

# Analiza uticaja magnetske interakcije faza na karakteristike 8/6 SRM-a

Dragan S. Mihić, *Member, IEEE*, Mladen V. Terzić, *Member, IEEE*, Žarko V. Koprivica, *Student, IEEE*, Bogdan M. Brković, *Member, IEEE*

**Apstrakt**— U cilju unapređenja performansi, rad prekidačkog reluktantnog motora (Switched Reluctance Motor-SRM) zahteva jednovremeno pobuđivanje više faza motora. Budući da magnetski polaritet pobuđenih faza motora može biti isti ili različit, u ovom radu je izvršena detaljna analiza uticaja magnetskog polariteta na fluksne obuhvate faza 8/6 SRM-a. Ova analiza je izvršena na osnovu statičkih karakteristika koje su dobijene korišćenjem modela baziranog na metodi konačnih elemenata (Finite Element Method-FEM) u softverskom paketu Ansys Electronics. Pored toga, imajući u vidu da kod 8/6 SRM-a korišćenjem standardnog asimetričnog polumostnog invertora (API) nije moguće ostvariti magnetsku simetriju faza, rezultujući efekti veoma izražene interakcije faza su analizirani na primeru odgovarajućih tranzijentnih talasnih oblika faznih struja i momenta.

**Cljučne reči**—Prekidački reluktantni motor, interakcija faza, metoda konačnih elemenata.

## I. UVOD

Prekidački reluktantni motori zbog svojih istaknutih osobina kao što su jednostavna i jeftina proizvodnja, mehanička i termička robusnost, velika gustina snage, širok opseg brzina i pouzdanost, privlače značajnu pažnju i postaju značajni konkurenti mašinama naizmenične struje pre svega u električnim automobilima, vetrogeneratorima, avio industriji [1-4].

U cilju unapređenja efikasnosti, rad SRM-a zahteva jednovremeno pobuđivanje više faza motora [5]. Na taj način se doprinosi uvećanju momenta i smanjenu njegove valovitosti. To je naročito izraženo za konfiguracije SRM-a sa brojem faza koji je veći od tri. Broj istovremeno pobuđenih faza zavisi od radnog režima i u opštem slučaju taj broj može biti veći od dva. Interakcija faza može biti rezultat istovremene magnetizacije faze i demagnetizacije njoj susedne faze ili istovremene magnetizacije susednih faza motora kada zbog velike širine ugla vođenja dolazi i do

značajnije interakcije ortogonalnih faza SRM-a. Kao posledica istovremenog pobuđivanja faza mogu se javiti različite putanje magnetskog fluksa u mašini. Karakter i specifičnosti tih putanja su vezane za magnetski polaritet pobuđenih faza koji zavisi od smera struje u njima. Budući da magnetski polaritet pobuđenih faza može biti isti ili različit, tokom rada motora, raspodela magnetskog fluksa u mašini je direktno određena njihovim trenutnim stanjem. Dakle, međusobni fluks kao i rezultujuće magnetsko zasićenje koje se javlja usled interakcije faza je direktno vezano za magnetski polaritet pobuđenih faza motora čime se direktno utiče na performanse SRM-a.

Da bi se utvrdili efekti interakcije faza na fluksne obuhvate a samim tim i na performanse mašine neophodno je korišćenje tačnog modela koji uzima u obzir efekte međusobne sprege i zasićenja tokom istovremenog vođenja faza. Generalno, poteškoće koje se javljaju tokom modelovanja i analize SRM-a su posledica izrazito nelinearne veze fluksa, struje i položaja rotora budući da je normalan rad SRM-a praćen dubokim zasićenjem. Zbog toga, zahtev za modelovanjem efekata međusobne interakcije faza predstavlja dodatnu poteškoću.

U [6] je analiziran uticaj polariteta sukcesivnih faza motora sa konstantnim strujama na raspodelu fluksa u različitim delovima mašine i generisanje elektromagnetskog momenta. Navedene su neke kvalitativne osobine dugih i kratkih putanja fluksa koje mogu biti osnova za unapređenje tehnika koje se bave smanjenjem valovitosti momenta i gubitaka u gvožđu. Međutim, nisu prikazani rezultati tranzijentnih simulacija koji prikazuje uticaj efekata interakcija faza na fluksne obuhvate, fazne struje i momenat.

Mnogi radovi [7-12] naglašavaju važnost modelovanja međusobne sprege faza i njenog uticaja na tranzijentne karakteristike SRM-a. Međutim, u odgovarajućim razvijenim matematičkim modelima uticaj struje koja postoji u faznom namotaju na odgovarajući fluksni obuhvat tokom interakcije sa drugim pobuđenim fazama se zanemaruje pa zbog toga ovi efekti i nisu analizirani.

Dinamički modeli [13-15] uzimaju u obzir međusobnu spregu faza bazirajući se na karakteristikama magnetostatičkog FEM-a ili eksperimenta. Pri tome, ulazne statičke karakteristike razmatraju uticaj samo dve pobuđene faze što je ograničavajuće u analizi i modelovanju dinamičkih radnih režima kada su istovremeno pobuđene tri ili četiri faze motora, što se uobičajeno ima u slučaju četvorofaznih SRM-a. Nelinearni analitički model [16] uzima u obzir efekte interakcije faza, ali njegove tranzijentne simulacije u opštem slučaju ne pružaju mogućnost da se u potpunosti, na eksplicitan način, analizira uticaj rezultujućeg magnetskog zasićenja na karakteristike motora tokom istovremenog

Dragan S. Mihić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dragan84m@etf.bg.ac.rs).

Mladen V. Terzić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: terzic@etf.bg.ac.rs).

Žarko V. Koprivica – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: kopri@etf.bg.ac.rs).

Bogdan M. Brković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: brkovic@etf.bg.ac.rs).

vođenja više faza motora.

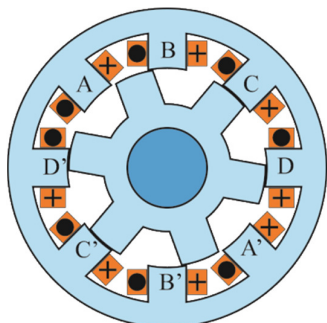
U ovom radu je izvršena detaljna analiza uticaja magnetskog polariteta na fluksne obuhvate faza 8/6 SRM-a. Ova analiza je izvršena na osnovu statičkih karakteristika koje su dobijene korišćenjem modela baziranog na FEM-u u softverskom paketu Ansys Electronics. Pored toga, imajući u vidu da kod 8/6 SRM-a korišćenjem standardnog asimetričnog polumostnog invertora nije moguće ostvariti magnetsku simetriju faza, rezultujući efekti veoma izražene interakcije faza su prikazani i analizirani na primeru odgovarajućih tranzijentnih talasnih oblika faznih struja i momenta.

U II poglavlju su navedeni glavni koraci u modelovanju 8/6 SRM-a metodom konačnih elemenata u programu Ansys Electronics u cilju dobijanja statičkih i dinamičkih karakteristika. Analiza uticaja magnetskog polariteta na statičke karakteristike fluksnih obuhvata 8/6 SRM-a je data u poglavlju III. Izraženi rezultujući efekti interakcije faza na dinamičke talasne oblike faznih struja i elektromagnetskog momenta su prikazani i analizirani u poglavlju IV. Zaključak je dat u V poglavlju.

## II. MODELOVANJE 8/6 SRM-A METODOM KONAČNIH ELEMENATA U PROGRAMSKOM PAKETU ANSYS ELECTRONICS

Na Sl. 1 je prikazan poprečni presek 8/6 SRM-a za koji se određuju statičke i dinamičke karakteristike u cilju utvrđivanja uticaja magnetskog polariteta faza na njegove karakteristike. Glavni parametri i dimenzije 8/6 SRM-a su dati u Tabelama 1 i 2, respektivno. Magnetostatički i tranzijentni FEM model, uključujući 8/6 SRM geometriju, materijale, električno i magnetsko kolo, granične uslove, mrežu konačnih elemenata u programskom paketu Ansys Electronics su definisani saglasno [16]. Pored toga, da bi se dobile statičke karakteristike fluksnih obuhvata, definisan je odgovarajući opseg konstantnih struja posmatranih faza motora na ugaonom intervalu od neusaglašenog do usaglašenog položaja rotora. Sa druge strane, za dobijanje rezultata tranzijentne simulacije definisano je eksterno kolo koje predstavlja API-a. Gore navedeni model je napravljen uzimajući u obzir da znak "×" predstavlja provodnike u kojima postoji struja u smeru od posmatrača, dok oznaka "•" predstavlja provodnike u kojima struja postoji u smeru ka posmatraču.

U skladu sa ovim, primenom unipolarnog napajanja rezultujuća magnetska sekvenca u pobuđivanju faza A-B-C-D-A-B-C-D je S-S-S-S-N-N-N-N. Kod ove magnetske sekvence tri od četiri kombinacije susednih faza motora su istog, a jedna različitog magnetskog polariteta.



Sl.1. Poprečni presek 8/6 SRM-a

TABELA 1  
GLAVNI PARAMETRI 8/6 SRM-A

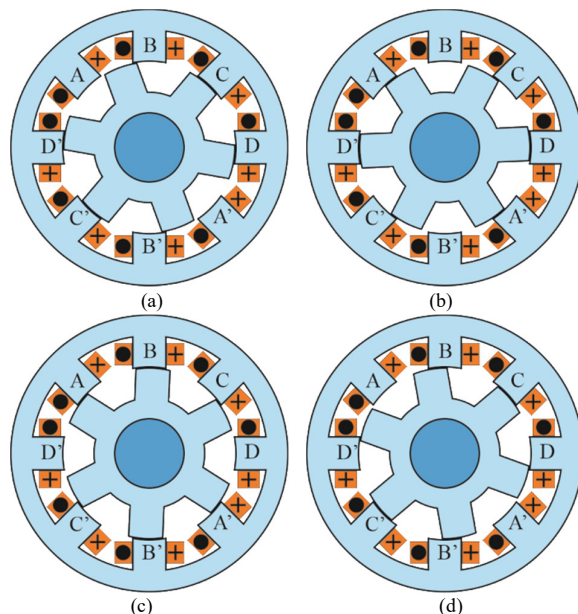
Parametri	Vrednost
Broj faza	4
Broj statorskih/rotorskih polova	8/6
Nominalni fazni napon [V]	220
Nominalna fazna struja [A]	3.2
Fazna otpornost [ $\Omega$ ]	2.1
Induktivnost u neusaglašenom položaju [mH]	14
Broj navojaka po fazi	284

TABELA 2  
GLAVNE DIMENZIJE 8/6 SRM-A

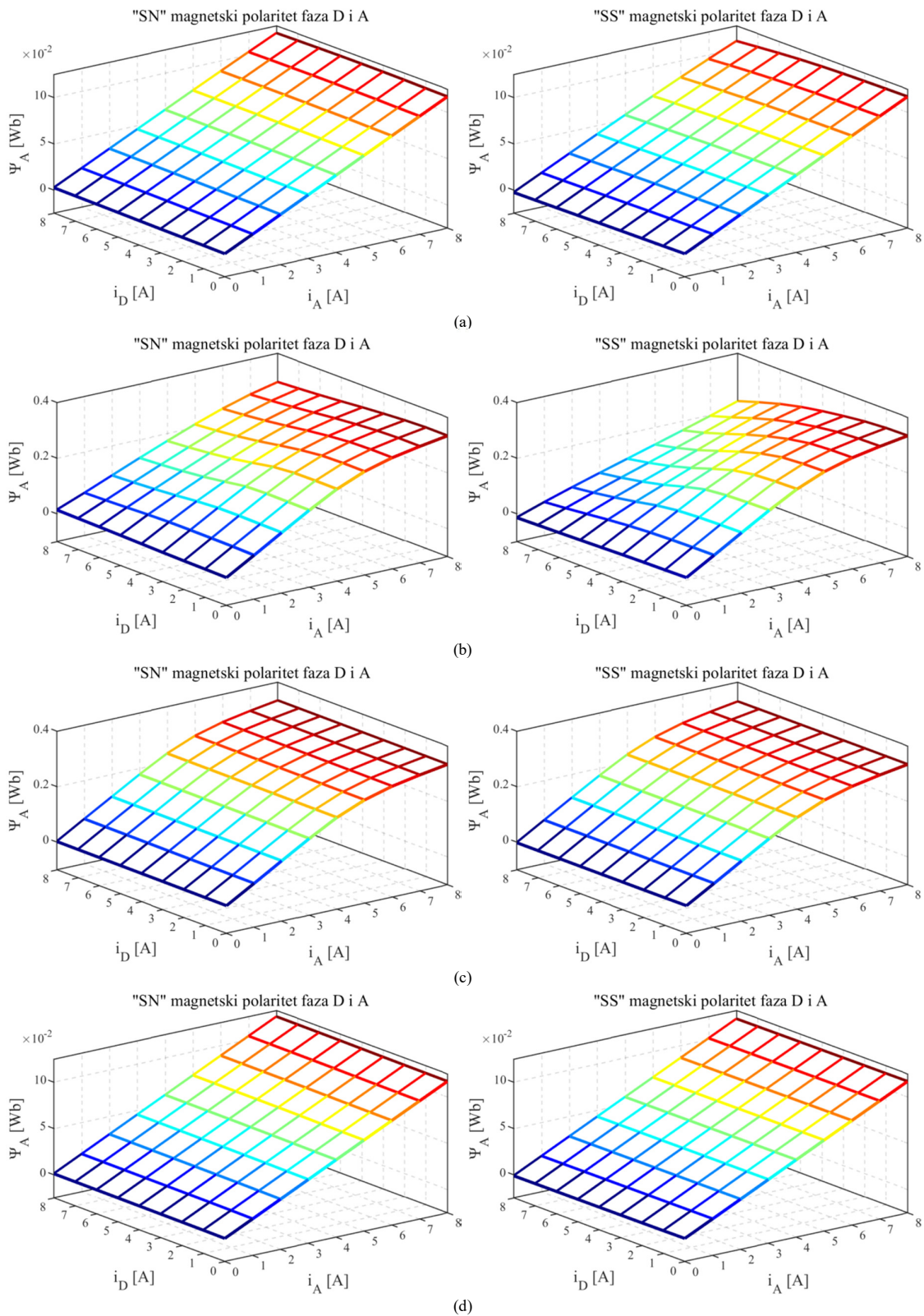
Dimenzije	Vrednost
Spoljašnji poluprečnik statora [mm]	60
Unutrašnji poluprečnik statora [mm]	37.5
Debljina jarma statora [mm]	9
Spoljašnji poluprečnik rotora [mm]	37
Unutrašnji poluprečnik rotora [mm]	24
Debljina jarma rotora [mm]	9
Širina vazdušnog zazora [mm]	0.5
Poluprečnik vratila [mm]	15
Dužina magnetskog kola [mm]	65
Širina statorskog pola [ $^{\circ}$ ]	22
Širina rotorskog pola [ $^{\circ}$ ]	23

## III. ANALIZA UTICAJA INTERAKCIJE FAZA NA STATIČKE $\Psi$ -I KARAKTERISTIKE

Da bi se utvrdio uticaj magnetskog polariteta faza na fluksni obuhvat kada je jaram statora i rotora, usled rezultujućih efekata interakcije faza u dubokom zasićenju, od interesa je analizirati odgovarajuće statičke  $\Psi$ -i karakteristike posmatrane faze tokom njene interakcije sa fazom koja joj prethodi, ali i fazom koja je sledi za različite ugaone položaje rotora. U suštini, potpuno je svejedno za koju fazu se analiziraju navedene karakteristike, pa će se u nastavku posmatrati  $\Psi$ -i karakteristike faze A kao i rezultujući efekti međusobne interakcije sa fazama D i B za različite ugaone položaje rotora. Od interesa je posmatrati takve ugaone položaje rotora koji će omogućiti da se utvrdi priroda uticaja



Sl. 2. Ugaoni položaji rotora (a)  $\theta_m=5^{\circ}$ , (b)  $\theta_m=17.5^{\circ}$ , (c)  $\theta_m=42.5^{\circ}$  i (d)  $\theta_m=55^{\circ}$  u odnosu na neusaglašeni položaj faze A.



Sl. 3.  $\Psi$ - $i$  karakteristike faze A za ugaoni položaj rotora (a)  $\theta_m=5^\circ$ , (b)  $\theta_m=17.5^\circ$ , (c)  $\theta_m=42.5^\circ$  i (d)  $\theta_m=55^\circ$  kada je magnetski polaritet susjednih faza D i A različit (SN) i isti (SS).

međusobne interakcije na  $\Psi$ - $i$  karakteristiku faze na celom opsegu polnog koraka rotora faze A. Zbog toga, u odnosu na

referentni ugaoni položaj rotora koji odgovara neusaglašenom položaju faze A, izabrana su četiri ugaona položaja rotora  $\theta_m$

saglasno Sl. 2.

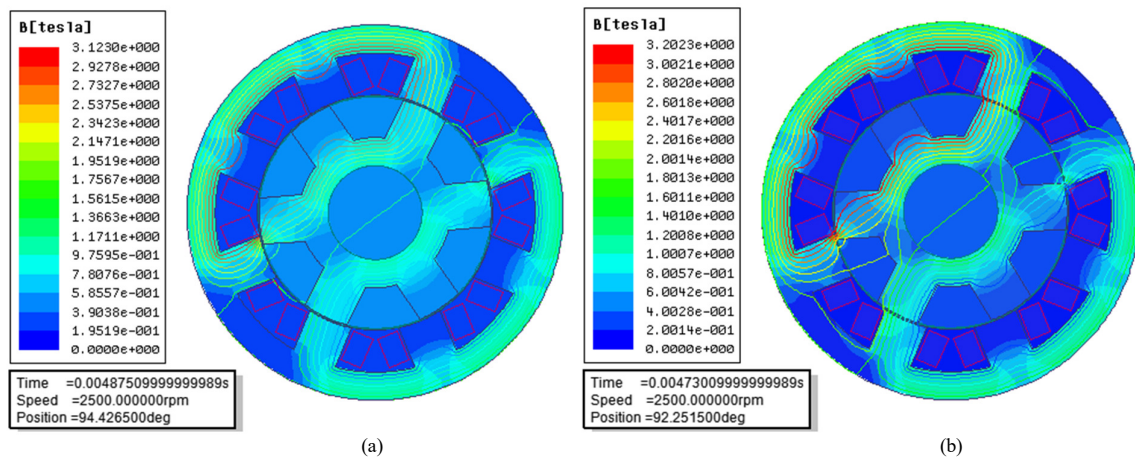
Statičke  $\Psi$ -i karakteristike faze A na Sl. 3, koje odgovaraju ugaonim položajima rotora  $\theta_m=5^\circ$ ;  $\theta_m=17.5^\circ$ ;  $\theta_m=42.5^\circ$  i  $\theta_m=55^\circ$ , respektivno, i opsegu struja  $i_A$ ,  $i_D=(0,1,2,\dots,8)$  A, ukazuju na uticaj struje faze D na fluksni obuhvat faze A kada je njihov magnetski polaritet različit odnosno isti. Pri tome, od interesa je naglasiti da se promena magnetskog polariteta faze D u FEM modelu vrši promenom smera odgovarajuće struje.

Sa povećanjem struje  $i_D$  pri konstantnoj vrednosti struje  $i_A$ , u slučaju različitog magnetskog polariteta faza A i D, fluksni obuhvat  $\Psi_A$  monotonno raste do određene vrednosti usled pozitivnog međusobnog fluksa koji postoji između njih. Međutim, nakon određene vrednosti struje  $i_D$  on se smanjuje usled dubokog magnetskog zasićenja delova jarma statora i rotora gde postoji preklapanje fluksa ovih faza. Pri istim uslovima, u slučaju istog magnetskog polariteta, usled negativnog međusobnog fluksa, ima se monotonno opadanje fluksnog obuhvata  $\Psi_A$  sa većom strminom opadanja kada jaram statora i rotora uđe u zasićenje. Dakle, statičke  $\Psi$ -i karakteristike jasno ukazuju na uticaj polariteta međusobnog fluksa na ukupni fluksni obuhvat faze.

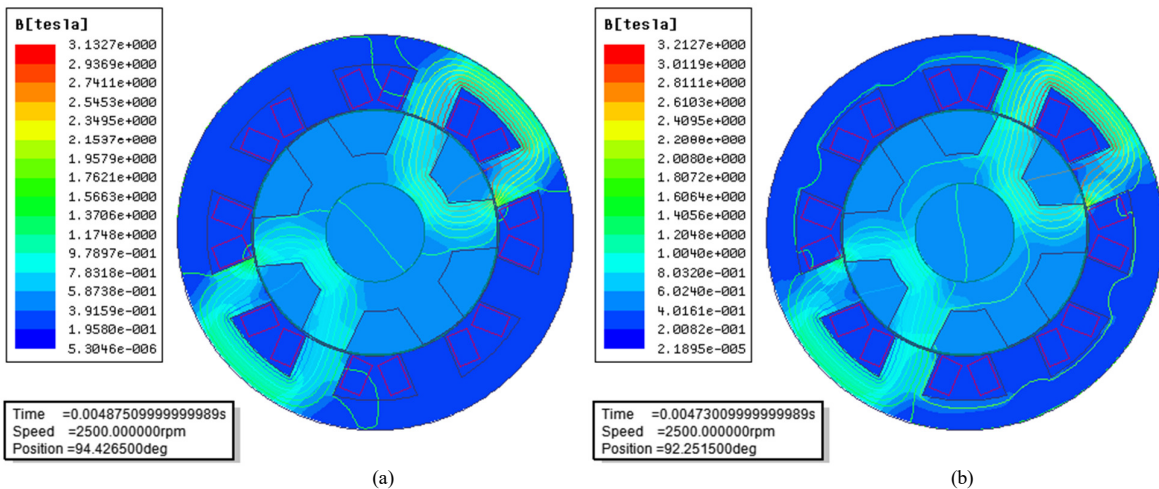
Efekat opadanja fluksnog obuhvata kada nastupi duboko zasićenje je izraženiji u slučaju istog magnetskog polariteta budući da su tada putanje magnetskog fluksa u opštem slučaju

duže. To se može jasno uočiti posmatrajući raspodelu magnetskog polja na Sl. 4 i 5. Na Sl. 4 su date raspodele magnetskog polja u trenucima kada su fluksni obuhvat faze A i D isti i različiti po amplitudi pri istom magnetskom polaritetu. Sa druge strane, Sl. 5 odgovara raspodeli magnetskog polja u istim trenucima, ali u slučaju različitog magnetskog polariteta. Kao posledica gore navedenog, veći pad magnetskog napona, odnosno manji fluksni obuhvat se ima u slučaju istog magnetskog polariteta nego u slučaju kada je on različit.

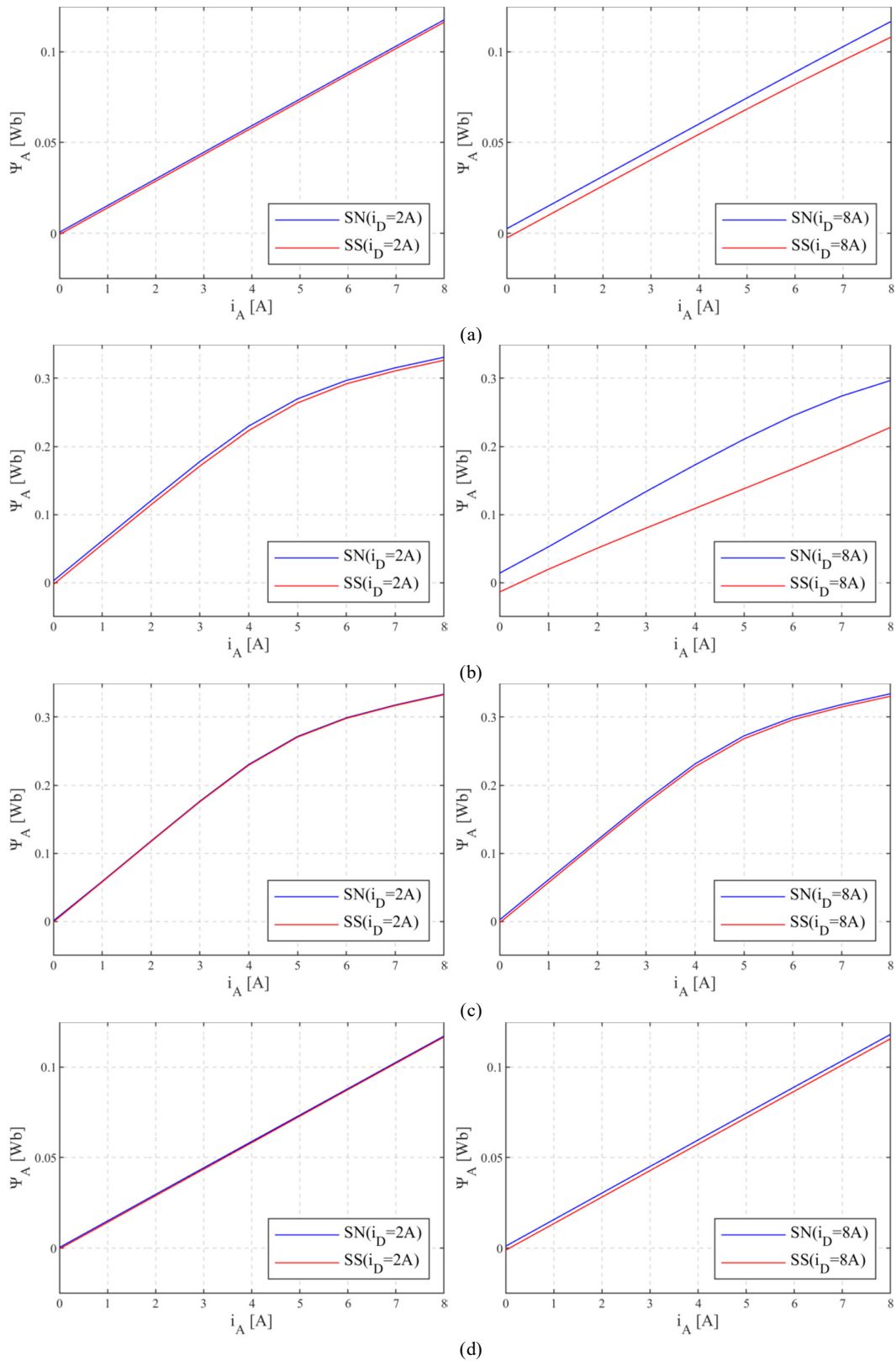
Dakle, uticaj faze koja prethodi posmatranoj se manifestuje na takav način da se ima veći fluksni obuhvat posmatrane faze kada je njihov magnetski polaritet različit. Pri tome, treba naglasiti da se benefit različitog magnetskog polariteta u odnosu na isti osetnije javlja prilikom veće preklapljenosti statorskih i rotorskih polova posmatrane faze A. Sa druge strane, kada ne postoji njihovo preklapanje ili se ono smanjuje, tada su efekti međusobne interakcije faza manje izraženi. Odnos fluksnih obuhvata, čak i pri dubokom zasićenju, je približno isti u oba slučaja. Međutim, uvek je veći u slučaju različitog magnetskog polariteta. Ove pojave se mogu jasno uočiti na Sl. 6, gde su za posmatrane ugaone položaje rotora izdvojene  $\Psi$ -i karakteristike faze A pri vrednosti struje faze D od 2 A i 8 A.



Sl. 4. Raspodela magnetskog polja u trenutku kada je (a)  $\Psi_D = \Psi_A$  i (b)  $\Psi_D > \Psi_A$  pri čemu su istovremeno pobudene faze D i A istog magnetskog polariteta.



Sl. 5. Raspodela magnetskog polja u trenutku kada je (a)  $\Psi_D = \Psi_A$  i (b)  $\Psi_D > \Psi_A$  pri čemu su istovremeno pobudene faze D i A različitog magnetskog polariteta.



Sl. 6. Uticaj struje faze D na fluksni obuhvat faze A za ugaoni položaj rotora (a)  $\theta_m=5^\circ$ , (b)  $\theta_m=17.5^\circ$ , (c)  $\theta_m=42.5^\circ$  i (d)  $\theta_m=55^\circ$  kada je magnetski polaritet susjednih faza D i A različit (SN) i isti (SS).

Slično gore sprovedenoj analizi, potrebno je utvrditi i efekte interakcije koji se javljaju kao posledica istovremenog

vođenja faza A i B. Do ovih zaključaka se može doći na osnovu rezultata koji prikazuju uticaj struje faze D na fluksni

obuhvat faze A. Naime, pažljivom analizom se može zaključiti da raspodeli magnetskog fluksa u mašini, kada su istovremeno pobuđene faze D i A, za neki ugaoni položaj rotora  $\theta_m$ , odgovara ista raspodela magnetskog fluksa za ugaoni položaj rotora  $\theta_m' = 60 - \theta_m$  kada su istovremeno pobuđene faze A i B. Pri tome je od interesa naglasiti da se za definisane kombinacije susednih faza motora posmatra odgovarajući magnetski polaritet. Zbog toga se u položaju rotora  $\theta_m = 5^\circ$  i  $\theta_m' = 55^\circ$  respektivno ima ista  $\Psi$ - $i$  karakteristika faze A kada su istovremeno pobuđene faze D i A odnosno A i B, respektivno. Slično važi i za druga dva razmatrana položaja rotora.

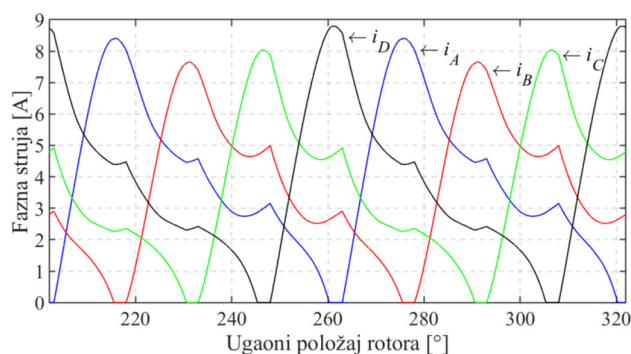
#### IV. ANALIZA UTICAJA INTERKCIJE FAZA NA TRANZIJENTNE KARAKTERISTIKE

Prethodno sprovedena analiza koja se odnosila na statičke  $\Psi$ - $i$  karakteristike pruža mogućnost da se analizira i uticaj magnetskog polariteta faza na tranzijentne karakteristike. To će se pokazati na primeru radne tačke koju karakteriše veoma izražena interakcija faza. Ova radna tačka je definisana kontrolnim parametrima: naponom napajanja ( $V_{DC}$ ), uglom uključenja ( $\theta_{ON}$ ), uglom isključenja ( $\theta_{OFF}$ ) i brzinom obrtanja ( $n$ ) koji su dati u Tabeli 3. Odgovarajući talasni oblici faznih struja i elektromagnetskog momenta su prikazani na Sl. 7 i 8, respektivno.

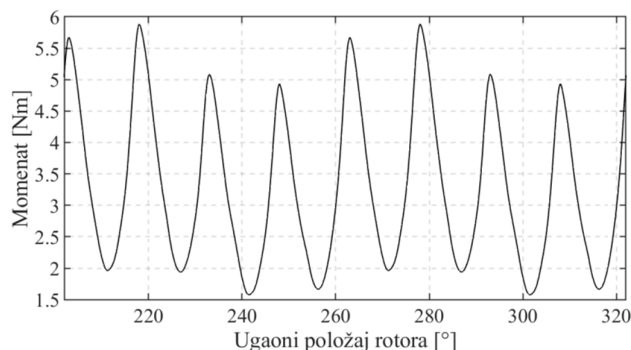
Saglasno Sl. 7, posmatranu radnu tačku karakteriše veliko preklapanje u vođenju faza budući da su tokom električnog ciklusa pobuđene tri ili sve četiri faze motora. Kao posledica izraženih efekata interakcije faza dolazi do nesimetrije faznih struja jer sekvencu pobuđivanja faza A-B-C-D-A-B-C-D karakteriše magnetska nesimetrija S-S-S-N-N-N-N. Posmatrajući magnetsku sekvencu, može se uočiti da je tokom magnetizacije kod sve tri faze koje prethode fazi D magnetski polaritet isti kao za fazu D. Zbog toga je i vršna vrednost struje  $i_D$  najveća. Budući da pobuđivanju faze A prethodi pobuđivanje faze D, saglasno tome i magnetskom polaritetu preostalih faza koje joj prethode, nakon faze D efekti interakcije faza su najizraženiji u fazi A. Sa druge strane, za faze B i C taj efekat je približno isti, ali je u izvesnoj meri izraženiji u fazi C jer se u dve od tri faze koje prethode fazi C ima isti magnetski polaritet kao kod faze C, dok se slučaju faze B to ima u jednoj od tri faze.

U trenutku početka demagnetizacije faznog namotaja, efekti interakcije faza su najizraženiji u struji  $i_A$  jer je tada magnetski polaritet kod faze A isti kao kod preostalih faza koje je slede. Analogno, za razliku od magnetizacije, sada su ovi efekti izraženiji kod struje  $i_B$  u odnosu na struju  $i_C$  dok je najmanji uticaj na struju  $i_D$ . Pored razmatranih delova talasnih oblika faznih struja, od interesa je uočiti i pojavu koju karakteriše porast struje tokom demagnetizacije. Ova pojava je najviše izražena kod struje  $i_A$  a zatim kod  $i_B$ ,  $i_D$  i  $i_C$ .

Izražena nesimetrija u talasnim oblicima faznih struja je u direktnoj vezi sa magnetskim polaritetom faza koje se isključuju ili uključuju i njihovim uticajem na preostale



Sl. 7. Fazne struje 8/6 SRM-a za radni režim definisan u Tabeli 3.



Sl. 8. Elektromagnetski moment 8/6 SRM-a za radni režim definisan u Tabeli 3.

aktivne faze jer u trenutku komutacije faza dolazi do nagle promene rezultujućeg magnetskog zasićenja mašine. Pri tome, pojave usled efekata rezultujućeg magnetskog zasićenja su izraženije kada je veći broj pobuđenih faza istog magnetskog polariteta. Pored toga, od interesa je istaći da na talasni oblik struje posmatrane faze, pored dominantnog uticaja susednih faza utiče i njena interakcija sa odgovarajućom ortogonalnom fazom. Taj efekat se manifestuje tokom značajnijeg istovremenog vođenja faza što se ima u ovom primeru, ali i tokom komutacije faza. Nesimetrija koja postoji između talasnih oblika faznih struja se preslikava i na odgovarajuće efektivne vrednosti koje su date u Tabeli 4.

Kao posledica rezultujućih efekata interakcije faza talasni oblik momenta je takav da su sva četiri impulsa momenta tokom električnog ciklusa različita saglasno Sl. 5. Imajući u vidu analizu uticaja magnetskog polariteta faza na fluksne obuhvate, kao i odgovarajuće talasne oblike faznih struja, u delu električnog ciklusa tokom kojeg se magnetiše faza A impuls momenta ima najveću trenutnu vrednost i to u trenutku demagnetizacije faze D koja prethodi fazi A u sekvenci pobuđivanja. Nakon toga, slede vršne vrednosti impulsa momenta tokom magnetizacije faza D, B i C u trenucima demagnetizacije faza koje im prethode u sekvenci pobuđivanja a to su C, A i B respektivno.

Imajući u vidu rezultate sprovedene analize, uobičajena je praksa da se pobuđivanje 8/6 SRM-a vrši magnetskom sekvencom (S-N-S-N-N-S-N-S) kod koje su tri od četiri

TABELA 3  
RADNI REŽIM SA IZRAŽENOM INTERAKCIJOM FAZA

$V_{DC}$ [V]	$\theta_{ON}$ [°]	$\theta_{OFF}$ [°]	$n$ [ob/min]
220	23	53	3500

TABELA 4  
EFEKTIVNE VREDNOSTI FAZNIH STRUJA ZA RADNU TAČKU  
DEFINISANU U TABELI 3

$I_A$ [A]	$I_B$ [A]	$I_C$ [A]	$I_D$ [A]
4.5711	4.2149	4.2251	4.5572

kombinacije susednih faza motora različite, a jedna ista. Korišćenje ove sekvence pobuđivanja omogućava postizanje boljih performansi pogona sa 8/6 SRM-om u odnosu na analiziranu magnetsku sekvencu. Pri tome, u cilju postizanja najvećeg odnosa srednje vrednosti momenta i efektivne vrednosti struje ili ripla momenta, od suštinske je važnosti optimizacija kontrolnih parametara.

#### V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena analiza uticaja magnetskog polariteta faza na statičke i tranzijentne karakteristike 8/6 SRM-a koristeći model koji se bazira na metodi konačnih elemenata u programskom paketu Ansys Electronics. Rezultati statičkih karakteristika pokazuju da je fluksni obuhvat posmatrane faze veći ako je ona u interakciji sa fazom različitog magnetskog polariteta u odnosu na nju. Pri tome, benefit od različitog magnetskog polariteta u odnosu na isti se osetnije javlja prilikom veće preklapljenosti statorskih i rotorskih polova. Sa druge strane, kada ne postoji njihovo preklapanje ili se ono smanjuje, tada su efekti međusobne interakcije faza manje izraženi. Odnos fluksnih obuhvata, čak i pri dubokom zasićenju, je približno isti u oba slučaja. Međutim, uvek je veći u slučaju različitog magnetskog polariteta. Pored toga, kada postoji veoma izraženo zasićenje jarma mašine, tada je usled magnetske nesimetrije faza veoma izražena nesimetrija faznih struja kao i impulsa u talasnom obliku momenta. Imajući u vidu gore navedeno, u cilju postizanja boljih performansi 8/6 SRM-a, faze motora se pobuđuju na način da su odgovarajući magnetski polariteti sukcesivnih faza motora dominantno različiti.

#### LITERATURA

- [1] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications," *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015.
- [2] R. Cardenas *et al.*, "Control of switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2005, vol. 20, no. 4, pp. 781-791, Dec. 2005.
- [3] A. Chiba *et al.*, "Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 175-182, March 2015.
- [4] V. Valdivia *et al.*, "Behavioral modeling of a switched reluctance generator for aircraft power systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2690-2699, June 2014.
- [5] A. K. Jain and N. Mohan, "Dynamic modeling, experimental characterization, and verification for SRM operation with simultaneous two-phase excitation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1238-1249, Jun. 2006.
- [6] P. Pillay, Y. Liu, W. Cai, and T. Sebastian, "Multiphase operation of switched reluctance motor drives," in *Proc. 32nd IAS Annu. Meeting*, vol. 1, 1997, pp. 310-317.
- [7] Qu, B.; Song, J.; Liang, T.; Zhang, H., "Mutual coupling and its effect on torque waveform of even number phase switched reluctance motor," *Electrical Machines and Systems, International Conference on*, pp.3405-3410, Oct. 2008.
- [8] J. C. Moreira and T. A. Lipo, "Simulation of a four phase switched reluctance motor including the effects of mutual coupling," *Elect. Mach. Power Syst.*, vol. 16, pp. 281-289, 1989.
- [9] R. M. Davis and I. H. Al-Bahadly, "Experimental evaluation of mutual inductance in a switched reluctance motor," in *4th IEEE Int. Conf. Power Electronics and Variable Speed Drives*, London, U.K., 1991, pp. 243-248.
- [10] D. Panda, V. Ramanarayanan, "Mutual coupling and its effect on steady-state performance and position estimation of even and odd number phase switched reluctance motor drive," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, pp. 3445-3456, August 2007.
- [11] Essah, D. N.; Sudhoff, S.D., "An improved analytical model for the switched reluctance motor," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.18, no.3, pp.349,356, Sept. 2003.
- [12] M. A. Preston and J. P. Lyons, "A switched reluctance motor model with mutual coupling and multi-phase excitation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 6, pp. 5243-5245, Nov. 1991.
- [13] S. Cao and K. J. Tseng, "Evaluation of neighboring phase coupling effects of switched reluctance motor with dynamic modeling approach," in *Proc. PIEMC 2000*, vol. 2, 2000, pp. 881-886.
- [14] A. K. Jain and N. Mohan, "Dynamic modeling, experimental characterization, and verification for SRM operation with simultaneous two-phase excitation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1238-1249, Jun. 2006.
- [15] R. Mikail, I. Husain, and M. Islam, Finite element based analytical model for controller development of switched reluctance machines, in *Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition (ESSE 2013)*, Denver, pp. 920-925, September 2013.
- [16] D. S. Mihic, M. V. Terzic, and S. N. Vukosavic, "A New Nonlinear Analytical Model of the SRM With Included Multiphase Coupling," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2017, 32, (4), pp. 1322-1334.

#### ABSTRACT

To improve performance, the operation of a switched reluctance motor (SRM) requires simultaneous excitation of multiple motor phases. Since the magnetic polarity of excited phases can be the same or different, the influence of magnetic polarity on the flux linkages of 8/6 SRM was analyzed in this paper in detail. The analysis is performed based on static characteristics obtained using a machine model in a Finite Element Method (FEM) software. Furthermore, considering that the magnetic symmetry between phases cannot be achieved in an 8/6 SRM when using an Asymmetrical Half-Bridge Converter (AHBC), the resulting phase interactions are highly pronounced and are studied by analyzing waveforms of phase currents and torque.

#### Analysis of influence magnetic phase interaction on the characteristics of 8/6 SRM

Dragan S. Mihic,  
Mladen V. Terzić,  
Žarko V. Koprivica,  
Bogdan M. Brković