

ANALIZA UPRAVLJANJA JEDNOSMERNIM MOTOROM BEZ ČETKICA**ANALYSIS OF THE BRUSHLESS DC MOTOR CONTROL**Stefan Šoić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – Energetika, elektronika i telekomunikacije**

Kratak sadržaj – Jednosmerni motori bez četkica (BLDC) su izuzetno atraktivni zbog svojih dobrih dinamičkih karakteristika u odnosu na klasične jednosmerne motore. Takođe, za razliku od sinhronih mašina sa stalnim magnetima (PMSM), razmatrano upravljanje BLDC motorom ne zahteva kontinualnu informaciju o poziciji rotora, već je dovoljno odrediti 6 diskretnih pozicija tokom električnog ciklusa. To se ostvaruje sa 3 holova senzora pravilno razmaknuta na statoru. To čini upravljanje BLDC motorom dosta jednostavnijim, a pogon jeftinijim u odnosu na sinhroni motor. Rad takođe razmatra i mogućnost besenzorskog upravljanja koje bi dodatno snizilo cenu pogona, uz minimalan gubitak u kvalitetu dinamičkog odziva motora.

Gljučne reči: jednosmerni motor bez četkica, kontrola bez senzora pozicije

Abstract – Brushless DC (BLDC) motors are attractive due to their better dynamic characteristics compared to brushed DC motors. Also, in contrast to the permanent magnet synchronous machine (PMSM), analysed BLDC motor control doesn't require continuous information about rotor position. It requires to detect only six discrete rotor positions in electrical cycle, which can be obtained by 3 hall sensors. This makes BLDC motor control much simpler and the whole drive significantly cheaper compared to PMSM drive. This paper also considers sensorless BLDC control implementation, which would additionally reduce the drive cost with minimal losses in performance.

Gljučne reči: brushless DC motor, sensorless BLDC control

1. UVOD

Iako nosi naziv jednosmerni motor bez četkica, BLDC ustvari spada u sinhronu motore sa stalnim magnetima. Sa njima deli konstrukciju; stalni magneti su locirani na rotoru, dok je radni trofazni namot na statoru. Razlika je jedino u načinu namotavanja statorskih namota, koji su kod BLDC motora tako namotani da obezbede trapezoidalnu raspodelu magnetskog polja po obodu statora, umesto sinusne.

To implicira identičan oblik indukovane elektromotorne sile u vremenu; u svakoj od tri faze u toku električnog perioda ona ima interval od 120 stepeni u kom je pozitivna, interval od 120 stepeni u kom je negativna, kao i dva prelazna intervala od 60 stepeni u kom menja znak.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vlado Porobić, vanr.prof.

Ovakav oblik elektromotorne sile omogućio je znatno jednostavnije upravljanje nego što je to slučaj kod sinhronih mašina sa sinusnom raspodelom fluksa.

Da bi jedan fazni namot doprinosio elektromagnetnom momentu, potrebno je da elektromotorna sila (EMS) i struja koja teče kroz njega budu istog znaka. Tako se dolazi do ideje da, na osnovu tri fazne elektromotorne sile međusobno pomerene za 120 stepeni, postoji 6 radnih sektora; u svakom od njih pozitivna struja treba da teče kroz namot sa pozitivnom indukovanom EMS, a negativna struja kroz namot sa negativnom indukovanom EMS. Treći namot, kod kojeg je EMS u prelaznom intervalu, ostavlja se u neaktivnom stanju. Zahvaljujući ovome, sve što treba znati o rotoru je u kom od šest električnih sektora se on trenutno nalazi, na osnovu čega se mogu generisati odgovarajuće referentne fazne struje.

Očigledno je da skup senzora pozicije poput enkodera, za detektovanje u kom od 6 radnih sektora se motor nalazi nije potreban. Na osnovu toga da li se koristi senzor pozicije ili ne, postoje 2 pristupa upravljanja:

- Senzorsko upravljanje – za senzore pozicije se koriste 3 holova senzora, razmaknuta međusobno za 120 stepeni (električnih). Oni kao izlaz daju digitalni signal, zavisno od toga koji magnetni pol rotora detektuju u datom trenutku. Kombinacijom ova 3 signala može se utvrditi koji u kom radnom sektoru se motor nalazi u svakom trenutku.
- Besenzorsko upravljanje – vrlo atraktivan vid upravljanja, iz razloga što dodatno snižava cenu pogona. Ovde se ne koriste nikakvi senzori pozicije, već se radni sektor utvrđuje obradom merene elektromotorne sile motora. U ovom radu se kao rešenje za detektovanje momenata za komutaciju koristi integracija elektromotorne sile.

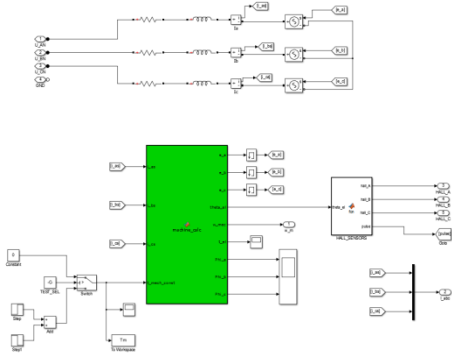
2. MODEL BLDC MOTORA

Model motora koji je ovde korišćen realizovan je kao kombinacija RL kola sa kontrolisanim naponskim izvorima koji predstavljaju elektromotornu silu sa jedne strane, i Matlab funkcije koja pokriva mehanički deo rada motora sa druge strane.

Ulazi u funkciju koja predstavlja mehanički deo motora su fazne struje motora, kao i moment opterećenja. Izlazi su mehaničke veličine – ugao, brzina i elektromagnetni moment motora, kao i fluksni obuhvati i elektromotorna sila motora. EMS ustvari i predstavlja vezu između električnog i mehaničkog dela motora, pošto se taj izlaz iz

funkcije koja predstavlja mehanički deo vodi kao kontrolni signal na kontrolisane naponske izvore.

Na osnovu ugla motora koji je izlazna veličina mehaničkog dela motora, kreiran je i blok koji generiše signale koji predstavljaju izlaz holovih senzora. Slika koja predstavlja implementaciju opisanog modela je data na slici 1.

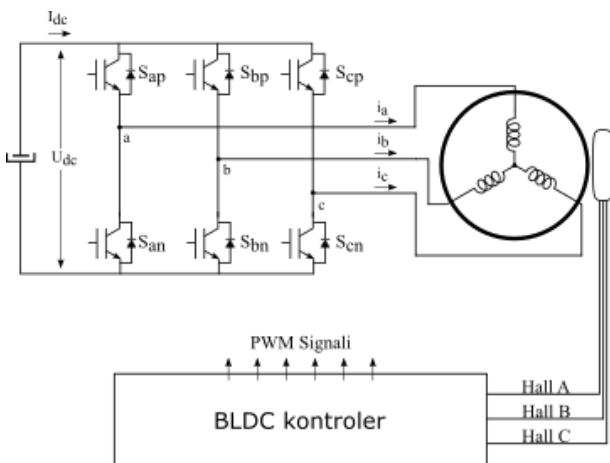


Slika 1. Model BLDC motora

Prednost ovog modela u odnosu na ugrađenu komponentu koja predstavlja ovaj motor u samom *Simulink*-u je u tome što realizovani model obezbeđuje više izlaznih signala, kao i mogućnost snimanja svih signala unutar samog motora, što znatno olakšava razvoj upravljačkog algoritma i analizu postojećih problema na njemu. Takođe, uz modifikaciju nad električnom delu, ovaj model ostavlja prostor za rad sa motorima čiji trofazni namot je vezan u trougao, što nije moguće sa ugrađenom komponentom, koja nudi samo namotaje vezane u zvezdu.

3. SENZORSKO UPRAVLJANJE

Slika 2 prikazuje uobičajeni izgled ovakvog pogona. BLDC motor se napaja preko trofaznog invertora. Na osnovu signala sa 3 holova senzora, kao i zadate reference brzine, kontroler generiše 6 upravljačkih impulsa za gejtove tranzistora u invertoru.

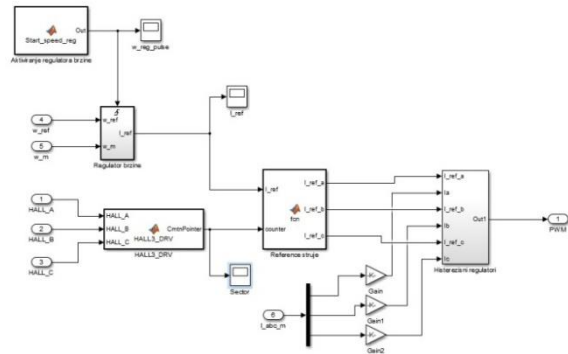


Slika 2. Šema pogona sa BLDC motorom i holovim senzorima

Kao što je pomenuto, holovi senzori daju digitalni izlaz; on je na logičkoj jedinici ako detektuje jedan pol rotora, a na logičkoj nuli ako detektuje drugi. To znači da u električnom periodu senzor ima 2 intervala od po 180

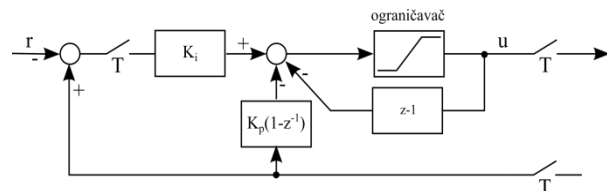
stepeni, sa izlazom koji je naizmenično jednak jedinici i nuli. Uz međusobnu razmaknutost senzora od 120 električnih stepeni, omogućeno je da je za svaki radni sektor motora (koji traje 60 električnih stepeni) različita izlazna kombinacija na holovim senzorima.

Realizacija upravljačkog algoritma u programu *Simulink* prikazana je na slici 3. On je smešten u prekidnu rutinu koja se poziva na svakih 20 μ s, period na kom se vrši i prekidanje tranzistorskih prekidača. Ulazni podaci su referentna i merena brzina, signali sa holovih senzora, kao i merene fazne struje.



Slika 3. Senzorsko upravljanje – upravljački algoritam

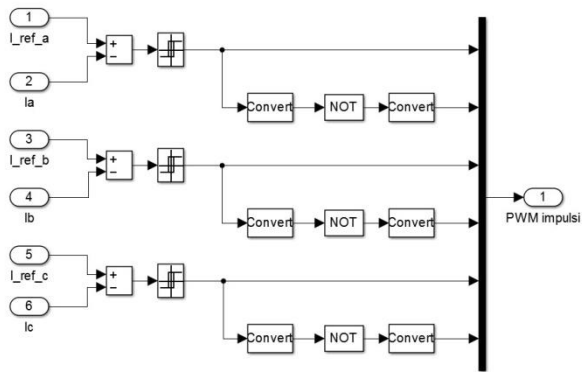
Regulator brzine se izvršava na svakih 500 μ s, tako da se on aktivira na svaki 25. ulaz u prekidnu rutinu. Na osnovu razlike referentne i merene brzine, regulator proračunava referencu struje potrebnu da se ta greška eliminiše. Regulator je realizovan u inkrementalnoj formi, a namotavanje integralnog dejstva je sprečeno. Blok dijagram koji opisuje realizaciju regulatora dat je na slici 4.



Slika 4. Blok dijagram regulatora brzine

Na osnovu signala sa holovih senzora utvrđuje se u kom radnom sektoru je motor trenutno. Na osnovu tog signala, koji uzima celobrojnu vrednost između nula i pet, kao i zadate reference struje iz regulatora brzine, generišu se referentne struje za svaku fazu. U zavisnosti od sektora, fazna referentna struja može biti jednaka referenci regulatora (ako je odgovarajuća EMS pozitivna), jednaka referenci pomnoženoj sa -1 (ako je EMS negativna), ili jednaka nuli ukoliko ta faza treba da bude neaktivna (ako je EMS u prelaznom intervalu).

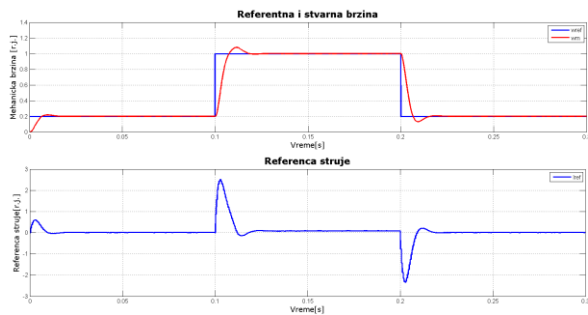
Generisane reference faznih struja se uz odgovarajuće merene fazne struje vode na 3 strujna regulatora, koji omogućavaju da se te reference ostvare. Strujni regulatori su realizovani kao jednostavni histerezisni regulatori. Svaki od njih upravlja odgovarajućom granom trofaznog invertora; ukoliko je merena struja manja od odgovarajuće reference, aktivira se gornji tranzistor u grani i obrnuto. Implementacija strujnih regulatora u simulaciji je data na slici 5.



Slika 5. Histerezni regulatori faznih struja

Rezultati simulacije pri promeni referentne brzine su dati na slikama 6 i 7.

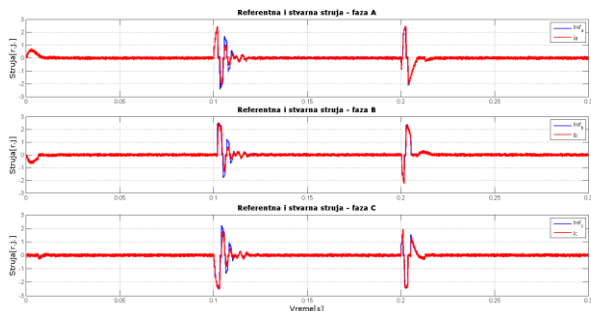
Na slici 6 se može videti da prilikom promene reference brzine regulator brzine zadaje strujnu referencu određenog znaka, zahvaljujući čemu se stvarna brzina brzo smiruje na željenoj vrednosti, uz blagi preskok.



Slika 6. Brzina i referenca struje na promenu reference brzine

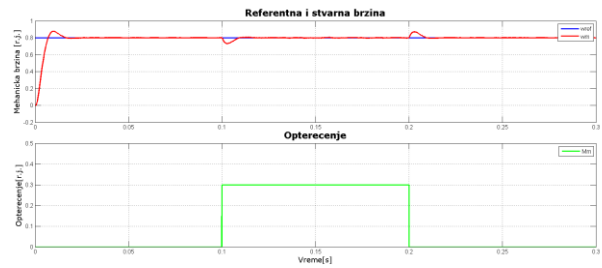
Slika 7 demonstrira odziv strujnih regulatora. Reference se, u skladu sa izlazom regulatora brzine, aktiviraju samo u trenucima promene referentne brzine.

Fazne struje te promene približno isprate, što se ogleda i u kvalitetnom odzivu brzine prikazanom na slici 5.



Slika 7. Referentne i stvarne fazne struje pri promeni reference brzine

Pogon je takođe testiran na promenu opterećenja. Na slici 8 se može videti pravougaoni signal koji predstavlja mehaničko opterećenje. Može se primetiti da je pogon uspeo da vrati brzinu na zadatu referencu u momentima naglog opterećenja, odnosno rasterećenja.



Slika 8. Referentna i stvarna brzina pri nagloj promeni opterećenja

4. BESENZORSKO UPRAVLJANJE

Besenzorsko upravljanje je izuzetno atraktivno za primene u kojim je glavni cilj što niža cena pogona. U tom slučaju se izbacuju holovi senzori za detekciju pozicije. Zbog toga se detekcija pravovremene komutacije svodi ne merenje elektromotorne sile – pošto je jedna faza uvek neaktivna, merenje napona na njoj ustvari daje EMS te faze. Najčešći metod se svodi na detektovanje prolazaka faznih EMS kroz nulu – na osnovu prethodna dva prolaska kroz nulu može se proceniti sledeći trenutak za komutaciju.

Međutim, ovaj metod ima dve bitne mane. Motor se ne može startovati na ovaj način, potrebno je da motor dostigne određenu brzinu pre nego što detekcija nulnih trenutaka EMS postane korisna. Takođe, sličan problem se javlja i pri naglim promenama brzine, pošto procena za sledeći trenutak komutacije postaje neprecizna.

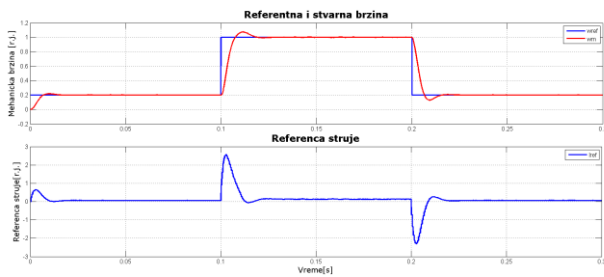
U ovom radu je zato korišćen metod integracije elektromotorne sile. I dalje se meri napon na neaktivnoj fazi, ali se nakon zabeleženog prolaska kroz nulu počinje sa integraljenjem odgovarajuće EMS. Ovaj integral ustvari predstavlja magnetni fluks; pošto je poznato da važi formula:

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\Psi}{d\theta} * \omega, \quad (1)$$

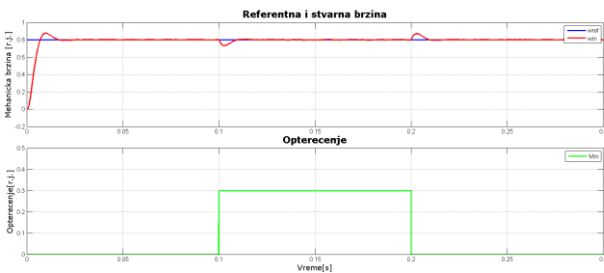
jasno je da EMS zavisi od brzine motora. Time će i integral elektromotorne sile takođe zavisiti od brzine motora; Što se motor sporije obrće, sporije će integral EMS dostizati neki, unapred definisani prag. Za određenu vrednost tog praga fluksa postići će se željeni cilj; trenutak za komutaciju će moći pravovremeno da se definiše bez obzira na brzinu motora.

Simulacija besenzorskog pogona se neznatno razlikuje od iste kod senzorskog; ulazi u prekidnu rutinu su sada elektromotorne sile motora, umesto signala sa holovih senzora. U skladu sa tim je promenjen i blok za određivanje radnog sektora motora, koji beleži trenutak prolaska odgovarajuće EMS kroz nulu i potom je integrali dok vrednost tog integrala ne dostigne prag fluksa, koji je utvrđen eksperimentalno.

Nad besenzorskim pogonom potom su izvedena ista dva testa kao i nad senzorskim. Odzivi su prikazani na slikama 9 i 10.



Slika 9. Brzina, referenca struje pri promeni reference brzine – besenzorski pogon



Slika 10. Referentna i stvarna brzina pri nagloj promeni opterećenja

Poredeći slike 9 i 10 sa odgovarajućim slikama koje prikazuju odzive pogona sa senzorskim upravljanjem (6 i 8), može se primetiti da su odzivi praktično identični. Uz iste regulatore brzine i struje koji su korišćeni u oba modela, dalje se zaključuje da blok koji na osnovu integracije elektromotorne sile detektuje pravovremeni trenutak komutacije daje ekvivalentne rezultate bloku koji to radi pomoću holovih senzora. Što je još bitnije, besenzorski pogon je potpuno samostalno izvršio zalet, bez prethodnog „open loop“ starta. Takođe, pri naglim promenama reference brzine, odzivi su pokazali stabilan rad pogona.

5. ZAKLJUČAK

Jednosmerni motori bez četkica (eng. BLDC) beleže veliki rast u komercijalnoj primeni, zbog jednostavnije konstrukcije i bolje dinamike od jednosmernih motora. Realizovano upravljanje koristeći holove senzore za povratnu spregu po poziciji rotora pokazuje jednostavnost upravljanja ovim motorom u odnosu na sinhroni motor sa permanentnim magnetima sa sinusnom raspodelom fluksa. Pogon u kome je implementirano besenzorsko upravljanje pokazuje na to da je moguće ukloniti bilo kakve senzore pozicije, bez gubitaka na performansama.

Primenjeni metod za detektovanje pravovremenih trenutaka komutacije ukazuje na to kako neke opšte poznate mane besenzorskih pogona sa BLDC motorom mogu biti eliminisane. U papiru nije razmatran rad pogona u oblasti slabljenja polja, kao ni implementacija četvorokvadrantnog rada, što bi mogli biti neki od ciljeva budućeg rada.

6. LITERATURA

- [1] Krishnan, Ramu. *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Vol. 626. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [2] Krause, Paul, et al. *Analysis of electric machinery and drive systems*. Vol. 75. John Wiley & Sons, 2013.

Kratka biografija:

Stefan Šoić rođen je u Vrbasu 1993. god. Osnovne akademske studije na Fakultetu Tehničkih nauka upisao je 2012. godine, smer Energetika, elektronika i telekomunikacije. Godine 2016. upisao je master akademske studije na Fakultetu Tehničkih Nauka.

PRIOLOG

Parametri jednosmerne mašine bez četkica korišćeni u simulaciji:

- linijska otpornost: $R_{L-L}=0.28 \Omega$;
- linijska induktivnost: $L_{L-L}=0.46 \text{ mH}$;
- broj pari polova: $p=4$;
- moment inercije: $J_m=1.398 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- nominalna struja: $I_n=8.4 \text{ A}$;
- napon dc kola: $U_{dc}=24 \text{ V}$;
- nominalni moment motora: $M_n=0.42 \text{ Nm}$;
- nominalna mehanička brzina: $\omega_n=419 \text{ rad/s}$;
- namotaji motora su spregnuti u zvezdu, čemu je i prilagođen model motora. Za analizu motora u sprezi trougao, bila bi potrebna modifikacija električnog dela motora.