

**VEKTORSKO UPRAVLJANJE SINHRONOM MAŠINOM SA STALNIM MAGNETIMA****VECTOR CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE**Slavica Gajić, Boris Dumnić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ENERGETSKA ELEKTRONIKA I ELEKTRIČNE MAŠINE**

**Kratak sadržaj** – *Sinhrona mašina sa stalnim magnetima je mašina naizmjenične struje koja poseduje trofazni stator iste konstrukcije kao i kod asinhronne mašine, ali rotor je drugačiji i poseduje površinski postavljene stalne magnetne. Karakteristike sinhronne mašine sa stalnim magnetima postaju sve bolje i bolje sa napretkom tehnologije elektromagnetnih materijala. Sada se sinhronne mašine sa stalnim magnetima koriste u raznim oblastima zbog svoje robusnosti, visoke efikasnosti, male težine i dimenzija. Zbog prethodno navedenih prednosti, posebno visoke efikasnosti, sinhronne mašine sa stalnim magnetima se sve više koriste u industriji i ključan su deo opreme koja se koristi u obnovljivim izvorima električne energije. U okviru ovog rada prikazan je matematički model sinhronne mašine sa stalnim magnetima, date su metode za određivanje parametara i opisano je vektorsko upravljanje. Na kraju rada je predstavljen simulacioni model sinhronne mašine sa stalnim magnetima napravljen u Matlab/Simulink programu.*

**Ključne reči:** *sinhrona mašina sa stalnim magnetima, matematički model, parametri mašine, vektorsko upravljanje, simulacioni model mašine*

**Abstract** – *The permanent magnet synchronous machine is a rotating electrical machine with a classic 3-phase stator like that of an induction machine, but rotor is different and has surface-mounted permanent magnet. The performance of permanent magnet synchronous machine has improved rapidly by the progress in electromagnetic material technology. Now permanent magnet synchronous machine is widely used because it has many advantages such as robustness against the environment, high efficiency, light weight and small size. Because of advantages above, especially those featuring high efficiency, permanent magnet synchronous machine is frequently used in industry and is a key equipment in renewable energy applications. In this paper mathematical model of permanent magnet synchronous machine is shown, methods for parameter measurements and the concept of vector control are described. At the end a simulation model of permanent magnet synchronous machine made in Matlab/Simulink program is given.*

**Keywords:** *permanent magnet synchronous machine, mathematical model, parameters of the machine, vector control, simulation model of the machine*

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Boris Dumnić, van. prof.**

**1. UVOD**

Sinhrona mašina sa stalnim magnetima (*eng. permanent magnet synchronous machine- PMSM*) prvi put se pojavljuje u devetnaestom veku. Nedostaci kao što su nepristupačnost, cena i mala gustina magnetne energije dugo vremena su sprečavali masovniju upotrebu PMSM [1]. U tom periodu su se upotrebljavale sinhronne mašine sa pobudnim namotajem na rotoru. Masovnija upotreba PMSM počinje pojavom AlNiCo magnet. AlNiCo magnet je predstavljao najjači stalni magnet pre otkrića retkih zemalja. Samarijum-Kobalt magnet, napravljen od elemenata retkih zemalja, danas se najčešće koristi u konstrukciji PMSM. U početku su stalni magneti postavljani na statoru, a današnja standardna konstrukcija je takva da se magneti postavljaju na rotoru.

PMSM se dele na mašine sa površinski postavljenim magnetima i mašine sa utisnutim magnetima. PMSM sa površinski postavljenim magnetima nije pogodna za pogone koji zahtevaju veliki raspon brzina. PMSM sa utisnutim magnetima je mehanički robusnija i može biti manjih dimenzija i manje cene od PMSM sa površinski postavljenim magnetima istih karakteristika. PMSM su visokoefikasne električne mašine i upotrebljavaju se u vetroelektranama, hidroelektranama, hibridnim automobilima, električnim sistemima broda i aviona [1].

U nastavku rada biće razvijen matematički model PMSM SOGA koja se nalazi u laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka. PMSM SOGA ima površinski postavljene magnetne na rotoru. Na slici 1. prikazana je PMSM SOGA.



Slika 1. PMSM SOGA

Na osnovu matematičkog modela PMSM biće realizovan i simulacioni model u Matlab/Simulink programu pomoću koga se mogu posmatrati odzivi mašine na razne poremećaje. U cilju realizacije simulacionog modela neophodno je odrediti i parametre date mašine, te će metoda za određivanje parametara biti navedena i opisana u nastavku rada. Kako bi se realizovalo što efikasnije

upravljanje sinhronom mašinom u ovom radu korišćen je upravljački koncept poznat kao vektorsko upravljanje.

## 2. MATEMATIČKI MODEL PMSM

U ovom poglavlju je dat matematički model PMSM sa površinski postavljenim magnetima. Matematički model PMSM u originalnom abc domenu je neefikasan za računarske simulacije u realnom vremenu, jer se sastoji od sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina sa vremenski promenljivim koeficijentima i sistema algebarskih jednačina sa vremenski promenljivim koeficijentima [2].

Kako bi se umanjila kompleksnost matematičkog modela u originalnom domenu vrše se matricne transformacije matematičkog modela.

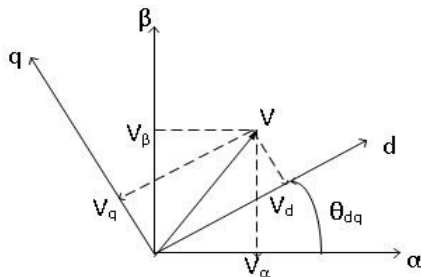
Prvo se na matematički model primenjuje transformacija raspredanja koja kao efekat ima smanjenje nenultih elemenata u matrici induktivnosti i značajno pojednostavljenje matematičkog modela. Njome se veličine iz abc domena transformišu u  $\alpha\beta$  domen. Veza između promenljivih u  $\alpha\beta$  i abc domenu može se zapisati kao u primeru izraza (1):

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Nakon transformacije raspredanje primenjuje se transformacija obrtanja. Ovom transformacijom se veličine iz  $\alpha\beta$  domena transformišu u dq domen. Transformacija veličina iz  $\alpha\beta$  u dq domen se vrši zato što je matematički model mašine u dq domenu pogodniji za implementaciju u računarskim simulacijama. Veza između promenljivih u  $\alpha\beta$  i dq domenu može se zapisati kao u primeru izraza (2):

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{dq}) & \sin(\theta_{dq}) \\ -\sin(\theta_{dq}) & \cos(\theta_{dq}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Na slici 2. prikazane su projekcije veličine  $V$  u  $\alpha\beta$  i dq domenu [2].



Slika 2. Transformacija obrtanja, prelazak iz  $\alpha\beta$  u dq domen [1]

Matematički model PMSM u dq domenu nakon transformacije obrtanja se sastoji od jednačine naponske ravnoteže, jednačine fluksnog obuhvata statora, koje su date izrazima (3) i (4) respektivno:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_m \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gde su:  $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$  - d i q komponente vektora napona, struje i fluksnog obuhvata statora, respektivno;  $R_s$  - otpornost namotaja statora;  $L_s$  - induktivnost namotaja statora;  $\omega$  - električna ugaona brzina;  $\psi_{md}, \psi_{mq}$  - d i q komponente fluksa stalnog magneta;  $\psi_m$  - amplituda fluksa stalnog magneta.

Pored prethodno navedenih izraza u sastav matematičkog modela PMSM ulaze i jednačina momenta konverzije i Njutnova jednačina kretanja, koje su date izrazima (5) i (6) respektivno:

$$m_c = \frac{3}{2} * p * (\psi_d * i_q - \psi_q * i_d) \quad (5)$$

$$m_c - m_m = J * \frac{d\omega_m}{dt} + K_m * \omega_m \quad (6)$$

gde su:  $m_c$  - moment konverzije;  $p$  - broj pari polova;  $m_m$  - mehanički moment;  $J$  - moment inercije;  $K_m$  - koeficijent gubitaka;  $\omega_m$  - mehanička ugaona brzina.

U dq domenu sve veličine su jednosmerne u stacionarnom stanju. Matematički model u dq domenu koristi se prilikom formiranja simulacionog modela u Matlab/Simulink okruženju.

## 3. METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA PMSM

Poznavanje parametara mašine je od ključne važnosti za optimalno upravljanje pogonom. Parametri koji su od značaja za PMSM SOGA su: otpornost namotaja statora, fluks stalnog magneta, induktivnost namotaja statora. PMSM SOGA ima 6 pari polova. Natpisna pločica ove mašine prikazana je na slici 3.



Slika 3. Natpisna pločica PMSM SOGA

Za merenje otpornosti namotaja statora mogu se koristiti merni mostovi, UI metoda, univerzalni merni instrumenti kao i druge metode. U ovom radu merenje otpornosti PMSM SOGA izvršeno je pomoću univerzalnog mernog instrumenta. Izmerena otpornost pomoću datog uređaja je otpornost između dva priključka PMSM. Da bi se dobila otpornost faznih namotaja, u slučaju namotaja statora povezanih u zvezdu, potrebno je vrednost otpora izmerenu na ovaj način podeliti sa dva. Otpornost jednog faznog namotaja statora PMSM SOGA iznosi 12.02  $\Omega$ .

Poznavanje induktivnosti PMSM je veoma važno, pogotovo ako se koriste u pogonima visokih performansi. Induktivnost namotaja statora može da se odredi pomoću vremenske konstante kola. Nakon što se rotor mehanički

učvrsti u položaju za koji važi da je  $\theta = 0$  između priključaka statorskog namotaja se priključi izvor napajanja promenljive amplitude. Tada se induktivnost namotaja statora može odrediti pomoću izraza (7):

$$L_s = \frac{2}{3} \cdot L = \frac{2}{3} \cdot \tau \cdot R \quad (7)$$

U izrazu (7)  $L$  predstavlja ukupnu induktivnost serijsko-paralelne veze statorskih namotaja, a  $\tau$  predstavlja vremensku konstantu kola [3]. Nakon što je određena vremenska konstanta kola koristeći se izrazom (7) dobijeno je da induktivnost namotaja statora PMSM SOGA iznosi 98.4 mH. Kod PMSM sa površinski postavljenim magnetima induktivnost namotaja statora po d i q osi su jednake.

Još jedan od parametara koji je od važnosti za PMSM jeste fluks stalnih magneta. Kako bi se odredio fluks stalnih magneta PMSM se mehanički spregne sa pogonskom mašinom kojom se upravlja po brzini. U brzinskom režimu rada zadaje se i pomoću regulatora održava konstantna mehanička brzina. Zatim se izmeri efektivna vrednost faznog napona, pa se fluks stalnog magneta određuje pomoću izraza (8):

$$\psi_m = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{rms} / \omega \quad (8)$$

U izrazu (8)  $U_{rms}$  predstavlja efektivnu vrednost faznog napona. Za PMSM SOGA fluks stalnog magneta iznosi 0,7907 Wb.

#### 4. VEKTORSKO UPRAVLJANJE PMSM SOGA U MATLAB/SIMULINK OKRUŽENJU

Vektorsko upravljanje je upravljački koncept koji se pojavljuje još 1960-tih, ali glavni razvoj i primena vektorskog upravljanja počela je tek pojavljivanjem brzih i jeftinijih mikroprocesora. Pošto je za vektorsko upravljanje pogodniji model u dq domenu u drugom poglavlju ovog rada izvršene su transformacije matematičkog modela i na kraju je dat matematički model PMSM u dq domenu. Ideja vektorskog upravljanja jeste da se pronađu dve veličine kojima će se nezavisno upravljati fluksom i momentom. Te dve upravljačke veličine su poprečna i podužna komponenta struje statora. Podužna komponenta

struje statora je zadužena za upravljanje fluksom, a poprečna za upravljanje momentom [4]. Regulacija vektora struje u dq domenu je realizovana akcijom dva nezavisna strujna regulatora [3]. Nezavisan rad dva strujna regulatora omogućen je zahvaljujući dekuplovanju. Ideja dekuplovanja je da se komponente koje ne zavise od struje  $i_d$  eliminišu iz jednačine naponske ravnoteže d ose. Isto je urađeno i sa komponentama koje ne zavise od struje  $i_q$  u jednačini naponske ravnoteže q ose. Te komponente se dodaju na izlaz PI regulatora struje. Regulator u d osi kontrolom  $u_d$  reguliše  $i_d$ . Na sličan način radi i regulator u q osi.

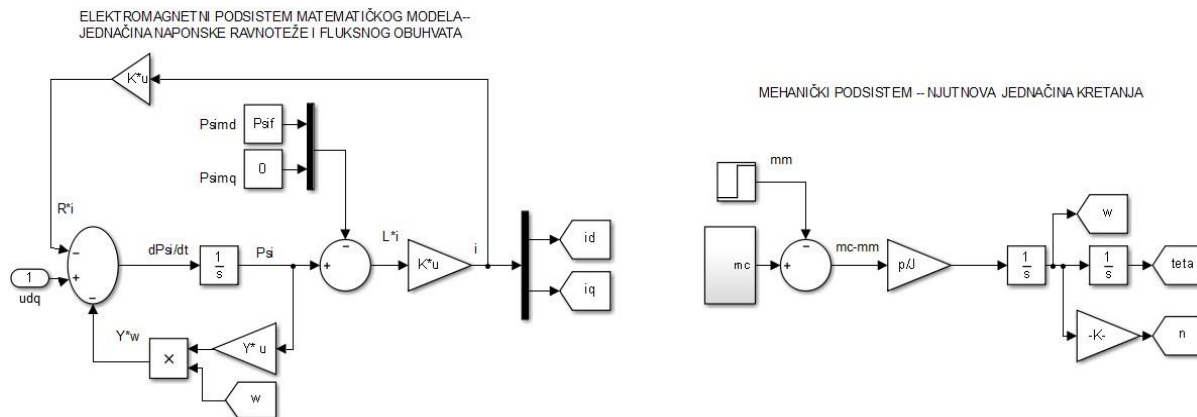
Kod PMSM sa površinski postavljenim magnetima ne realizuje se slabljenje polja, jer zbog male induktivnosti namotaja statora potrebna bi bila velika negativna vrednost struje  $i_d$ . Zato se referenca struje  $i_d$  održava na nuli. S obzirom da je  $i_d=0$ , a  $\psi_d = \psi_m$  sledi da se sa  $i_q$  linearno upravlja momentom. Brzina se upravlja pomoću linearnog PI regulatora koji na izlazu zadaje referencu struje  $i_q$  takvu da se razlika zadate i ostvarene vrednosti brzine svede na nulu.

#### 4.1. Simulacioni model i rezultati simulacija

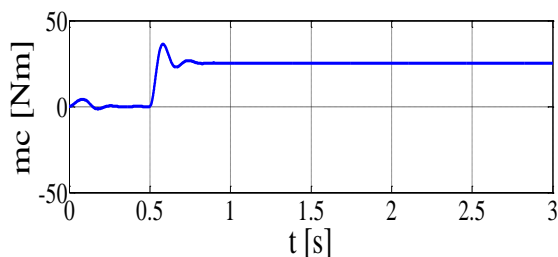
Skupo eksperimentalno testiranje se može izbeći u ranoj fazi istraživanja upotrebom adekvatnih simulacionih modela. U simulacionom modelu se tastaturom izazivaju poremećaji i na ekranu računara se posmatraju odzivi. U ovom radu razvijeni matematički model u dq domenu je iskorišćen za formiranje simulacionog modela. Na slici 4. predstavljen je izgled simulacionog modela PMSM SOGA u Matlab/Simulink okruženju.

Na osnovu realizovanog modela izvršeno je više simulacija a u ovom radu prikazani su rezultati simulacije u kojoj je najpre izvršen zalet neopterećene PMSM, a zatim se u 0,5 s nametne mehanički moment koji iznosi 25 Nm.

Na slici 5. prikazana je zavisnost momenta konverzije od vremena, gde se može primetiti da nakon izvršenog zaleta vrednost momenta pada na nulu. U trenutku kada se mašina optereti sa 25 Nm dolazi do momentne neravnoteže i potom mašina razvija momenat koji je jednak momentu opterećenja.

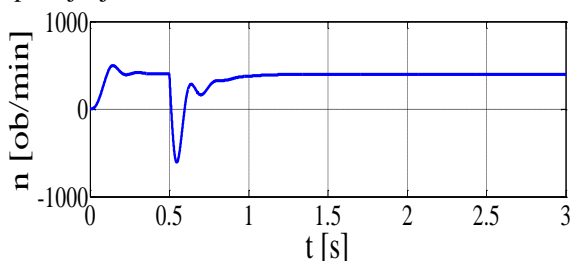


Slika 4. Simulacioni model PMSM SOGA



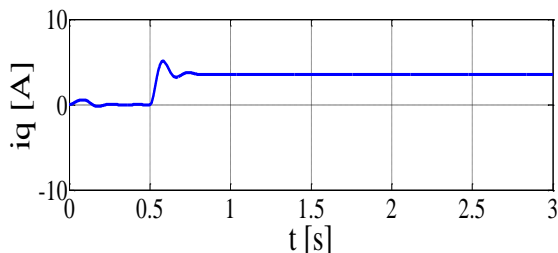
Slika 5. Zavisnost momenta konverzije od vremena

Na slici 6. prikazana je zavisnost brzine obrtanja od vremena. Nakon što je izvršen zalet brzina obrtanja je postala jednaka sinhronoj brzini i iznosi 400 ob/min. U trenutku opterećenja PMSM mehaničkim momentom različitim od nule brzina date PMSM će postati manja od sinhrona, kao što se može primetiti na slici 6. Kada se uspostavi momentna ravnoteža brzina će opet dostići vrednost jednaku sinhronoj brzini. Na osnovu datog odziva brzine evidentna je loša dinamika regulatora brzine (propad brzine ima nedozvoljeno veliku vrednost), što ukazuje na neophodnost pažljivog proračuna i odabira parametara regulatora u regulacionoj strukturi vektorskog upravljanja.



Slika 6. Zavisnost brzine od vremena

Zavisnost  $q$  komponente struje od vremena prikazana je na slici 7. Nakon što se izvrši zalet mašine  $q$  komponenta struje postaje jednaka nuli. U 0,5 s kada se PMSM optereti sa 25 Nm dolazi do momentne neravnoteže i rasta  $q$  komponente struje, kao što se može videti na slici 7.



Slika 7. Zavisnost  $q$  komponente struje od vremena

Na osnovu prikazanih rezultata simulacije očigledno je da je uspešno realizovano vektorsko upravljanje datom sinhronom mašinom - PMSM SOGA tj. da je ostvarno nezavisno upravljanje fluksom i momentom mašine.

## 5. ZAKLJUČAK

Upotreba PMSM raste iz dana u dan i poslednjih decenija jako je važan razvoj u istraživanju karakteristika kao i oblasti primene ove vrste sinhronih mašina. U današnjem savremenom industrijskom svetu potreba za električnom energijom je sve veća i veća i potrebno ju je što efikasnije proizvoditi i koristiti. Elektromotorni pogoni su efikasni ukoliko imaju visok koeficijent korisnog dejstva. Visok koeficijent korisnog dejstva, male dimenzije, jednostavno

održavanje i hlađenje samo su neke od prednosti PMSM u odnosu na druge vrste naizmeničnih mašina. Prethodno navedene prednosti PMSM u odnosu na druge vrste naizmeničnih mašina predstavljaju razlog povećanog broja istraživačkih aktivnosti vezanih za PMSM.

Kako bi se ispitale karakteristike date mašine najpre je napravljen pojednostavljen matematički model u originalnom domenu. Taj matematički model se pomoću transformacija opisanih u radu prebacuje u dq domen. Da bi se dobili tačni rezultati simulacije rada mašine prethodno je izvršeno određivanje nedostajućih parametara PMSM SOGA. Parametri su određeni pomoću metoda izloženih u radu. Pored toga, u radu je predstavljen i simulacioni model vektorski upravljane PMSM kao i rezultati jedne simulacije dobijeni pomoću ovog modela. Prikazani rezultati simulacije jasno ukazuju na činjenicu da je ostvareno nezavisno upravljanje fluksom i momentom sinhrona mašine. Kao zaključak ovoga rada može se navesti i činjenica da je jedna od mana simulacionih modela to što ne postoji univerzalan model za sve mašine, koji bi se samo prilagodio karakterističnoj mašini, nego je za svaku drugu vrstu mašine potrebno napraviti novi simulacioni model.

## 4. LITERATURA

- [1] Steve Evon, Robbie McElveen and Michael J. Melfi, "Permanent Magnet Motors for Power Density and Energy Savings in Industrial Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 5, pp. 1360-1366, 2008.
- [2] Vladan Vučković, Opšta teorija električnih mašina, Nauka Beograd, 1992.
- [3] Darko P. Marčetić, Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima, FTN Izdavaštvo, 2014.
- [4] Veran Vasić, Đura Oros, Energetska elektronika u pogonu i industriji, FTN Izdavaštvo, 2010.

## Kratka biografija:



**Slavica Gajić** rođena je u Novom Sadu 1994. god. Diplomirala na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2017.god. Master rad na fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnika i računarstvo- Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2018. godine.  
kontakt: slavica.gajic994@gmail.com



**Boris Dumnić** rođen je u Bileći 1976. god. Diplomirao je 2003. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu – Elektrotehnika i računarstvo. Od 2004. godine zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Magistarski rad je odbranio 2007. godine a 2013 godine je odbranio i doktorsku tezu. Oblast interesovanja su mu električne mašine, pogoni, energetska elektronika i obnovljivi izvori električne energije.