_m + i_{q2} \cdot L_m + i_{qr1} \cdot (L_{lr1}' + L_{mr} + L_m) + i_{qr2} \cdot (L_{mr} + L_m) \\ &(7.3) \\ \lambda_{qr2}' &= i_{q1} \cdot L_m + i_{q2} \cdot L_m + i_{qr1} \cdot (L_{mr} + L_m) + i_{qr2} \cdot (L_{lr2}' + L_{mr} + L_m) \\ &(7.4) \\ \lambda_{qmr} &= i_{q1} \cdot L_m + i_{q2} \cdot L_m + i_{qr1} \cdot (L_m + L_m) + i_{qr2} \cdot (L_{mr} + L_m) \\ &(7.4) \\ &(7.5) \end{aligned}$$

Naponske jednačine za q-sistem glase:

$$v_{q1} = r_{s1} \cdot i_{q1} + \frac{d\lambda_{q1}}{dt}$$
(8.1)

$$v_{q2} = r_{s1} \cdot i_{q2} + \frac{d\lambda_{q2}}{dt}$$

$$\tag{8.2}$$

$$0 = (r_r + R_C) \cdot i_{qr1} + R_C \cdot i_{qr2} - \omega_r \cdot \lambda_{dr1} + \frac{d\lambda_{qr1}}{dt}$$
(8.3)

$$0 = R_C \cdot i_{qr1}' + (r_r' + R_C) \cdot i_{qr2}' - \omega_r \cdot \lambda_{dr2}' + \frac{d\lambda_{qr2}'}{dt}$$
(8.4)

Na osnovu naponskih jednačina rotora (8.3) i (8.4) vidi se da zamenska šema može da se svede na onu sa Sl. 4.

Mehanička jednačina je, naravno, ostala ista kao u uprošćenom modelu.



Slika 4. Nova zamenska šema za q-sistem napona i struja sa uvaženim efektom potiskivanja struja u kavezu rotora sa promenljivim induktivnostima usled zasićenja

IV. UPROŠĆENI I PROŠIRENI MODEL 6-FAZNE MAŠINE U Simulinku

Uprošćeni model šestofazne mašine u Simulinku oformljen je u skladu sa zamenskom šemom sa Sl. 4 i diferencijalnim jednačinama (4) i predstavljen je na Sl. 5.

Oznake na Sl. 5 imaju sledeća značenja:

1 – blok koji vrši d-q transformaciju šestofaznog sistema napona koji napaja mašinu

2 – integralne jednačine gde se iz napona i struja d-q sistema koji prolaze kroz integratore dobijaju fluksevi (jednačine 4.1-4.3)

3 – fluksevi dobijeni u 2 ulaze u u Matlab funkciju **i_od_lambda** koji sadrži matricu induktivnosti; množenjem inverzne matrice induktivnosti sa fluksevima, na izlazu iz ovog bloka dobijaju se struje d-q sistema

4 – blok koji vrši inverznu transformaciju da bi se iz d-q sistema struja dobile struje mašine po fazama.

5 – blok u kojem je formirana Njutnovu mehanička jednačina iz kojeg se dobija elektromagnetni momenat

6 – izraz pomoću kojeg se iz el.mag. momenta kao izlaz dobija električna ugaona brzina

Za uprošćeni model je korišćena mašina sa sledećim parametrima preuzetim iz [12]: U = 110 V; $I_{baz} = 1,75$ A; $r_{s1} = 13,75 \Omega$; $L_{ll} = 5,3$ mH; $L_{lm} = 20,4$ mH; $L_m = 296,5$ mH; $r_r' = 5,775 \Omega$; $L_{lr}' = 12,7$ mH.

Na Sl. 6 je dat izgled Simulink modela za šestofaznu mašinu sa uvaženim efektima zasićenja induktivnosti na grani magnećenja, induktivnosti na granama rasipanja i potiskivanja struja u rotoru. Oznake 1 - 6 na Sl. 6 imaju isto značenje kao i za model sa Sl. 5.

Osnovna razlika u odnosu na uprošćeni model ogleda se u sadržaju bloka 3 – Matlab funkcije **i_od_lambda**. Ovde su, osim proširene matrice induktivnosti, u kodu implementirani efekti zasićenja uvaženi na način opisan u odeljku III.A i III.B. Ovaj blok pored izlaza u vidu struja d-q sistema, kao izlaz daje i zasićenu induktivnost na grani magnećenja koja ulazi u blok 5 – jednačinu za računanje momenta.

Pored ovoga, da bi se proširio model za jednačine (4) sa jednim kavezom na jednačine (8) rotora sa dve paralelne grane, dodate su grane u delu označenom sa 2.

Za potrebe Simulink modela, za povezivanje parametara zamenske šeme sa Sl. 4 sa parametrima sa Sl. 3 koristi se funkcija **deep_bar_param** preuzeta iz [10], koja kao ulazne podatke uzima: w_{max} , n, a, b, h, h_0 , le, R_V i X_V , gde su: w_{max} – opseg ugaone frekvencije struja rotora u kome se vrši optimizacija (0- w_{max}); n – broj provodnika na koje se deli štap rotora (u ovom slučaju n=2); a – širina štapa rotora u metrima; b – širina kanala u rotoru u koji se uranja štap; h – visina štapa; h_0 – dubina uranjanja provodnika; l_e – dužina rotora; R_V – ekvivalentna otpornost rotora pri jednosmernoj struji; L_V – ekvivalentna induktivnost rasipanja pri jednosmernoj struji. Kao izlaz ove funkcije i za podelu rotora na dva kaveza dobija se: $L_{mr} = L_0 + L_{\sigma 1}$; r_{r1} ' = R_1 ; L_{r1} ' = 0 H; r_{r2} ' = R_2 ; L_{r2} ' = $L_{\sigma 2}$. Za potrebe proračuna parametara dvostrukog rotora, u Matlab skripti za inicijalizaciju podataka uvrštena je formula iz [9]:

$$h(\mathbf{m}) = 0,02 \cdot \left(\frac{P(\mathbf{kW})}{10}\right)^{\frac{1}{5.3}}$$
 (9)

za proračun visine štapa kaveza rotora. Ovaj podatak, zajedno sa ostalim podacima o parametrima štapa rotora (širina štapa, širina kanala u rotoru u koji se uranja štap, dubina uranjanja provodnika i dužina rotora), preuzetim iz [9] i uz pretpostavku da su otpornost i induktivnost pri jednosmernoj struji rotora jednaki parametrima za rotor preuzetim iz [12]: $w_{\text{max}} = 100$; n = 2; a = 5e - 3 m; b = 5,05e - 3 m; $h_0 = 1e - 3$ m; $l_e = 1$ m; $R_v = 5,775 \Omega$; $X_v = 12,7$ mH.

Gore navedeni podaci prosleđuju se kao ulazi za pomenutu funkciju **deep_bar_param**.

Otpornost R_c , kojom se zatvaraju i spajaju štapovi kaveza, figuriše u Simulink modelu, ali je za potrebe ovog modela za nju usvojena vrednost od 0 Ω zbog nedostatka podataka.

Konačno, parametri koji se dobijaju nakon inicijalizacije imaju iste vrednosti kao kod uprošćenog modela, osim sledećih vrednosti koje figurišu u proširenom modelu: $L_{nr} = 5,744$ mH; $r_{r1} = 34,65 \Omega$; $r_{r2} = 6,93 \Omega$; $L_{tr1} = 0$ mH; $L_{tr2} = 18,167$ mH, pri čemu se u proširenom modelu sve vrednosti induktivnosti koriste kao (početne) nezasićene kod proračuna zasićenja.

Unutar funkcionalnog bloka **i_od_lambda** napravljena je "for" petlja gde se na početku uvek uzimaju nezasićene vrednosti induktivnosti da se sa trenutnim vrednostima flukseva (ulazima u funkcionalni blok) proračunaju vrednosti struja. Na osnovu ovih vrednosti se izračunavaju zasićene vrednosti induktivnosti, pa se sa ovim novim vrednostima u narednoj iteraciji ponovo proračunavaju vrednosti struje za iste trenutne vrednosti flukseva. Posle nekoliko iteracija (u ovom programu su korišćene 3) dobijaju se struje izlazi iz funkcionalnog bloka.

V. REZULTATI SIMULACIJE

Izvršena je simulacija zaletanja neopterećene mašine, kojoj je napon napajanja u 3. sekundi povećan za 10 % i dodat otporni momenat od 6 Nm.

Na Sl. 7 i Sl. 8 su prikazane polazne struje faze *a* kod uprošćenog i proširenog modela šestofazne asinhrone mašine, respektivno. Primetna je veća polazna struja kod proširenog modela, ali sa jačim prigušenjem.

Na Sl. 9 je dato poređenje elektromagnetnih momenata uprošćenog i proširenog modela mašine.



Slika 5. Izgled simulink modela idealne šestofazne mašine



Slika 6. Izgled proširenog modela šestofazne mašine u Simulinku







VI. ZAKLJUČAK

U radu je predložen model šestofazne mašine sa uključenim efektima zasićenja grane magnećenja, zasićenja grana rasipanja i sa potiskivanjem struja u rotoru pomoću modela sa dvostrukom granom rotora. Izložena je zamenska šema zajedno sa matricama transformacije šestofaznog sistema napona i struja za d-q sistem idealne šestofazne mašine, koja je proširena za šestofazne mašine sa promenljivim induktivnostima usled zasićenja i dvostrukom granom rotora i objašnjeni načini na koji je uvažen svaki od efekata.

Analizom rada motora tokom zaletanja i u ustaljenom stanju pod opterećenjem pokazan je uticaj zasićenja i potiskivanja struja rotora. Pokazano je da se stvarni moment i struja prilikom zaletanja značajno razlikuju od vrednosti dobijenih primenom uprošćenog modela. Pri vrednostima brzine bliskim nominalnoj, efekat potiskivanja struja je zanemarljiv, ali efekat zasićenja magnetskog kola dolazi do izražaja, tako da je dobijena vrednost struje motora veća u slučaju proširenog modela. Ova razlika postaje još izraženija pri povećanju napona napajanja i povećanju momenta opterećenja.

Pokazano je da je uvažavanje efekata zasićenja i potiskivanja struja veoma značajno sa aspekta predikcije performansi višefazne asinhrone mašine. Takođe, predstavljeni prošireni model šestofazne mašine u ovom radu je od značaja pri tranzijentnim i nesimetričnim režimima rada (polazak iz stanja mirovanja, rad u režimu slabljenja polja, gubitak jedne ili više faza), tako što omogućava detaljniju analizu pojava koje se javljaju u njima. Prednosti predloženog modela u analizi nesimetričnih režima su naročito izražene, s obzirom na to da ove režime karakteriše velika vrednost rasutog fluksa, usled čega može doći do zasićenja puteva rasipanja. Pored toga, inverzna komponenta polja koja se javlja u nesimetričnim režimima dovodi do indukovanja struja visokih učestanosti u rotoru, usled čega je efekat potiskivanja veoma izražen i neophodno ga je modelovati. U daljem radu će biti razmatrane metode za proračun nelinearnih parametara modela uz eksperimentalnu verifikaciju rezultata simulacije. Pored toga, potrebno je analizirati zasićenje uz uvažavanje dodatne složenosti modela višefazne mašine.

LITERATURA

- E. E. Ward and H. Härer, "Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 116, pp. 980-984, 1969.
- [2] E. Levi, F. Barrero, and M. J. Duran, "Multiphase machines and drives -Revisited," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, pp. 429-432, 2016.
- [3] F. Barrero and M. J. Duran, "Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines-part I," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 1, pp. 449–458, Jan 2016.
- [4] E. Levi, "Multiphase AC Machines," in The Industrial Electronics Handbook: Power Electronics and Motor drives, B. M. Willamowski and J. D. Irwin, Eds., 2nd edition ed Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, 2011, pp. 3.1-3.31.
- [5] T. A. Lipo, "A d-q Model for six-phase induction machine," in Proceedings on International conference "Electric Machines", Athens, Greece, 1980, pp. 860-867.
- [6] G. Singh, "Modeling and experimental analysis of a self-excited sixphase induction generator for stand-alone renewable energy generation," Renewable Energy, vol. 33, no. 7, pp. 1605–1621, 2008.
- [7] E. Levi, "Main Flux Saturation Modelling in Double-Cage and Deep-Bar Induction Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, str. 305-311, jun 1996.
- [8] D. Lin and P. Zhou, "An improved dynamic model for the simulation of three-phase induction motors with deep rotor bars," in International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 3810-3814.
- [9] M. Ječmenica, D. Šošić, M. Terzić, "Estimation of Deep-Bar Induction Motor Rotor Parameters Using Heuristic Methods of Optimization", Mediterranean Conference on Power Generation, , Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016), nov. 2016.
- [10] S. Mirić, "Efekat potiskivanja struja rotora sa dubokom žlebovima kod asinhronog motora", Izveštaj iz predmeta: Prelazne pojave u električnim mašinama
- [11] H. M. Jabr, N. C. Kar, "Effects of main and leakage flux saturation on the transient performances of doubly-fed wind driven induction generator", Electric Power Systems Research, Vol 77, No. 8, str. 1019-1027, jun 2007.
- [12] H. S. Che, A. S. Abdel-Khalik, O. Dordevic, E. Levi, "Parameter Estimation of Asymmetrical Six-Phase Induction Machines Using Modified Standard Tests

ABSTRACT

This paper presents a model of a six-phase asynchronous machine that takes into account the effect of saturation of the magnetic circuit of the main flux path, saturation of the leakage flux paths and skin effect in the cage rotor. The complete procedure is shown how the model in Matlab/Simulink environment was formed on the example of six-phase asynchronous motor, as well as how every of above mentioned effects is taken into account. Finally, a comparison of the obtained results of the basic and extended model of the sixphase machine was made, which is of the importance in transient and aszmmetric operation modes, in which saturation and skin effect is included.

EXPANDED MODEL OF SIX-PHASE ASYNCHRONOUS MACHINE

Stevan Stanišić, Bogdan Brković, Miloš Ječmenica, Zoran Lazarević