

PRIMENA TIPIČNIH STRATEGIJA UPRAVLJANJA POGONOM SA SINHRONIM MOTOROM SA STALNIM MAGNETIMA U CILJU POSTIZANJA OPTIMALNIH PERFORMANSI

Uroš MILOŠEVIĆ, Mladen TERZIĆ, Leposava RISTIĆ

*Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd*

Apstrakt: U cilju komparativne analize tipičnih strategija upravljanja pogonom sa sinhronim motorom sa stalnim magnetima, u prvom delu rada izvršeno je projektovanje ovog motora. Obrazložen je princip projektovanja sinhronog motora sa utisnutim stalnim magnetima u rotoru, a zatim je dobijeni projekat verifikovan uz pomoć odgovarajućih softvera. Pored verifikacije dobijenih dimenzija, primenom izabranog softvera određeni su bitni parametri i električne veličine za analizirani tip motora. U drugom delu rada, obrađene su četiri strategije upravljanja pogonom sa prethodno projektovanim sinhronim motorom sa stalnim magnetima, kao i način implementacije ovih upravljanja u dinamički model pogona sa regulacijom brzine. Na osnovu dobijenih rezultata simulacija na modelu, izvedeni su odgovarajući zaključci u pogledu prednosti i mana analiziranih strategija upravljanja.

Ključne reči: sinhroni motor sa stalnim magnetima, projektovanje, vektorsko upravljanje, upravljačke strategije

1. UVOD

Sinhroni motori sa stalnim magnetima (*Permanent Magnet Synchronous Motors*, PMSM) imaju sve češću primenu u regulisanim elektromotornim pogonima, pre svega zbog veće energetske efikasnosti u odnosu na druge motore. Imaju veliku gustinu snage, dobar prenos toplote i povoljne upravljačke karakteristike, zbog čega se pored ostalih aplikacija koriste i u servopogonima. Način ugradnje stalnih magneta u magnetsko kolo rotora utiče na parametre ovih motora i prema tome se dele na motore sa spoljašnjom i unutrašnjom montažom magneta. Sinhroni motor sa stalnim magnetima utisnutim u rotor (*Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*, IPMSM) pripada grupi motora sa unutrašnjom montažom stalnih magneta. Ove motore karakterišu različite vrednosti induktivnosti po uzdužnoj i poprečnoj osi, rad u oblasti slabljenja polja i značajna reluktantna komponenta momenta. Zbog toga što imaju širi radni opseg momenta i brzina, češće se koriste od PMSM sa spoljašnjom montažom magneta i predmet su analize u ovom radu. Princip projektovanja ovog tipa motora ukratko je objašnjen u prvom delu rada.

Najzastupljeniji način upravljanja pogonom sa sinhronim motorom sa stalnim magnetima je vektorsko upravljanje. Primenom dodatnih strategija upravljanja koje se zasnivaju na vektorskom upravljanju mogu se ostvariti zahtevane performanse pogona. U radu su analizirane četiri strategije upravljanja pogonom sa PMSM i to:

- Upravljanje pri konstantnom uglu momenta;
- Upravljanje pri jediničnom faktoru snage;
- Upravljanje pri konstantnoj vrednosti fluksa u zazoru mašine;
- Upravljanje pri optimalnom odnosu momenta i struje.

Rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju, nakon uvoda su prikazani osnovni principi projektovanja sinhronog motora sa utisnutim stalnim magnetima u rotoru; u trećem poglavlju je obrađena glavna tema rada, odnosno pomenute strategije upravljanja pogonom sa ovim tipom motora primenom simulacija na razvijenom dinamičkom modelu. Predstavljani su rezultati simulacija, na osnovu kojih je izvršena uporedna analiza razmatranih strategija upravljanja u cilju postizanja boljih performansi pogona i izveden zaključak u poslednjem poglavlju.

2. PRINCIP PROJEKTOVANJA SINHRONOG MOTORA SA UTISNUTIM STALNIM MAGNETIMA U ROTORU (IPMSM)

U ovom poglavlju je ukratko objašnjen princip projektovanja IPMSM-a. Takođe, prikazani su i rezultati primene korišćenih softvera pri verifikaciji dobijenog projekta motora.

2.1. Projektovanje motora primenom analitičkih relacija

Projektovanje motora vrši se prema ulaznim parametrima i ograničenjima. Ulazni podaci diktiraju postupak samog proračuna, zavisno od toga šta je od dimenzija i veličina poznato, odnosno zahtevano. U konkretnom slučaju projektovan je motor snage 800W, linijskog napona od 400V.

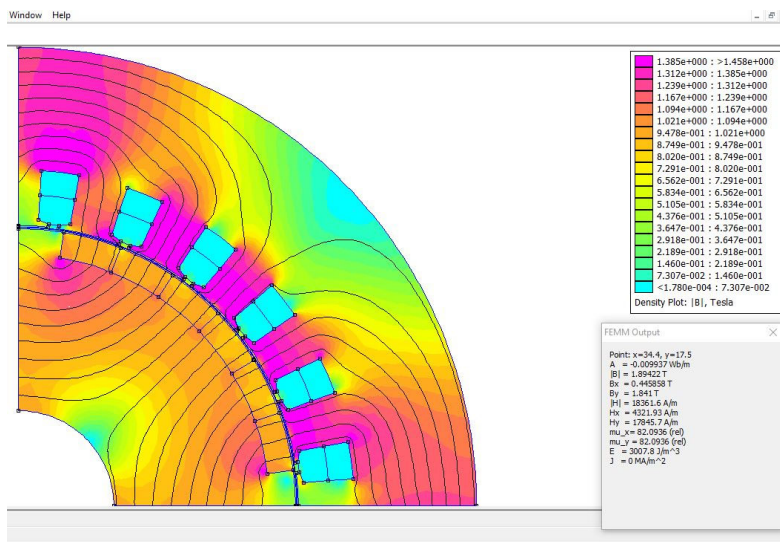
Za kompletan projekat motora, treba izračunati sve dimenzije motora, kao i veličine od značaja za izradu motora. U konkretnom slučaju, prvo je izabran tip feromagnetskog materijala za limove, tip stalnih magneta, kao i potrebna veličina provodnika. Zatim su izračunate dimenzije motora kao što su unutrašnji prečnik statora, širina zazora, dimenzije zubaca i žlebova. Određen je broj navojaka po fazi i broj provodnika po žlebu. Analitičke relacije korićene za ove proračune su preuzete su iz literature [1-2].

Nakon proračuna svih dimenzija, računati su bitni parametri motora, kao što su induktivnosti po uzdužnoj i poprečnoj osi i fazna elektromotorna sila (EMS) [1],[3].

Na osnovu dobijenih vrednosti za dimenzije, unosi se crtež poprečnog preseka dela motora i vrši verifikacija u odgovarajućim softverskim alatima.

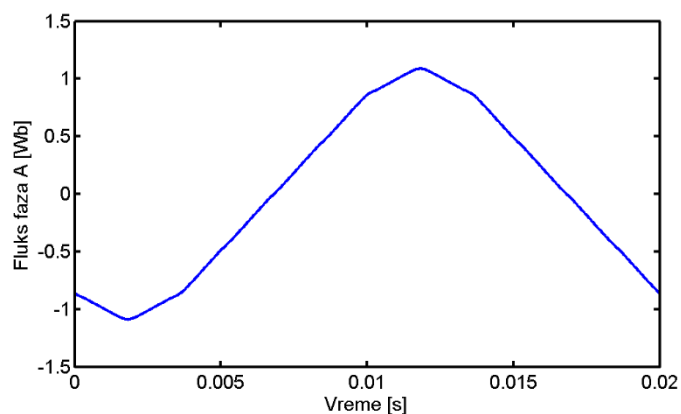
2.2. Verifikacija dobijenog projekta motora primenom odgovarajućih softvera

Glavni pokazatelji da su dimenzije dobre su raspodela polja, odnosno magnetna indukcija u delovima motora u očekivanim i dozvoljenim granicama, kao i vrednost fazne EMS koja treba da bude približna analitički proračunatoj vrednosti što će biti analizirano pomoću softvera. Zupci statora su najkritičniji po pitanju ulaska u zasićenje te treba proveriti njihove vrednosti indukcije, kao i vrednosti indukcije jarma statora. Raspodela polja u projektovanom motoru primenom softvera data je na slici 1.



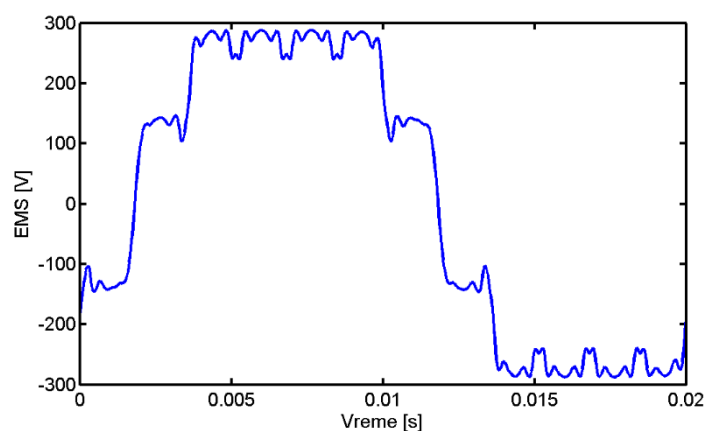
Slika 1. Raspodela polja u projektovanom motoru

Simulacijama kojim se vrši fiktivno obrtanje rotora dolazi se do talasnog oblika fluksa jedne faze koji se menja u vremenu u zavisnosti od položaja rotora, kao što je prikazano na slici 2. U modelu su izvršena podešenja koja obezbeđuju da se simulacijama dobije samo fluks koji potiče od stalnih magneta.

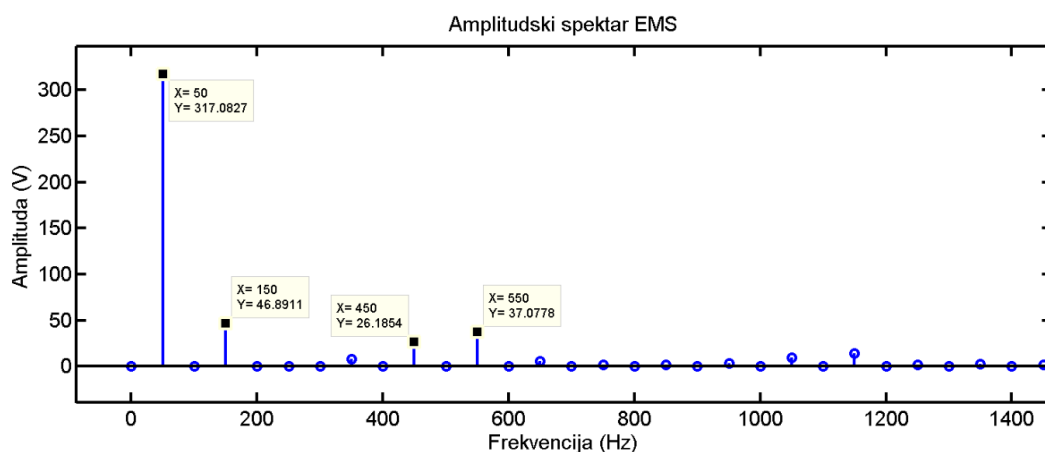


Slika 2. Talasni oblik fluksa faze A u vremenu dobijen promenom položaja rotora

Numeričkim diferenciranjem fluksa, dobija se vremenska zavisnost fazne EMS, koja je prikazana na slici 3, dok je amplitudski spektar ove EMS dat na slici 4.



Slika 3. Talasni oblik fazne EMS



Slika 4. Amplitudski spektar fazne EMS

Sa slika 3 i 4 vidi se prisustvo viših neparnih harmonika, među kojima su dominantni treći, deveti i jedanaesti harmonik. Inicijalni projekat motora zadovoljava ograničenja i ulazne parametre, a kako se uticaj harmonika odražava na struju, pa samim tim i na kvalitet električne energije pri upotrebi motora u elektromotornom pogonu, vidi se da ima prostora za dalje poboljšanje inicijalnog dizajna motora.

Vrednosti za induktivnosti po uzdužnoj (L_d) i poprečnoj (L_q) osi motora, dobijene analitičkim putem, kao i primenom softvera, date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Vrednosti induktivnosti proračunate analitički i primenom softvera

Parametar	Oznaka	Vrednosti dobijene primenom softvera [mH]	Vrednosti dobijene analitički [mH]	Procentualno odstupanje [%]
Induktivnost po porečnoj (q) osi	L_q	165,8	175,15	5,3
Induktivnost po uzdužnoj (d) osi	L_d	48	54,32	11,6
odnos L_q/L_d	ρ	3,45	3,22	

Dobijen je motor sa odnosom induktivnosti po q i d osi većim od 3, čiji je uticaj na performanse pogona izveden u zaključku na kraju rada.

3. STRATEGIJE UPRAVLJANJA POGONOM SA SINHRONIM MOTOROM SA STALNIM MAGNETIMA I NJIHOVA UPOREDNA ANALIZA

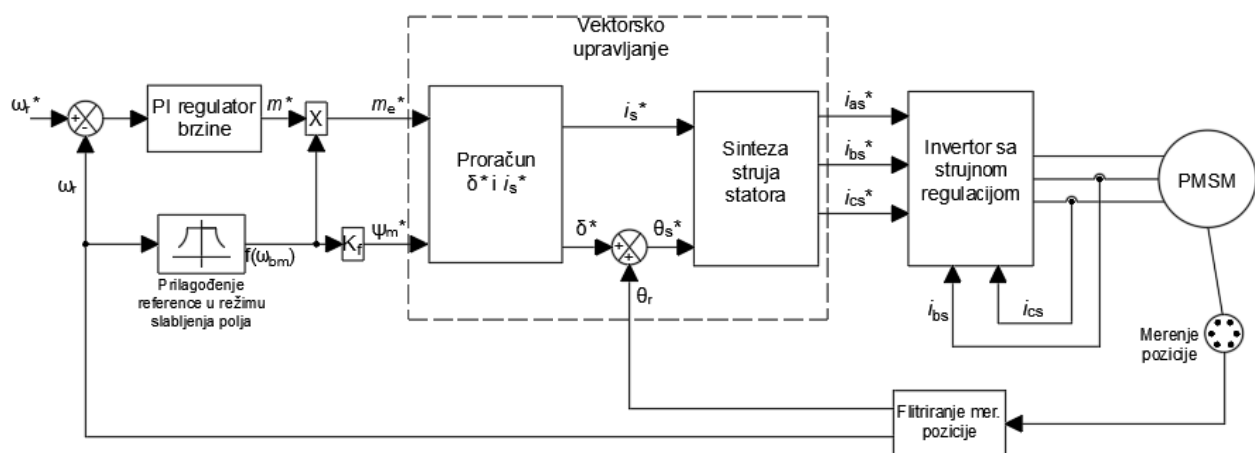
U ovom poglavlju navedene su korišćene strategije upravljanja pogonom sa PMSM, način implementacije ovih upravljanja u dinamički model, kao i rezultati simulacija na modelu, odnosno radne karakteristike pogona pri različitim upravljanjima. Na kraju je izvršena uporedna analiza istih. Pri simulacijama su korišćeni parametri prethodno projektovanog motora.

3.1. Tipične strategije upravljanja pogonom sa PMSM i njihova implementacija u simulacioni model

Principijalni blok dijagram vektorskog upravljanja prikazan je na slici 5. Za pogon sa vektorski upravljanim PMSM razvijen je dinamički model u koji su dodatno implementirane četiri strategije upravljanja, i to:

- Upravljanje pri konstantnom uglu momenta δ (ugao između ose fluksa permanentnih magneta i fazora struje statora);
- Upravljanje pri jediničnom faktoru snage ($\cos \phi = 1$);
- Upravljanje pri konstantnoj vrednosti fluksa u zazoru mašine ($\psi_m = \text{const}$);
- Upravljanje pri optimalnom odnosu momenta i struje (M_e/I_s).

Vektorsko upravljanje pogonom sa PMSM se zasniva na proračunu ugla momenta i amplitude fazora struje [4].



Slika 5. Principijalni blok dijagram vektorskog upravljanja pogonom sa PMSM

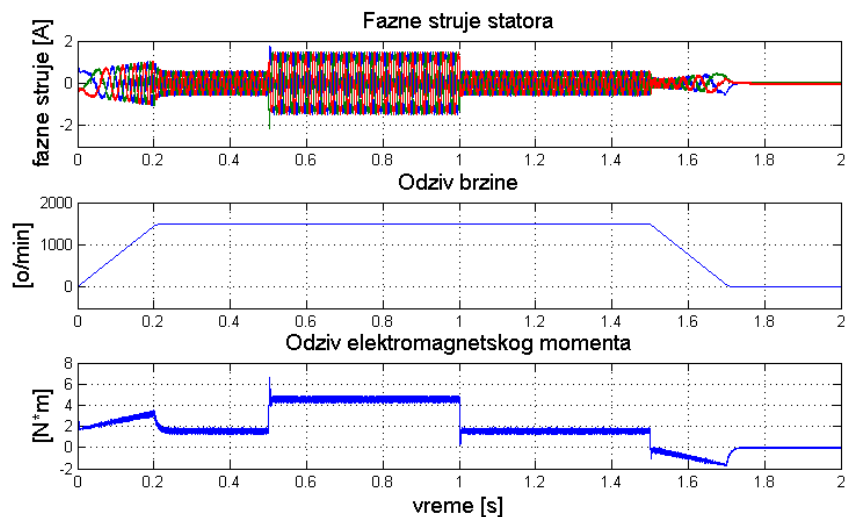
Analitička relacija za ugao momenta različita je za svako od četiri upravljanja i dobija se na osnovu početnog uslova koji je ujedno i zahtevana performansa pogona.

Razvijeni simulacioni model sastoji od bloka za PMSM, koji je preko bloka za trofazni inverter priključen na jednosmerni izvor napona. Modelovan je pogon sa regulacijom brzine. Upravljački deo modelovanog pogona se sastoji od regulacione petlje po brzini i regulacione petlje po struji, te su u modelu korišćeni PI regulatori za brzinu i za struju. Sinteza parametara regulatora izvršena je prema literaturi [5]. Kako se na izlazu regulatora brzine dobija referenca elektromagnetskog momenta, regulator struje je povezan sa regulatorom brzine posredstvom bloka u kojem se računaju željeni ugao momenta i fazor referentne struje, odnosno bloka u kome je implementirano vektorsko upravljanje (slika 5). U ovom bloku proračun ugla momenta različit je za svaku od analizirane četiri strategije upravljanja.

Za svaku strategiju upravljanja izvršena je simulacija prema zadatom putnom dijagramu, pri kome se motor zaleće iz stanja mirovanja do nominalne brzine od 1500 o/min za 0,2s, radi sa nominalnom brzinom 1,3s, a zatim usporava 0,2 s do zaustavljanja. Ova simulacija je ponovljena za različita opterećenja u cilju snimanja radnih karakteristika. Radne karakteristike prikazuju veličine od značaja za analizirani elektromotorni pogon u stacionarnom stanju, a često se prikazuju u funkciji od opterećenja.

3.2. Upravljanje pri konstantnom uglu momenta

Ovo je najjednostavnija strategija upravljanja, u kojoj se zadaje konstantni ugao momenta od 90 stepeni. Putni dijagram pogona pri ovom upravljanju prikazan je na slici 6.



Slika 6. Putni dijagram pogona sa upravljanjem pri konstantnom uglu momenta δ

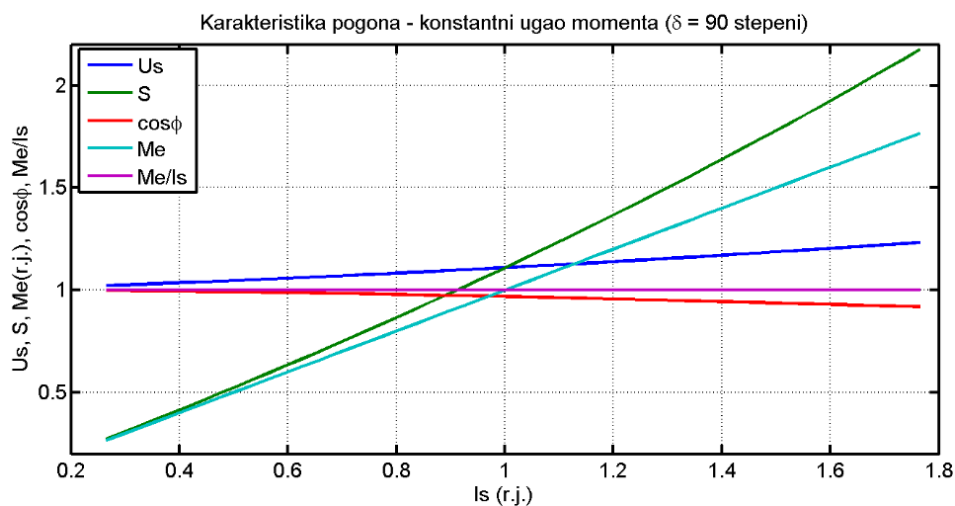
Radne karakteristike pogona sa upravljanjem pri konstantnom uglu momenta prikazane su na slici 7. Vrednosti za napon statora (U_s), prividnu snagu (S), faktor snage ($\cos \phi$), moment motora (M_e) i odnos momenta i struje statora (M_e/I_s), date su u relativnim jedinicama (r.j).

Analizom radnih karakteristika sa slike 7, može se zaključiti da se pri povećanju opterećenja povećava i zahtev za naponom, dok faktor snage opada sa opterećenjem, što znači da raste potrebna reaktivna snaga. Odnos elektromagnetskog momenta i struje je jednak jedinici za svako opterećenje.

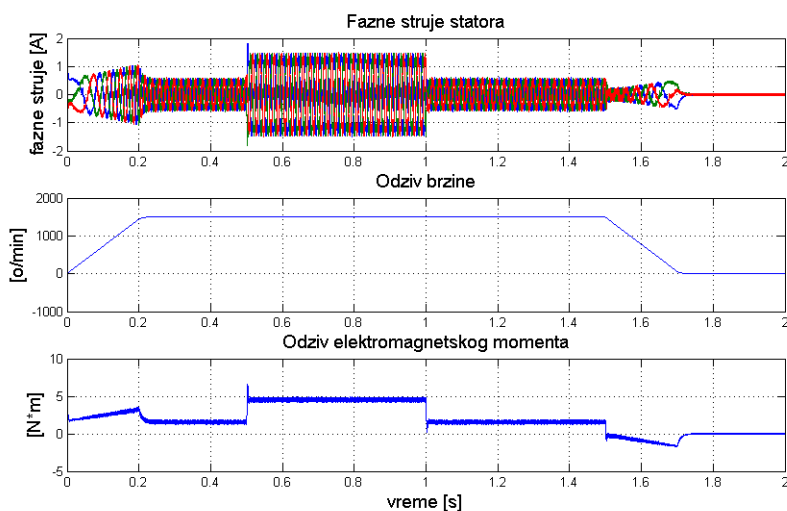
3.3. Upravljanje pri jediničnom faktoru snage

Pri ovom upravljanju faktor snage motora se održava na jedinici, što je polazni uslov pri izvođenju izraza za ugao momenta.

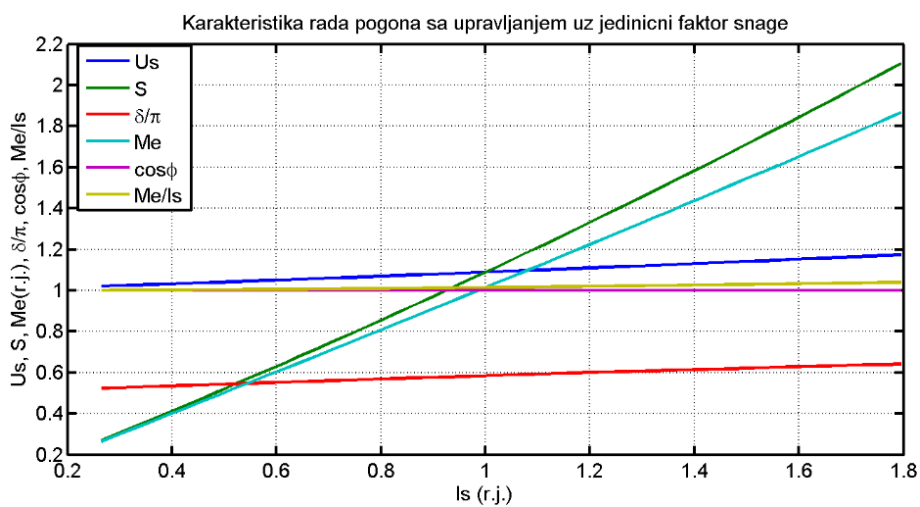
Putni dijagram pogona pri ovom upravljanju prikazan je na slici 8, dok su radne karakteristike pogona prikazane na slici 9.



Slika 7. Radne karakteristike pogona sa upravljanjem pri konstantnom uglu momenta



Slika 8. Putni dijagram pogona sa upravljanjem pri jediničnom faktoru snage



Slika 9. Radne karakteristike pogona sa upravljanjem pri jediničnom faktoru snage

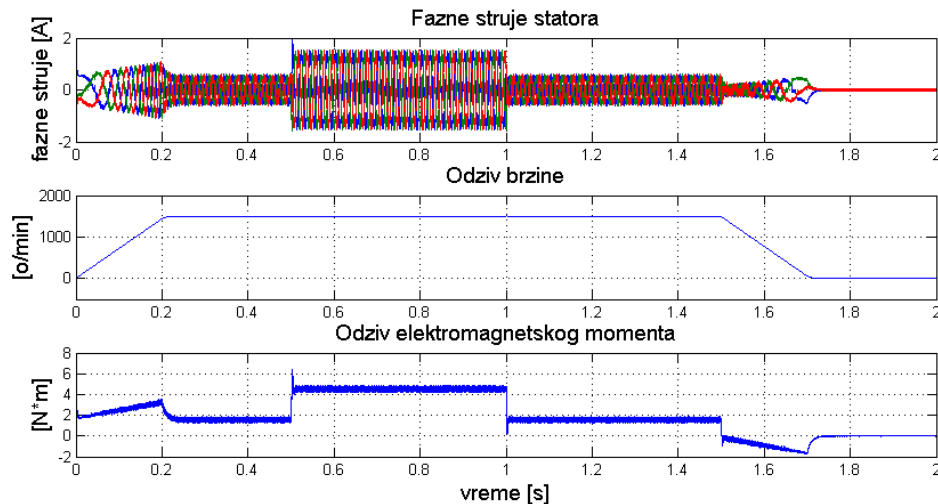
Analizom radnih karakteristika sa slike 9, može se uočiti da zahtevani napon raste sa opterećenjem, ali je manji u odnosu na napon pri upravljanju sa konstantnim uglom momenta. Faktor snage je očekivano jednak jedinici. Razvijeni moment je nešto veći od momenta iz

prethodnog načina upravljanja i po jedinici struje blago raste sa opterećenjem. Vidi se da je odnos δ/π veći od 0,5, odnosno veći je od 90 stepeni, što je i očekivano, kao i da raste sa opterećenjem.

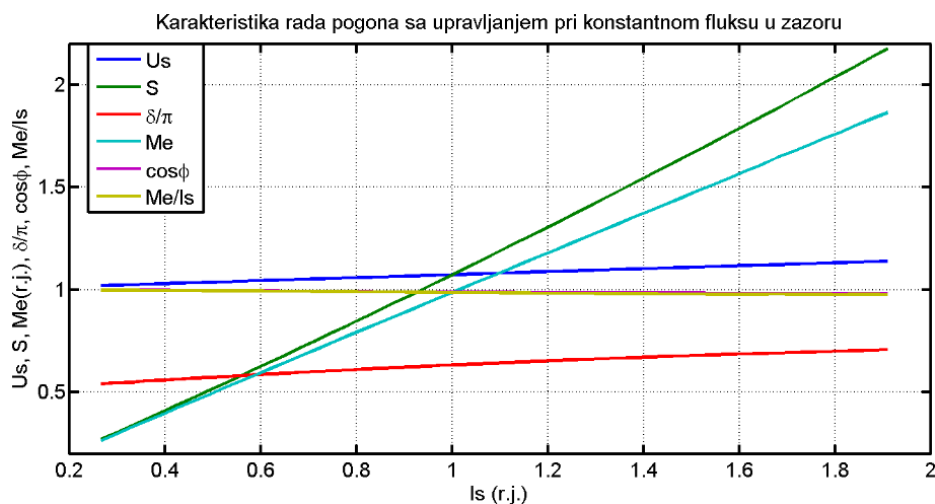
3.4. Upravljanje pri konstantnoj vrednosti fluksa u zazoru mašine

Pri ovom upravljanju vrednost rezultantnog fluksa u zazoru mašine održava se konstantnom, najčešće na vrednosti jednakoj fluksa stalnih magneta.

Putni dijagram pogona pri ovom upravljanju prikazan je na slici 10, dok su radne karakteristike pogona prikazane na slici 11.



Slika 10. Putni dijagram pogona sa upravljanjem pri konstantnoj vrednosti rez. fluksa



Slika 11. Radne karakteristike pogona sa upravljanjem pri konstantnoj vrednosti rezultantnog fluksa

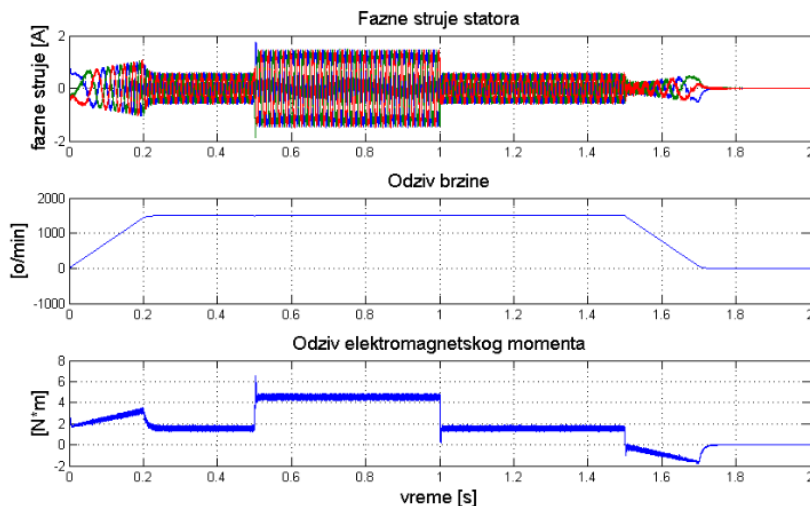
Sa slike 11 se vidi da je zahtevani napon manji nego za prethodne dve upravljačke strategije, što je posledica održavanja fluksa na konstantnoj vrednosti. Faktor snage je približan jedinici, te je mali zahtev za reaktivnom snagom. Razvijeni elektromagnetski moment je manji u odnosu na prethodna upravljanja, ali odnos momenta i struje vrlo malo opada ispod jedinice pri porastu opterećenja. Ugao momenta je i pri ovom upravljanju veći od 90 stepeni i raste sa opterećenjem.

3.5. Upravljanje pri optimalnom odnosu momenta i struje

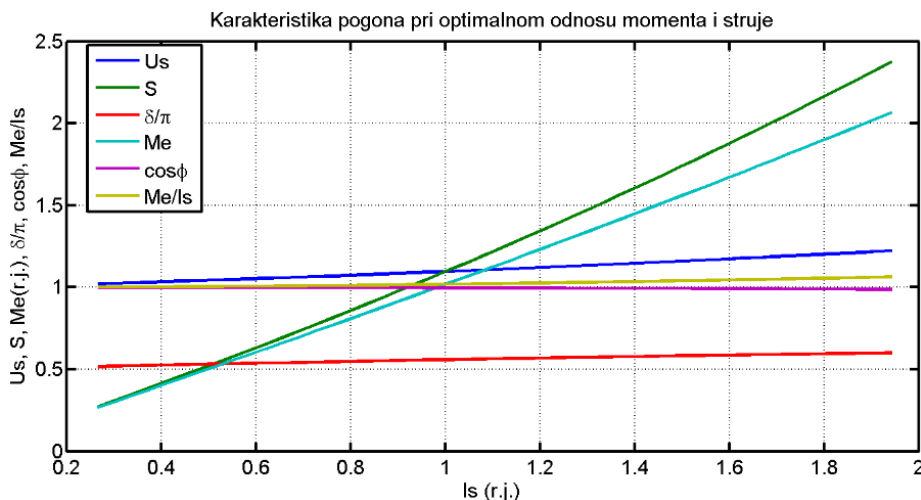
Ova strategija upravljanja se zasniva na maksimizaciji elektromagnetskog momenta po amperu struje. Kao i kod prethodnih upravljanja, iz ovog uslova se dobija analitička relacija za proračun ugla momenta.

Putni dijagram pogona pri ovom upravljanju prikazan je na slici 12, dok su radne karakteristike pogona prikazane na slici 13.

Analizom radnih karakteristika prikazanih na slici 13, može se zaključiti da je zahtev za naponom sličan kao kod upravljanja sa jediničnim faktorom snage, dok je faktor snage približan jedinici pri svim opterećenjima. Razvijeni elektromagnetski momenat je najveći pri ovom upravljanju, a odnos momenta po jedinici struje raste sa opterećenjem.



Slika 12. Putni dijagram pogona sa upravljanjem pri optimalnom odnosu momenta i struje



Slika 13. Radne karakteristike pogona sa upravljanjem pri optimalnom odnosu momenta i struje

3.6. Tabelarni prikaz karakterističnih veličina pri različitim upravljanjima

U tabeli 2 prikazane su vrednosti karakterističnih veličina pri različitim načinima upravljanja pri nominalnoj struji, odnosno pri vrednosti struje od jedne relativne jedinice.

U tabeli se vidi da se veličine za različita upravljanja ne razlikuju znatno pri nominalnoj struji. Ipak, najmanji zahtevani napon i snaga koje treba da obezbedi inverter su pri upravljanju pri konstantnom fluksu u zazoru mašine, dok su najveći zahtevi za naponom i prividnom snagom pri upravljanju pri konstantnom uglu momenta. Faktor snage najmanji je kod upravljanja sa konstantnim uglom momenta, te inverter mora da obezbedi i reaktivnu snagu, dok je pri ostalim upravljanjima jednak ili približan jedinici.

Najveći elektromagnetski moment razvija se upravljanjem pri optimalnom odnosu momenta i struje. Najmanji odnos elektromagnetskog momenta i struje se ima pri upravljanju pri konstantnom fluksu u zazoru motora. Ipak, nema značajnog pada odnosa momenta i struje ispod jedinice što je

posledica velikog odnosa induktivnosti L_q i L_d ($\rho=3,45$), te reluktantna komponenta momenta znatno doprinosi ukupno razvijenom elektromagnetskom momentu za veliki opseg opterećenja.

Tabela 2. Karakteristične veličine pri nominalnoj struji

Upravljanje		Konstantni ugao momenta	Jedinični faktor snage	Konstantni fluks u zazoru	Optimalni odnos momenta i struje
Veličina					
Napon	U_s (r.j.)	1,110	1,089	1,073	1,096
Prividna snaga	S (r.j.)	1,110	1,089	1,073	1,096
Elektromagnetski moment	M_e (r.j.)	1	1,014	0,987	1,018
Faktor snage	$\cos\varphi$	0,968	1	0,989	0,997
Ugao momenta	δ (°)	90	104,4	113,4	100,8

Može se primetiti da upravljanje pogonom pri konstantnom uglu momenta daje nešto slabije performanse u odnosu na ostala upravljanja, ali je najjednostavnije za implementaciju. Takođe, ovo upravljanje nije moguće koristiti u režimu slabljenja polja, odnosno za brzine veće od nominalne. Ostale strategije upravljanja mogu se koristiti za režim slabljenja polja, jer se upravlja negativnom strujom po d osi. Najpogodnije upravljanje za režim slabljenja polja je upravljanje pri konstantnom fluksu u zazoru mašine, kod koga se zadaje željena vrednost fluksa u mašini i održava konstantnom u toku rada pogona.

Ugao momenta veći od 90 stepeni znači da je komponenta struje po d osi negativna, što smanjuje rezultantni fluks, pa i gubitke u motoru. Ovo predstavlja prednost ostalih upravljanja u odnosu na upravljanje sa konstantnim uglom momenta.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se sastoji od dve celine. U prvoj celini naveden je princip projektovanja sinhronog motora sa utisnutim stalnim magnetima u rotoru, a zatim je dobijeni projekat verifikovan uz pomoć odgovarajućih softvera. Prednost softverskih alata su mogući proračuni i simulacije uz uvažavanje geometrije motora, a pritom su proračuni softvera vremenski nezahtevni. Pored verifikacije dobijenih dimenzija, u korišćenom softveru su dostupni bitni parametri i električne veličine za analizirani tip motora - induktivnosti motora, indukovane EMS-e i fluks po fazi motora koji potiče od stalnih magneta.

U drugoj celini obrađene su četiri strategije upravljanja pogonom sa PMSM, kao i način implementacije ovih upravljanja u dinamički model pogona sa regulacijom brzine. Svi potrebni parametri motora za simulacije uneti su iz prethodno projektovanog motora. U nastavku istraživanja, moglo bi se doći do rezultata koji su približniji eksperimentalnim, ukoliko bi se vršila kosimulacija između softvera koji se koristi za projektovanje motora i softvera koji se koristi za simulacije upravljanja na dinamičkom modelu motora.

Projektovan motor sa utisnutim stalnim magnetima ima znatnu razliku induktivnosti po q i d osi, gde njihov odnos iznosi 3,45. Pri vršenju uporedne analize radnih karakteristika pogona pri različitim upravljanjima zaključeno je da za sva upravljanja (osim za upravljanje pri konstantnom uglu momenta) postojeća anizotropnost rotora omogućava rad u značajnom opsegu opterećenja, usled značajne komponente reluktantnog momenta koja doprinosi ostvarenom elektromagnetskom momentu.

Karakteristike rada pogona sa ovim motorom u režimima slabljenja polja nisu razmatrane u ovom radu. Formirani simulacioni model mogao bi se nadograditi u cilju daljeg istraživanja na ovu temu. Na osnovu modela analiziranog u radu, zaključeno je da je najpogodnije upravljanje za režim

slabljenja polja upravljanje pri konstantnom fluksu u zazoru, gde se ta vrednost fluksa zadaje i u skladu sa zahtevanim performansama pogona varira u određenim granicama.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao tokom istraživanja koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije br. 2022/200103.

LITERATURA

- [1] J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, Motor Design Books LLC, USA, 2010.
- [2] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2014.
- [3] Nicola Bianchi, Thomas M. Jahns, *Design, Analysis, and Control of Interior PM Synchronous Machines*, Presented at the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA, 2004.
- [4] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press Taylor & Francis Group, USA, 2010.
- [5] Borislav Jeftenić, Veran Vasić, Đura Oros, *Regulisani elektromotorni pogoni – rešeni problemi sa elementima teorije*, Akademska misao, Beograd 2004.