

Vodenje dveh zaporedno vezanih sinhronskih motorjev s trajnimi magneti z enim frekvenčnim pretvornikom

Matej Čadež, Rastko Fišer, Henrik Lavrič, Klemen Drobnič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: mc2881@student.uni-lj.si, rastko.fiser@fe.uni-lj.si, henrik.lavric@fe.uni-lj.si, klemen.drobnic@fe.uni-lj.si

Control of dual serial-connected PMSM by single frequency converter

The main aim of this paper is to analyse dual serial-connected permanent magnet synchronous motors (PMSM) controlled by single frequency converter (FC) and to develop a control method which will ensure stable operation of the system when different load torque is applied to each PMSM. First, basic aspects of multi-connected motors controlled by single FC are presented, followed by an overview of control solutions for parallel-connected PMSM. Mathematical model of dual serial-connected PMSM is given in section 3. The stability analysis of the system described in section 4 showed that change of magnetization is needed in order to stabilise the operation of dual serial-connected PMSM. In the final part, different solutions of magnetizing current controller are proposed and substantiated with simulation results.

1 Uvod

Pri načrtovanju sodobnih elektromotorskih pogonov pogosto naletimo na zahtevo po njihovi čim nižji ceni. Eno izmed mogočih rešitev predstavlja vodenje večjega števila izmeničnih motorjev z enim frekvenčnim pretvornikom (FP), ki jo je mogoče aplicirati v pogonih, kjer se motorji v stacionarnem stanju vrtijo z enako vrtilno hitrostjo, opravljajo enako ali podobno funkcijo in so po zgradbi ter lastnostih enaki. Takšne aplikacije so npr. pogoni ventilatorjev, črpalk, transportnih trakov in električna vleka tirnih vozil. Kljub cenovno ugodni rešitvi zaradi manjšega števila potrebnih pretvorniških stikal, omrežnih in izhodnih filtrov FP, se je potrebno zavedati pomanjkljivosti predlagane konfiguracije, kot npr. nezmožnost neodvisne regulacije posameznih motorjev, s čimer se zmanjša fleksibilnost sistema, in potreba po večji moči FP.

Ena izmed glavnih zahtev vezave enega FP in večjega števila izmeničnih motorjev je zagotoviti njihovo stabilno obratovanje v primeru različne obremenitve posameznih motorjev. Sprememba bremenskega navora pri enem motorju povzroči električno motnjo, ki jo občutijo vsi motorji v sistemu. Pri uporabi asinhronskih motorjev se zaradi slapa ne srečamo s problemom stabilnosti sistema, ki pa je močno prisoten pri sinhronskih motorjih (SM), katerih rotorji se vrtijo v sinhronizmu z vrtilnim magnetnim poljem, katerega frekvenca je določena s frekvenco napetosti razsmernika. V primeru povečanja bremenskega

navora se SM poveča kolesni kot δ . To je kot med vektorjema inducirane in statorske napetosti. Le-ta ne sme preseči vrednosti $\pi/2$, saj takrat SM preide v nestabilno delovanje in pade iz sinhronizma.

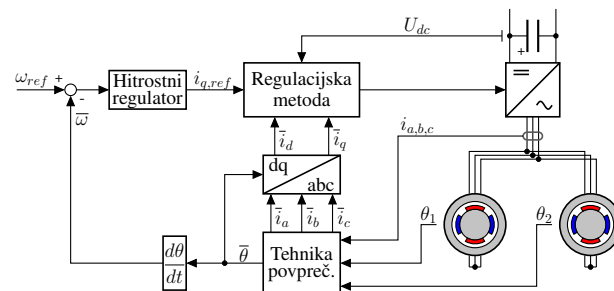
V pričujočem članku se posvetimo analizi vodenja dveh zaporedno vezanih sinhronskih motorjev s površinsko nameščenimi trajnimi magneti (SMTMP) z enim FP s ciljem razvoja ustrezne strategije vodenja, ki bo zagotavljala stabilno obratovanje sistema pri različno obremenjenih SMTMP. V poglavju 2 sta predstavljena koncepta dveh osnovnih strategij vodenja dveh vzporedno vezanih SMTMP. Temu v poglavju 3 sledi izpeljava matematičnega modela zaporedne vezave dveh SMTMP. Kratek opis stabilnostne analize takšne konfiguracije podaja poglavje 4. Simulacijski rezultati preizkusa različnih načinov nastavljanja magnetilnega toka (i_d), s katerimi lahko zagotovimo stabilnost sistema, so opisani v poglavju 5.

2 Rešitve pri vzporedni vezavi

Zaradi pomanjkanja tuje literature o vodenju dveh enakih zaporedno vezanih SMTMP, smo preverili obstoječe rešitve pri vzporedni vezavi. V nadaljevanju opisani strategiji lahko z določenimi popravki apliciramo tudi pri zaporedni vezavi.

2.1 Tehnika povprečenja (angl. *Average Technique*)

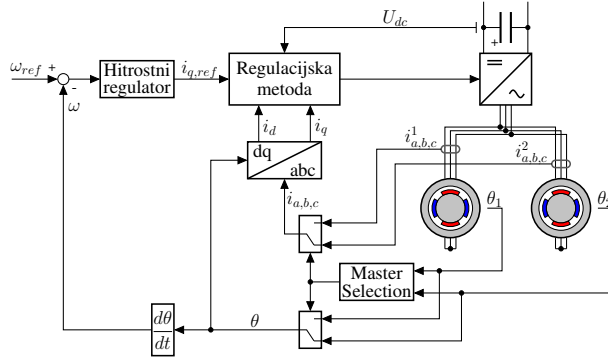
V [1] in [2] najdemo najenostavnejši pristop, katerega osnovni princip podaja shema na sliki 1. SMTMP 1 in SMTMP 2 sta z regulacijskega vidika na podlagi njunih povprečnih vrednosti tokov, kota zasuka in kotne hitrosti rotorja združena v ekvivalentni SMTMP. Pravzaprav gre za klasično hitrostno regulacijo enega SMTMP, kateri dodamo izračun povprečnih vrednosti veličin.



Slika 1: Shema tehnike povprečenja pri vzporedni vezavi dveh SMTMP.

2.2 Izbor nadrejenega motorja (angl. Master/Slave)

Osnovna ideja te strategije je v vsakem vzorčnem intervalu izbrati bolj obremenjen motor, saj ta, zaradi potrebnega večjega električnega navora, zahteva večji tok oz. moč. SMTMP, ki je določen kot nadrejeni motor (angl. *master*), je zaprtozančno reguliran. Preostali SMTMP, ki prevzame vlogo podrejenega motorja (angl. *slave*), je voden odprtozančno. Tako tudi pri tej strategiji preidemo z regulacije dveh SMTMP na klasično regulacijo enega. Obstajajo različni načini, kako izbrati nadrejeni motor. V [3] in [4] je podrobneje opisan izbor s primerjanjem kota zasuka rotorjev obeh SMTMP.



Slika 2: Shema izbora nadrejenega motorja pri vzporedni vezavi dveh SMTMP.

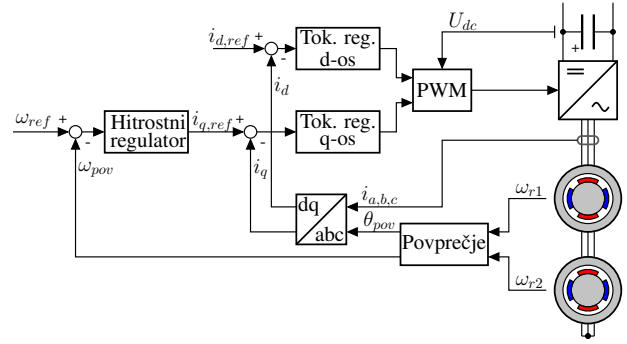
3 Model zaporedne vezave dveh SMTMP

Matematični model zaporedne vezave dveh SMTMP razvijemo na podlagi tehnike povprečenja, saj ima le-ta v primerjavi z izborom nadrejenega motorja določene prednosti:

- zaradi enostavnega koncepta ni teoretičnih zadržkov za njeno apliciranje pri zaporedni vezavi SMTMP,
- omogoča enostavnejšo razširitev na vodenje večjega števila zaporedno vezanih SMTMP,
- izvedba brezsenzorske regulacije zahteva le oceno povprečne kotne hitrosti, kar pri praktični realizaciji pomeni uporabo manjšega števila merilnikov toka oz. napetosti kot v primeru izbrane strategije izbore nadrejenega motorja.

Blokovno shemo modela s tehniko povprečenja prikazuje slika 3. Regulacija v koordinatnem sistemu polja (KSP) temelji na povprečnih vrednostih tokov, kotne hitrosti in kota zasuka rotorjev. Ob tem predpostavimo, da kotno hitrost oz. pozicijo rotorja posameznega SMTMP merimo neposredno z dajalnikom kota zasuka. Čeprav imamo v tem primeru opravka z mehanskimi kotnimi hitrostmi in koti zasuka rotorja (ω_{m1} , ω_{m2} , θ_{m1} , θ_{m2}), pri teoretični izpeljavi enačb modela uporabimo električne veličine. Dejansko kotno hitrost SMTMP 1 in SMTMP 2 označimo z ω_{r1} oz. ω_{r2} . Povprečno kotno hitrost ω_{pov} izračunamo z enačbo

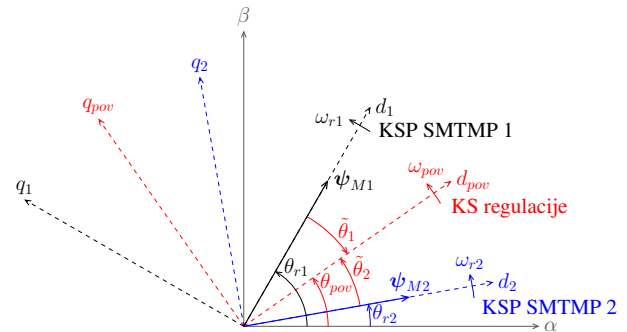
$$\omega_{pov} = \frac{\omega_{r1} + \omega_{r2}}{2}. \quad (1)$$



Slika 3: Shema tehnike povprečenja pri zaporedni vezavi dveh SMTMP.

Pri regulaciji se kot povratna informacija o rotorskem kotu uporabi povprečna vrednost θ_{pov} , ki definira pozicijo koordinatnega sistema (KS) regulacije. KSP SMTMP 1 in KSP SMTMP 2 ne sovpadata nujno s KS regulacije. Ker je pravilna informacija o položaju rotorja nujna za pravilno delovanje modela, je potrebno definirati kota θ_1 in θ_2 (enačba (2)), ki podajata razliko kotov med KS regulacije in KSP posameznega SMTMP. Lego vseh treh KS za opisan primer podaja kazalčni diagram na sliki 4.

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\theta}_1}{dt} &= \frac{d(\theta_{r1} - \theta_{pov})}{dt} = \omega_{r1} - \omega_{pov} \\ \frac{d\tilde{\theta}_2}{dt} &= \frac{d(\theta_{r2} - \theta_{pov})}{dt} = \omega_{r2} - \omega_{pov} \end{aligned} \quad (2)$$



Slika 4: Kazalčni diagram lege KS pri tehniki povprečenja.

Napetostni enačbi za SMTMP 1 v KS regulacije sta

$$\begin{aligned} u_{d1} &= R_S i_d + L_S \frac{di_d}{dt} - \omega_{pov} L_S i_q - \omega_{r1} \psi_M \sin \tilde{\theta}_1 \\ u_{q1} &= R_S i_q + L_S \frac{di_q}{dt} + \omega_{pov} L_S i_d + \omega_{r1} \psi_M \cos \tilde{\theta}_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Podobno sta v KS regulacije določeni tudi napetostni enačbi (4) za SMTMP 2.

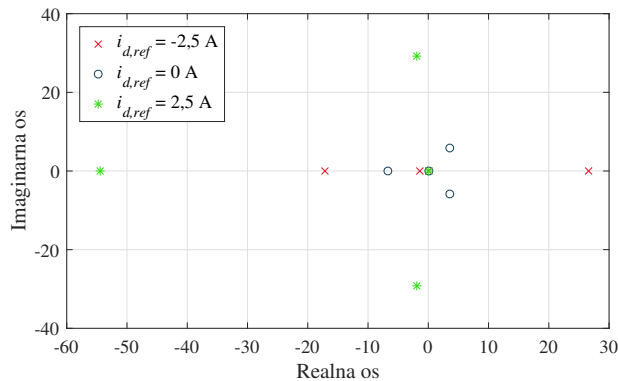
$$\begin{aligned} u_{d2} &= R_S i_d + L_S \frac{di_d}{dt} - \omega_{pov} L_S i_q - \omega_{r2} \psi_M \sin \tilde{\theta}_2 \\ u_{q2} &= R_S i_q + L_S \frac{di_q}{dt} + \omega_{pov} L_S i_d + \omega_{r2} \psi_M \cos \tilde{\theta}_2 \end{aligned} \quad (4)$$

S primerjanjem enačb (3) in (4) lahko ugotovimo, da so tokovi enaki v obeh sklopih enačb. Če enačbi seštejemo, dobimo skupno napetostno enačbo, ki jo nato preuredimo

za implementacijo v programu Simulink. Opisan postopek je podrobneje predstavljen v [5], kjer sta podani tudi navorni in mehanski enačbi posameznega SMTMP.

4 Stabilnostna analiza

Preizkus simulacijskega modela je potrdil nestabilno obratovanje pogona pri različni obremenitvi SMTMP. Iz tega razloga je potrebno opraviti analizo stabilnosti sistema, katere rezultat bo lega polov v kompleksni ravnini. Slednjo naredimo s pomočjo orodja *Linear Analysis Tool*, ki je že integrirano v programu Simulink. Z njim lineariziramo sistem v izbrani delovni točki. Le-to izberemo pri referenčni vrtilni hitrosti $n_{ref} = 2000 \text{ min}^{-1}$ in razliki v obremenitvi SMTMP $10\% M_n$. V [6] je ugotovljeno, da pozitivna d komponenta toka zagotovi stabilno obratovanje dveh vzporedno vezanih SMTMP, ki sta vodena z enim FP. Za ovrednotenje njegovega vpliva pri zaporedni vezavi izberemo tri vrednosti $i_{d,ref}$, in sicer $-2,5 \text{ A}$, 0 A ter $2,5 \text{ A}$, s katerimi najbolj reprezentativno prikažemo premikanje polov. Na sliki 5 so prikazani poli v bližini koordinatnega izhodišča, ki določajo stabilnost sistema. Razvidno je, da se pri pozitivnem toku i_d vsi karakteristični poli nahajajo na levi polovici kompleksne ravnine, kar pomeni, da je sistem v tem primeru stabilen. Dodatno smo preverili tudi obnašanje sistema pri različnih referenčnih hitrostih (500 min^{-1} , 1000 min^{-1} in 1500 min^{-1}). Ugotovljeno je bilo, da n_{ref} nima vpliva na stabilnost sistema.



Slika 5: Lega polov v področju blizu imaginarne osi pri $n_{ref} = 2000 \text{ min}^{-1}$ v odvisnosti od toka $i_{d,ref}$.

5 Regulator $i_{d,ref}$

Na podlagi rezultata stabilnostne analize je smiselno razviti ustrezen regulator, s katerim nastavimo minimalno potrebno pozitivno referenčno vrednost d komponente toka, ki bo zagotovila stabilno obratovanje zaporedno vezanih SMTMP. S tem uspemo znižati dodatne toplotne izgube v navitjih motorjev zaradi dodatnega toka i_d , ki je pri regulaciji enega SMTMP običajno enak nič, razen v primeru slabljenja polja. Za preizkus različnih rešitev nastavljanja $i_{d,ref}$, ki so podrobneje opisane v nadaljevanju, določimo profil obremenitve posameznega SMTMP, ki ga podaja tabela 1. Zaradi želje po univerzalni rešitvi so spremembe bremenskega navora skočne. Poteki toka

$i_{d,ref}$ in vrtilne hitrosti, ki pripadajo posamezni izvedbi regulatorja, so prikazani skupaj na slikah 6 in 7, saj s tem slikoviteje prikažemo ustreznost posamezne izvedbe.

Tabela 1: Profil obremenitve posameznega SMTMP.

$t \text{ (s)}$	0,1 - 2	2 - 6	6 - 10	10 - 14	14 - 18
SMTMP 1 ($\% M_n$)	90	90	100	80	100
SMTMP 2 ($\% M_n$)	80	110	70	120	90

5.1 Konstantna vrednost $i_{d,ref}$

Nastavitev zadosti velike pozitivne vrednosti $i_{d,ref}$ omogoča stabilno delovanje sistema za širok razpon različnih obremenitev obeh SMTMP. Z dodatnimi testiranjmi je bilo ugotovljeno, da sistem prenese razliko v obremenitvi tudi do $90\% M_n$. S slike 7 (a) je razvidno, da so oscilacije vrtilne hitrosti manjše kot pri drugih izvedbah z izjemo zadnje rešitve. Bistvena pomanjkljivost tega načina je prevelik tok i_d , kot bi bil večino časa potreben.

5.2 Skaliran tok i_q

V [7] je tok i_d po obliki podoben i_q , zato smo prišli na idejo, da referenčni tok $i_{d,ref}$ izračunamo kot absolutno vrednost razlike med referenčnim tokom $i_{q,ref}$, ki se spreminja glede na trenutno obremenitev SMTMP, in konstantnim nazivnim tokom $i_{q,n}$, kar podaja enačba (5). S tem ocenimo razliko v trenutni obremenitvi obeh motorjev glede na nazivno stanje, pri katerem ni potrebe po pozitivnem toku i_d . Nazivni tok $i_{q,n}$ je določen z (6).

$$i_{d,ref} = K_1 |i_{q,ref} - i_{q,n}| \quad (5)$$

$$i_{q,n} = \frac{2}{3} \frac{M_n}{p_p \psi_M} \quad (6)$$

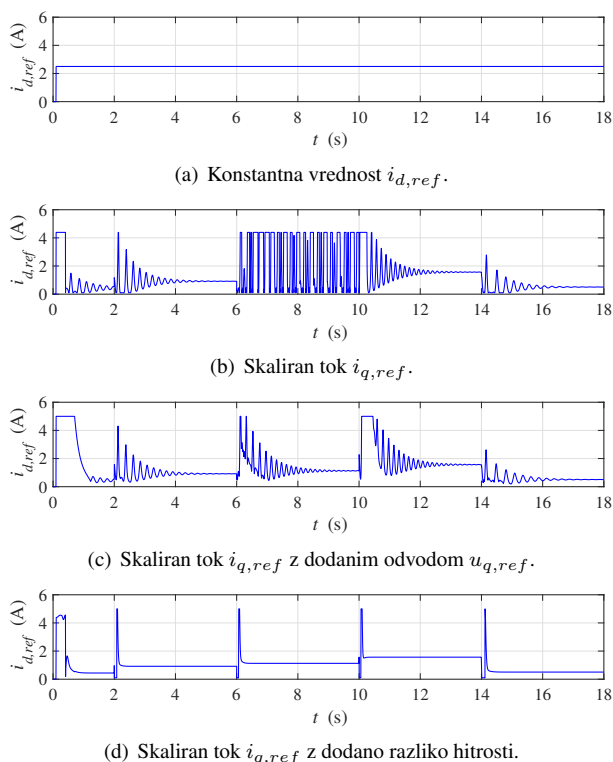
Na slikah 6 (b) in 7 (b) lahko opazimo, da se ob času $t = 6 \text{ s}$ pojavi nedušeno nihanje toka $i_{d,ref}$ oz. vrtilne hitrosti n . Samo informacija o toku i_q torej ni dovolj, zato je potrebno dodati še nek podatek, ki nosi informacijo, da je v sistemu prišlo do določene spremembe bremenskega navora, in bo povzročil takojšnje povečanje toka $i_{d,ref}$.

5.3 Skaliran tok $i_{q,ref}$ z dodanim odvodom $u_{q,ref}$

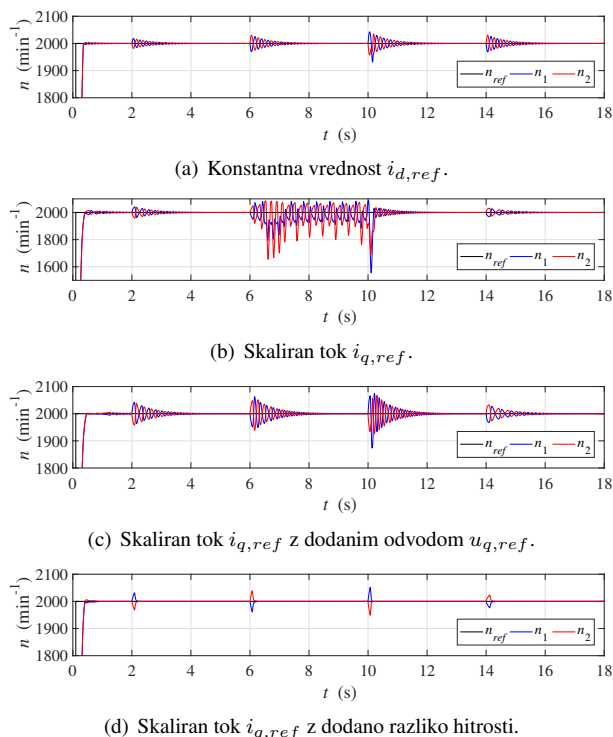
Ena izmed možnih rešitev je, da skaliranemu toku $i_{q,ref}$ dodamo odvod referenčne napetosti $u_{q,ref}$, ki ga aproksimiramo z razliko vrednosti $u_{q,ref}$, ki sta časovno zamaknjeni za 5 vzorčnih intervalov ($t_{vz} = 0,1 \text{ ms}$). Trajanje časovnega zamika je določeno eksperimentalno. V k -tem vzorčnem intervalu izračunamo $i_{d,ref}$ po enačbi (7).

$$i_{d,ref}[k+1] = K_1 |i_{q,ref}[k] - i_{q,n}| + K_2 |u_{q,ref}[k] - u_{q,ref}[k-5]| \quad (7)$$

Takšna izvedba regulatorja $i_{d,ref}$ omogoča stabilno delovanje obeh SMTMP v omejenem področju obratovanja, kjer razlika v njuni obremenitvi SMTMP ne sme preseči $40\% M_n$. Iz oscilogramov na slikah 6 (c) in 7 (c) je razvidno, da je dušenje prehodnega pojava še vedno relativno dolgotrajno, zato smo poskusili najti boljše rešitve.



Slika 6: Poteki $i_{d,ref}$ pri posamezni izvedbi regulatorja referenčne vrednosti d komponente toka.



Slika 7: Poteki vrtilnih hitrosti obeh SMTMP pri posamezni izvedbi regulatorja $i_{d,ref}$.

5.4 Skaliran tok $i_{q,ref}$ z dodano razliko hitrosti

To dobimo, če namesto odvoda $u_{q,ref}$ skaliranemu toku $i_{q,ref}$ dodamo razliko hitrosti med podrejenim in nadrejenim motorjem (oz. manj in bolj obremenjenim motor-

jem), kar podaja enačba (8).

$$i_{d,ref} = K_1 |i_{q,ref} - i_{q,n}| + K_2 (\omega_{slave} - \omega_{master}) \quad (8)$$

V tem primeru je dušenje oscilacij toka $i_{d,ref}$ (slika 6 (d)) in vrtilne hitrosti (slika 7 (d)) skorajda hipno z manjšim prenehajem. Takšna rešitev omogoča stabilno obratovanje sistema do 90 % razlike v obremenitvi obeh SMTMP glede na M_n . Pomanjkljivost te izvedbe je potreba po informaciji o kotu zasuka rotorja posameznega SMTMP in je posledično ni možno uporabiti pri konfiguraciji, kjer ocenimo le povprečno kotno hitrost obeh SMTMP.

Vrednosti parametrov K_1 in K_2 , ki nastopata v podanih enačbah pri posameznih načinih nastavljanja $i_{d,ref}$ in sta določeni eksperimentalno, lahko bralec najde v [5].

6 Zaključek

V delu je predstavljen koncept izgradnje simulacijskega modela zaporedno vezanih SMTMP, ki ju vodimo z enim FP. Rezultat opravljene stabilnostne analize sistema je razkril, da vsiljevanje dovolj velike pozitivne vrednosti toka i_d zagotovi stabilno obratovanje različno obremenjenih SMTMP, pri čemer njuno kotno hitrost neposredno merimo. Simulacijsko so bile preverjene različne izvedbe regulatorja $i_{d,ref}$. S stališča izgub v navitjih motorjev in dinamike najustreznejšo rešitev predstavlja skaliran tok $i_{q,ref}$ z dodano razliko hitrosti. V prihodnosti bi bilo potrebno preveriti možnosti za izvedbo pogona brez uporabe merilnikov rotorske pozicije in praktično verificirati predstavljene načine nastavljanja toka $i_{d,ref}$.

Literatura

- [1] T. Liu in M. Fadel, "Comparative study of different predictive torque control strategies for mono-inverter dual-PMSM system," v *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, str. 1–6, April 2016.
- [2] A. D. Pizzo, D. Iannuzzi in I. Spina, "High performance control technique for unbalanced operations of single-VSI dual-PM brushless motor drives," v *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, str. 1302–1307, July 2010.
- [3] M. N. L. Nguyen, *Commande Predictive de deux Machines Synchrones alimentees en parallele par un Onduleur de Tension Triphase*. PhD dissertation, INP Toulouse, Genie Electrique, Electronique et Telecommunications (GEET), Laboratoire Laplace - UMR5213, 2013.
- [4] D. Bidart, M. Pietrzak-David, P. Maussion in M. Fadel, "Mono inverter multi-parallel permanent magnet synchronous motor: structure and control strategy," *IET Electric Power Applications*, vol. 5, str. 288–294, March 2011.
- [5] M. Čadež, "Optimizacija vodenja pogonskega sklopa ventilatorskega sistema," magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, 2018.
- [6] Y. Lee in J. I. Ha, "Analysis and control of mono inverter dual parallel SPMSM drive system," v *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, str. 4843–4849, Sept 2014.
- [7] D. Seto, F. Sun, J.F. Gieras and N. Hootsmans, "Single electronic drive controlling two synchronous motors via modified vector control," *Journal of Power Electronics*, 2003.