

Vodenje več sinhronskih motorjev z enim frekvenčnim pretvornikom

Matej Čadež, Rastko Fišer, Henrik Lavrič, Klemen Drobnič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: matej.yarema.cadez@gmail.com, klemen.drobnic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Na področju ventilatorskih pogonov, kjer je visoka učinkovitost ključnega pomena in vodenje razmeroma nezahtevno, so se že dobra uveljavili sinhronski motorji s površinsko nameščenimi trajnimi magneti (SM). V matričnih prezračevalnih sistemih postaja topologija z večimi motorji in zgolj enim frekvenčnim pretvornikom (FP) zanimiva rešitev, ki proizvajalcem omogoča občutno znižanje proizvodne cene. Proučili smo dve izvedbi predlagane topologije, to je vzporedno in zaporedno vezavo dveh ali več SM, in med možnimi načini vodenja podrobnejše raziskali tehniko povprečenja in tehniko izbora nadrejenega motorja. Slabost predlagane topologije je potreba po naprednejšem vodenju, predvsem v smislu zagotavljanja stabilnosti sistema v vseh stacionarnih obratovalnih točkah, kar sicer zagotovimo z ustreznim povečanjem magnetilnega toka. Tako omogočimo stabilno obratovanje tudi pri večjih razlikah v obremenitvi posameznih SM. Razvit simulacijski model pogonskega sistema temelji na zaporedni vezavi dveh SM in omogoča analizo stabilnosti obratovanja različno obremenjenih motorjev, oceno delovanja regulatorja magnetilne komponente statorskoga toka in njegov vpliv na dinamične odzive pogonskega sistema. Predstavljen regulacijski algoritmom omogoča nastavljanje minimalnega magnetilnega toka za zagotavljanje stabilnosti sistema, saj je njegovo vrednost smiselno omejevati zaradi dodatnih jouljskih izgub v navitjih. Učinkovitost delovanja regulatorja smo preverili tudi pri zaporedni vezavi treh oziroma štirih SM.

Ključne besede: sinhronski motor s trajnimi magneti, frekvenčni pretvornik, analiza stabilnosti, regulator magnetilnega toka, ventilatorski sistem

Control of multiple serial-connected PMSM by a single frequency converter

In the field of fan drives, where high efficiency is of key importance and the control relatively simple, synchronous motors with surface-mounted permanent magnets (PM) have become a standard choice. In matrix ventilation systems, the topology with multiple PMs and a single frequency converter (FC) is becoming an interesting solution enabling manufacturers to significantly reduce their manufacture costs. A two variants of the proposed topology are examined, i.e. a parallel and serial connection of two or more PMs, and two possible implementations of the control strategy, i.e. Averaging and Master/Slave Technique, are studied. The inherent drawback of the proposed topology is the need for advanced control, particularly in terms of the system stability for a wide range of stationary operating points. This is achieved by an appropriate increase in the magnetizing current. In this way, a stable operation is preserved even in the case of major load disturbances. The developed simulation model of the drive system is based on a serial connection of the two PMs enabling a stability analysis in case of load disturbances as well as designing magnetizing current controller. The proposed control algorithm minimizes the required magnetizing current needed for system stabilization and consequently decreases losses in windings. The control performance is checked also for the topologies with three and four serial-connected PMs.

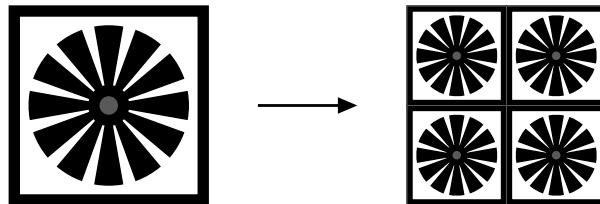
Keywords: PMSM, frequency converter, stability analysis, magnetizing current controller, fan drive

1 UVOD

Pri načrtovanju sodobnih elektromotorskih pogonov pogosto naletimo na zahtevo po njihovi čim nižji ceni. Eno izmed možnih rešitev predstavlja vodenje večjega števila izmeničnih motorjev z enim frekvenčnim pretvornikom (FP), ki jo je mogoče uporabiti v pogonih, kjer se motorji v ustaljenem 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.

Princip vodenja večjega števila motorjev z enim FP se uveljavlja v prezračevalnih sistemih, ker je v zadnjem obdobju prisoten trend zamenjave enega velikega ventilatorja z matriko manjših ventilatorjev (angl. fan wall, fan matrix ali fan array), kar je simbolično prikazano na sliki 1. Število ventilatorjev, ki jih vključuje takšna matrika, se giblje med 2 do 16, v nekaterih primerih pa tudi več kot 100 [1]. Prezračevalni sistemi, ki temeljijo na matriki ventilatorjev, se uporabljajo pri hlajenju polprevodniških naprav v pretvorniških postajah v energetiki, hlajenju strežnikov in podatkovnih postaj, pogosti pa so tudi pri prezračevanju športnih in kulturnih prizorišč [2]. Prednosti sistema matrike ventilatorjev v primerjavi z enim velikim ventilatorjem so predvsem povečana fleksibilnost in zanesljivost sistema, enostavnejša montaža sistema, zmanjšana potreba po razpoložljivem prostoru za namestitev, znižanje nivoja hrupa in ob ustremnem

vodenju tudi višja energijska učinkovitost [3]. Kljub cenovno ugodni rešitvi zaradi manjšega števila FP in spremljajočih omrežnih in izhodnih filtrov, se je treba zavedati pomanjkljivosti predlagane konfiguracije. Tako npr. ni možno neodvisno regulirati posameznih motorjev, s čimer se zmanjša prilagodljivost sistema.



Slika 1: Zamenjava večjega ventilatorja z matriko manjših.

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 s problemom stabilnosti sistema zaradi slipa ne srečamo. Nasprotno pa je ta fenomen močno prisoten pri sinhronskih motorjih, katerih rotorji se vrtijo v sinhronizmu z vrtljnim magnetnim poljem, katerega krožna frekvenco je določena s frekvenco napetosti razsmernika. V primeru povečanja bremenskega navora se sinhronskemu motorju poveča kolesni kot δ , tj. kot med vektorjema inducirane in statorske napetosti. Le-ta ne sme preseči vrednosti $\pi/2$, saj takrat sinhronski motor preide v nestabilno delovanje in pade iz sinhronizma. Ker pa so ravno sinhronski motorji zaradi doseganja najvišjih izkoristkov v tovrstnih pogonih najpogosteje izbira, v nadaljevanju obravnavamo izključno analizo pogona s takšno vrsto električnih motorjev.

V prvi polovici pričajočega članka se posvetimo predvsem analizi vodenja dveh zaporedno vezanih sinhronskih motorjev s površinsko nameščenimi trajnimi magneti (SM) z enim FP. Cilj je razvoj ustrezne strategije vodenja, ki bo zagotavljal stabilno obratovanje sistema pri različno obremenjenih SM. V drugi polovici članka so podrobnejše opisani nekateri problemi, s katerimi se moramo soočiti pri izbiri zaporedne vezave dveh SM. Na primeru enega izmed razvitih regulatorjev referenčne vrednosti magnetilnega toka je predstavljena tudi razširitev vezave na tri oz. štiri SM.

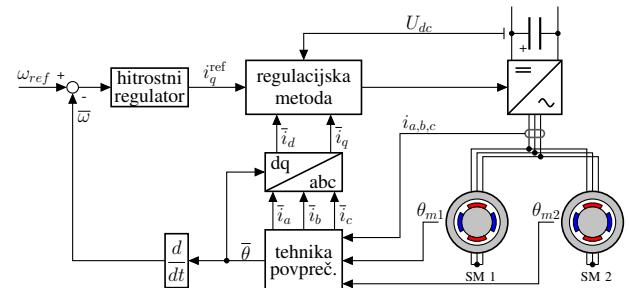
2 REŠITVE PRI VZPOREDNI VEZAVI

Zaradi pomanjkanja literature o vodenju dveh enakih zaporedno vezanih SM, smo preverili obstoječe rešitve pri vzporedni vezavi, ki je v praksi pogostejša. V nadaljevanju opisani strategiji lahko z določenimi popravki apliciramo tudi pri zaporedni vezavi.

2.1 Tehnika povprečenja

Najenostavnejši pristop k vodenju dveh motorjev podaja shema na sliki 2 [4], [5]. SM 1 in SM 2 sta z regulacijskega vidika na podlagi njunih povprečnih

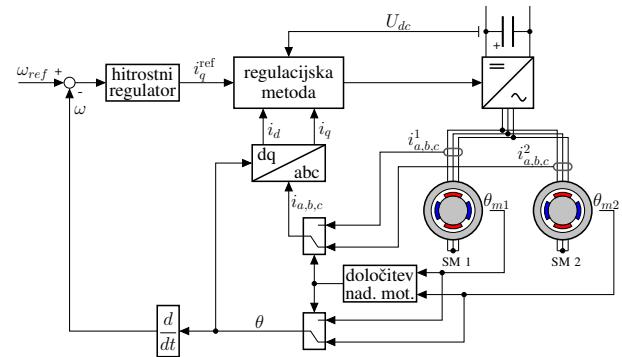
vrednosti tokov, kota zasuka in kotne hitrosti rotorja združena v ekvivalentni SM. Pravzaprav gre za klasično hitrostno regulacijo enega SM, kateri dodamo izračun povprečnih vrednosti veličin.



Slika 2: Shema tehnike povprečenja pri vzporedni vezavi dveh SM.

2.2 Izbor nadrejenega motorja

Osnovna ideja strategije na sliki 3 je v vsakem vzorčnem intervalu izbrati bolj obremenjen motor, saj ta, zaradi zagotavljanja večjega navora, obratuje z večjim kolesnim kotom. SM, ki je določen kot nadrejeni motor (angl. master), je voden s klasičnim postopkom zaprtozančne regulacije, medtem ko je SM, ki prevzame vlogo podrejenega motorja (angl. slave), voden odprtozančno. Tako tudi pri tej strategiji preidemo z regulacije dveh SM na klasično regulacijo enega. Obstajajo različni načini, kako izbrati nadrejeni motor. V [6] in [7] je podrobnejše opisan izbor s primerjanjem kota zasuka rotorjev obeh SM.

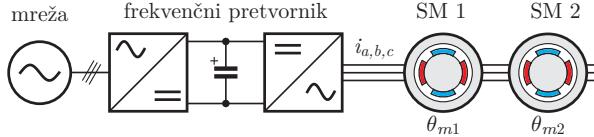


Slika 3: Shema izbora nadrejenega motorja pri vzporedni vezavi dveh SM.

3 ZAPOREDNA VEZAVA SM

3.1 Motivi za zaporedno vezavo

Danes se v električnih pogonih uporablja pretežno vzporedna vezava SM, kljub temu da je zaporedna vezava (slika 4) v industrijskih aplikacijah pogosto ekonomsko bolj upravičena. V večjih industrijskih objektih, kjer lahko razdalja od FP do ventilatorskega sistema znaša tudi več deset metrov, predstavlja cena dovodnih močnostnih kablov nezanemarljiv strošek, ki lahko v določenih primerih postane celo prevladujoč. Posebej pri pogonih manjših moči (nekaj kW) cena dolge napeljave hitro preseže tako ceno FP kot SM.



Slika 4: Zaporedna vezava dveh SM.

3.2 Model zaporedne vezave dveh SM

Parametri in podatki motorja, ki jih uporabimo pri izgradnji simulacijskega modela, podaja tabela 1.

Tabela 1: Nazivni podatki SM.

Nazivni podatki motorja		
Nazivna moč	P_n	2,2 kW
Nazivna napetost	U_n	400 V
Število polovih parov	p_p	5
Nazivni tok	I_n	5,2 A
Nazivni navor	M_n	4 Nm
Nazivna vrtilna hitrost	n_n	5350 min^{-1}
Inducirana napetost (pri n_n)	E_n	56 V
Vztrajnostni moment	J_n	$4,93 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$
Koeficient viskoznega trenja	k_{tr}	$1,371 \cdot 10^{-6} \text{ Nm s rad}^{-1}$
Parametri nadomestnega vezja		
Statorska upornost	R_s	1,01 Ω
Statorska induktivnost	L_s	8,8 mH
Magnetski sklep trajnih magnetov	ψ_R	0,09 Vs

Matematični model zaporedne vezave dveh SM razvijemo v skladu s koncepti dvoosne teorije, pri čemer izhajamo iz klasičnega pogona z enim motorjem. Model SM v rotorskem koordinatnem sistemu (KS) je dobro znan. Modelska KS, v katerem je zapisana napetostna enačba, je v idealnem primeru enak dejanskemu rotorskemu kotu motorja, kar relativno enostavno dosežemo z neposredno meritvijo ali brezsenzorsko oceno

$$u_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_s i_q - \omega_r \psi_R \quad (1a)$$

$$u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_s i_d + \omega_r \psi_R. \quad (1b)$$

Pogled na konfiguracijo pogona z zaporedno vezavo pokaže (slika 4), da se rotorska kota θ_{m1} in θ_{m2} posameznih motorjev v splošnem razlikujeta. Zato definiramo kot modelska KS tako, da povprečimo njuni vrednosti

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_{r1} + \theta_{r2}}{2}, \quad (2)$$

kjer z upoštevanjem $\theta_{r1} = p_p \theta_{m1}$ in $\theta_{r2} = p_p \theta_{m2}$ zamenjamo mehanske veličine z električnimi. Električno kotno hitrost KS dobimo z

$$\bar{\omega} = \frac{d\bar{\theta}}{dt}, \quad (3)$$

prav tako tudi električni kotni hitrosti obeh motorjev

$$\bar{\omega}_{r1} = \frac{d\theta_{r1}}{dt}, \quad \bar{\omega}_{r2} = \frac{d\theta_{r2}}{dt}. \quad (4)$$

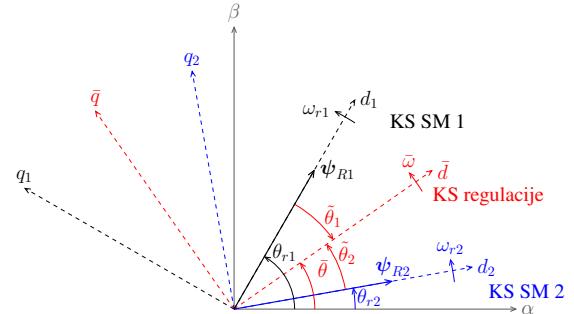
Očitno je, da lokalna KS obeh motorjev nujno nesovpadata z modelskim KS. Ker izhodiščna napetostna

enačba za posamezni motor predpostavlja pravilno informacijo o kotu θ_{r1} (oz. θ_{r2}), definiramo razliko kotov med modelskim KS in KS posameznega motorja

$$\tilde{\theta}_1 = \theta_{r1} - \bar{\theta} \quad (5a)$$

$$\tilde{\theta}_2 = \theta_{r2} - \bar{\theta}. \quad (5b)$$

Prostorski položaj in medsebojne relacije vpeljanih koordinatnih sistemov so razvidni s slike 5.



Slika 5: Kazalčni diagram lege KS pri tehniki povprečenja.

Sedaj lahko zapišemo napetostni enačbi v modelskem KS za posamezen motor. Za motor SM 1 velja

$$u_{d1} = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \bar{\omega} L_s i_q - \omega_{r1} \psi_R \sin \tilde{\theta}_1 \quad (6a)$$

$$u_{q1} = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \bar{\omega} L_s i_d + \omega_{r1} \psi_R \cos \tilde{\theta}_1. \quad (6b)$$

Podobno velja za motor SM 2

$$u_{d2} = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \bar{\omega} L_s i_q - \omega_{r2} \psi_R \sin \tilde{\theta}_2 \quad (7a)$$

$$u_{q2} = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \bar{\omega} L_s i_d + \omega_{r2} \psi_R \cos \tilde{\theta}_2. \quad (7b)$$

V enačbah (6) in (7) nastopata enaka tokova, tj. magnetna komponenta i_d in navorna komponenta i_q . Če (6) in (7) seštejemo po komponentah $u_d = u_{d1} + u_{d2}$ in $u_q = u_{q1} + u_{q2}$, dobimo skupno napetostno enačbo

$$u_d = 2R_s i_d + 2L_s \frac{di_d}{dt} - 2\bar{\omega} L_s i_q - \psi_R (\omega_{r1} \sin \tilde{\theta}_1 - \omega_{r2} \sin \tilde{\theta}_2) \quad (8a)$$

$$u_q = 2R_s i_q + 2L_s \frac{di_q}{dt} + 2\bar{\omega} L_s i_d + \psi_R (\omega_{r1} \cos \tilde{\theta}_1 + \omega_{r2} \cos \tilde{\theta}_2), \quad (8b)$$

ki jo nato preuredimo v obliko, ki je primerna za implementacijo v numerični simulaciji

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - 2R_s i_d + 2\bar{\omega} L_s i_q + \omega_{r1} \psi_R \sin \tilde{\theta}_1 + \omega_{r2} \psi_R \sin \tilde{\theta}_2}{2L_s} \quad (9)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u_q - 2R_s i_q - 2\bar{\omega} L_s i_d - \omega_{r1} \psi_R \cos \tilde{\theta}_1 - \omega_{r2} \psi_R \cos \tilde{\theta}_2}{2L_s}. \quad (10)$$

Navorni enačbi posameznih motorjev zaradi razlike v kotih ($\tilde{\theta}_1$ in $\tilde{\theta}_2$) postaneta nelinearni

$$M_{e1} = \frac{3}{2} p_p \psi_R (i_q \cos \tilde{\theta}_1 - i_d \sin \tilde{\theta}_1) \quad (11a)$$

$$M_{e2} = \frac{3}{2} p_p \psi_R (i_q \cos \tilde{\theta}_2 - i_d \sin \tilde{\theta}_2). \quad (11b)$$

Z mehanskima enačbama dobimo popoln matematični model zaporedne vezave (dveh) motorjev

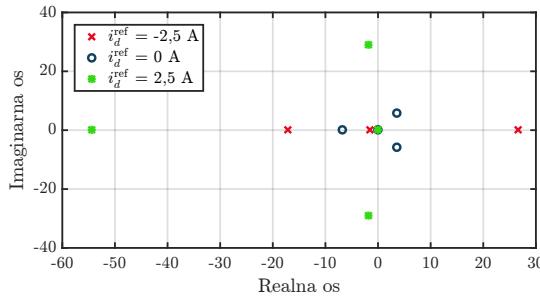
$$\frac{d\omega_{m1}}{dt} = \frac{1}{J}(M_{e1} - M_{br1}) - \frac{k_{tr}}{J}\omega_{m1} \quad (12a)$$

$$\frac{d\omega_{m2}}{dt} = \frac{1}{J}(M_{e2} - M_{br2}) - \frac{k_{tr}}{J}\omega_{m2}, \quad (12b)$$

kjer sta M_{br1} in M_{br2} bremenska navara posameznih motorjev.

4 ANALIZA STABILNOSTI SISTEMA

Preizkus simulacijskega modela je potrdil nestabilno obratovanje pogona pri različnih obremenitvah SM. Iz tega razloga je potrebno opraviti analizo stabilnosti sistema, katere rezultat bo lega polov v kompleksni ravnini. Sledno 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 $n_m^{\text{ref}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ in razliki v obremenitvi obeh motorjev $0,1 \cdot M_n$. V [8] je ugotovljeno, da pozitivna d komponenta toka zagotovi stabilno obratovanje dveh vzporedno vezanih SM, 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 6 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



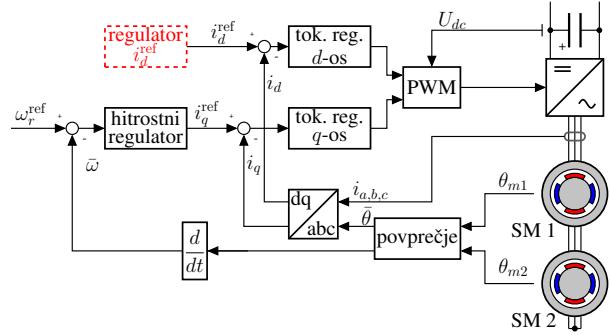
Slika 6: Lega polov v področju blizu imaginarno osi pri $n_m^{\text{ref}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ v odvisnosti od toka i_d^{ref} .

stabilen. Dodatno smo preverili tudi obnašanje sistema pri različnih referenčnih vrtilnih hitrostih (500 min^{-1} , 1000 min^{-1} in 1500 min^{-1}). Ugotovili smo, da n_m^{ref} nima vpliva na stabilnost sistema.

5 REGULATOR REFERENČNE VREDNOSTI MAGNETILNEGA TOKA

Na podlagi rezultatov stabilnostne analize je smiseln razviti ustrezni regulator, s katerim nastavimo minimalno potrebno pozitivno referenčno vrednost d komponente toka, ki bo zagotovila stabilno obratovanje zaporedno vezanih SM. Tako omejimo dodatne topotlne izgube v navitjih motorjev zaradi dodatnega toka i_d , ki je pri regulaciji enega SM običajno enak nič, razen v

primeru slabljenja polja. Za preizkus različnih rešitev nastavljanja i_d^{ref} , ki so podrobnejše opisane v nadaljevanju, določimo profil obremenitve posameznega SM, ki ga podaja tabela 2. 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 8 in 9, saj s tem nazorneje prikažemo ustreznost posamezne izvedbe.



Slika 7: Shema modela z regulatorjem i_d^{ref} .

Tabela 2: Profil obremenitve posameznega SM.

čas (s)	0,1 – 2	2 – 6	6 – 10	10 – 14	14 – 18
SM 1 (% od M_n)	90	90	100	80	100
SM 2 (% od 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 SM. Z dodatnimi testiranjami je bilo ugotovljeno, da sistem prenese razliko v obremenitvi tudi do $0,9 \cdot M_n$. S slike 9 (a) je razvidno, da so oscilacije vrtilne hitrosti manjše kot pri drugih izvedbah, z izjemo zadnje rešitve. Bistvena pomanjkljivost tega načina je razmeroma visok konstanten tok i_d , ki pa je potreben zgolj ob prisotnosti bremenske motnje.

5.2 Skaliran tok i_q

Referenčni tok i_d^{ref} lahko izračunamo tudi kot absolutno vrednost razlike med referenčnim tokom i_q^{ref} , ki se spreminja glede na trenutno obremenitev SM, in konstantnim nazivnim tokom $i_{q,n}$ [9]

$$i_d^{\text{ref}} = K_1 |i_q^{\text{ref}} - i_{q,n}|. \quad (13)$$

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

$$i_{q,n} = \frac{2}{3} \frac{M_n}{p_p \psi_R}. \quad (14)$$

Na slikah 8 (b) in 9 (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_d^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref}

Ena izmed možnih rešitev je, da skaliranemu toku i_d^{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 ($t_{\text{vz}} = 0,1 \text{ ms}$). Trajanje časovnega zamika je določeno eksperimentalno. V k -tem vzorčnem intervalu izračunamo i_d^{ref} z

$$i_d^{\text{ref}}[k+1] = K_1|i_q^{\text{ref}}[k] - i_{q,n}| + K_2|u_q^{\text{ref}}[k] - u_q^{\text{ref}}[k-5]|. \quad (15)$$

Takšna izvedba regulatorja i_d^{ref} omogoča stabilno delovanje obeh SM v omejenem področju obratovanja, kjer razlika v njuni obremenitvi ne sme preseči $0,4 \cdot M_n$. Iz oscilogramov na slikah 8 (c) in 9 (c) je razvidno, da je dušenje prehodnega pojava še vedno relativno dolgotrajno, zato je potrebna boljša rešitev.

5.4 Skaliran tok i_q^{ref} z dodano razliko kotnih hitrosti

Ustreznejšo rešitev dobimo, če namesto odvoda u_q^{ref} skaliranemu toku i_q^{ref} dodamo razliko kotnih hitrosti med podrejenim in nadrejenim motorjem (oz. manj in bolj obremenjenim motorjem)

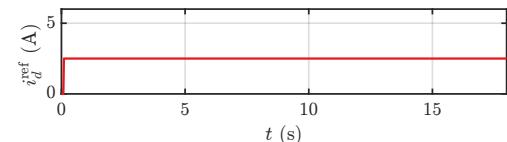
$$i_d^{\text{ref}} = K_1|i_q^{\text{ref}} - i_{q,n}| + K_2(\omega_{\text{slave}} - \omega_{\text{master}}). \quad (16)$$

V tem primeru je dušenje oscilacij toka i_d^{ref} (slika 8 (d)) in vrtilne hitrosti (slika 9 (d)) skorajda hipno z manjšim prenihajem. Takšna rešitev omogoča stabilno obratovanje sistema do 90 % razlike v obremenitvi obeh SM glede na M_n . Pomanjkljivost te izvedbe je potreba po informaciji o kotu zasuka rotorja posameznega SM in je posledično ni možno uporabiti pri konfiguraciji, kjer ocenimo le povprečno kotno hitrost obeh SM. Pri razširitvi vezave na več kot dva SM trčimo ob zaenkrat še nerešeno vprašanje, katero razliko kotne hitrosti je potrebno uporabiti. Ali je to razlika med povprečno kotno hitrostjo ostalih SM in nadrejenim ali med kotnima hitrostma dveh najbolj obremenjenih SM?

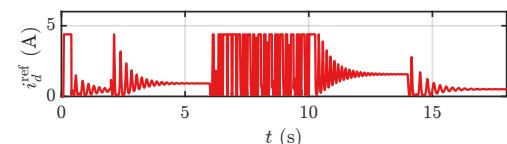
Vrednosti parametrov K_1 in K_2 , ki nastopata v podanih enačbah pri posameznih načinah nastavljanja i_d^{ref} in sta določeni eksperimentalno, lahko bralec najde v tabeli 3. Ob tem velja omeniti, da velikost toka i_d^{ref} pri vseh opisanih izvedbah regulatorja omejimo s spodnjo limito i_d^{min} , ki zagotavlja izpolnjevanje stabilnostnega pogoja, in z zgornjo limito i_d^{max} , s katero preprečimo preveliko povečanje toka i_d^{ref} .

Tabela 3: Parametri regulatorja i_d^{ref} .

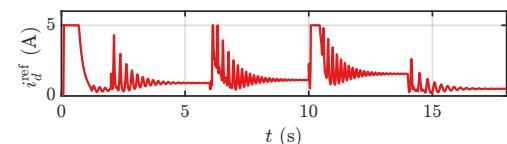
$n_m^{\text{ref}} = 2000 \text{ min}^{-1}$	$i_d^{\text{min}} = 0,1 \text{ A}$	$i_d^{\text{max}} = 5 \text{ A}$
Konstantna vrednost i_d^{ref}		
$i_d^{\text{ref}} = 2,5 \text{ A}$		
Skaliran tok i_q^{ref}		
$K_1 = 0,5$		
Skaliran tok i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref}		
$K_1 = 0,5$	$K_2 = 2$	
Skaliran tok i_q^{ref} z dodano razliko hitrosti		
$K_1 = 0,5$	$K_2 = 1$	



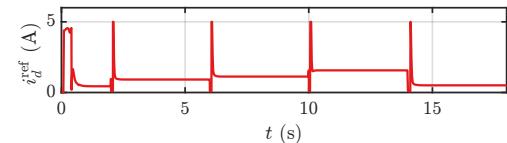
(a) Konstantna vrednost i_d^{ref} .



(b) Skaliran tok i_q^{ref} .

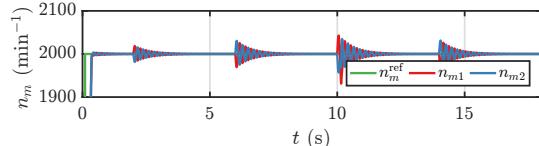


(c) Skaliran tok i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref} .

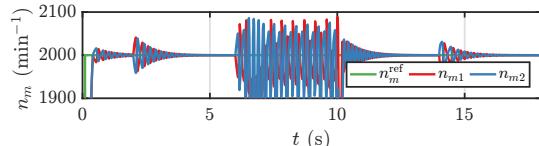


(d) Skaliran tok i_q^{ref} z dodano razliko kotnih hitrosti.

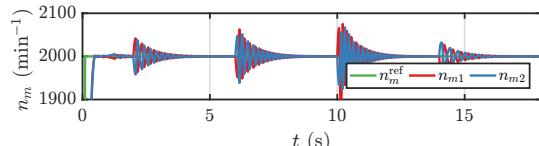
Slika 8: Poteki i_d^{ref} pri posamezni izvedbi regulatorja referenčne vrednosti d komponente toka.



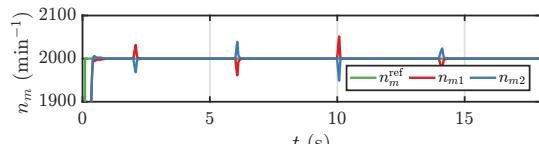
(a) Konstantna vrednost i_d^{ref} .



(b) Skaliran tok i_q^{ref} .



(c) Skaliran tok i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref} .



(d) Skaliran tok i_q^{ref} z dodano razliko hitrosti.

Slika 9: Poteki vrtilnih hitrosti obeh SM pri posamezni izvedbi regulatorja i_d^{ref} .

6 ZAPOREDNA VEZAVA VEČ SM

6.1 Zaporedna vezava treh SM

Delovanje regulatorja i_d^{ref} na podlagi skaliranega toka i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref} je smiselno preizkusiti tudi

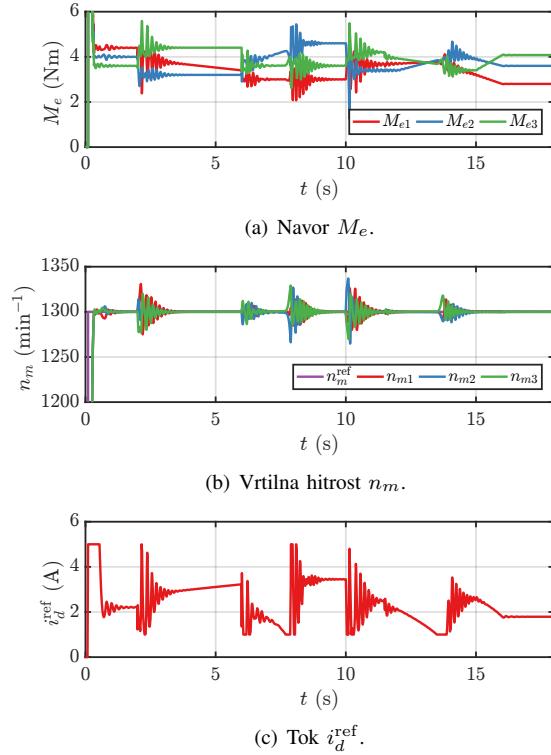
pri zaporedni vezavi treh SM. V primerjavi z vezavo dveh SM se spremenita skupni napetostni enačbi v dvoosnem KS (17), ki vsebujejo dodaten člen inducirane napetosti

$$\begin{aligned} u_d &= 3R_s i_d + 3L_s \frac{di_d}{dt} - 3\bar{\omega} L_s i_q - \omega_{r1} \psi_R \sin \tilde{\theta}_1 - \\ &\quad \omega_{r2} \psi_R \sin \tilde{\theta}_2 - \omega_{r3} \psi_R \sin \tilde{\theta}_3 \\ u_q &= 3R_s i_q + 3L_s \frac{di_q}{dt} + 3\bar{\omega} L_s i_d + \omega_{r1} \psi_R \cos \tilde{\theta}_1 + \\ &\quad \omega_{r2} \psi_R \cos \tilde{\theta}_2 + \omega_{r3} \psi_R \cos \tilde{\theta}_3. \end{aligned} \quad (17)$$

Zaradi dodatnega SM in omejene vrednosti napetosti enosmernega tokokroga $U_{dc} = 540$ V, se najvišja še dosegljiva vrtilna hitrost zniža na vrednost 1300 min^{-1} . V primerjavi z vezavo dveh SM je pri vezavi treh za stabilno delovanje potreben približno 2-krat večji tok i_d^{ref} , kar skladno s tabelo 4 pomeni povečanje faktorjev K_1 in K_2 ter spodnje limite i_d^{min} . Povečanje slednje iz 0,1 A na 1 A zmanjša prenihaj toku i_d^{ref} . Oscilogram navorov s slike 10 (a) potrjuje, da z naštetimi spremembami zagotovimo stabilno delovanje sistema v stacionarnem stanju tudi pri 40 % razliki med obremenitvami posameznih SM glede na M_n .

Tabela 4: Parametri regulatorja i_d^{ref} pri vezavi treh SM.

$n_m^{\text{ref}} = 1300 \text{ min}^{-1}$	$i_d^{\text{min}} = 1 \text{ A}$	$i_d^{\text{max}} = 5 \text{ A}$
Skaliran tok i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref}		
$K_1 = 2$	$K_2 = 3$	



Slika 10: Poteki veličin pri zaporedni vezavi treh SM.

Iz poteka navorov na sliki 10 (a) in toka i_d^{ref} na sliki 10 (c) lahko opazimo, da okrog $t = 8$ s pride do največje razlike v obremenitvi, ki ne nastopi skočno.

Regulator je v intervalu od 6 s do 7,8 s, kljub večanju razlike v obremenitvi, zmanjševal vrednost toka i_d^{ref} , saj se je skupna obremenitev približevala nazivni. Sistem je ob času 7,8 s že blizu meje stabilnega obratovanja, kar se vidi iz poteka vrtilne hitrosti na 10 (b). Ob njeni spremembni se odzove hitrostni regulator, ki poveča tok i_d^{ref} , s tem pa posredno tudi tok i_d^{ref} . Svoj del k temu prispeva tudi aproksimiran odvod napetosti u_q^{ref} , s čimer regulator i_d^{ref} uspe ponovno stabilizirati sistem. Pri ostalih spremembah bremenskega navora je delovanje regulatorja ustreznlo.

6.2 Zaporedna vezava štirih SM

Zaradi zadovoljivih rezultatov delovanja regulatorja i_d^{ref} pri zaporedni vezavi treh SM, ga apliciramo še v simulacijskem modelu s štirimi zaporedno vezanimi SM. Skupni napetostni enačbi v dvoosnem KS sta definirani kot

$$\begin{aligned} u_d &= 4R_s i_d + 4L_s \frac{di_d}{dt} - 4\bar{\omega} L_s i_q - \omega_{r1} \psi_R \sin \tilde{\theta}_1 - \\ &\quad \omega_{r2} \psi_R \sin \tilde{\theta}_2 - \omega_{r3} \psi_R \sin \tilde{\theta}_3 - \omega_{r4} \psi_R \sin \tilde{\theta}_4 \\ u_q &= 4R_s i_q + 4L_s \frac{di_q}{dt} + 4\bar{\omega} L_s i_d + \omega_{r1} \psi_R \cos \tilde{\theta}_1 + \\ &\quad \omega_{r2} \psi_R \cos \tilde{\theta}_2 + \omega_{r3} \psi_R \cos \tilde{\theta}_3 + \omega_{r4} \psi_R \cos \tilde{\theta}_4. \end{aligned} \quad (18)$$

Maksimalna dosegljiva vrtilna hitrost se pri napajanju sistema z nazivno napetostjo U_n ($U_{dc} = 540$ V) zniža na vrednost 900 min^{-1} . Za zagotavljanje stabilnega obratovanja štirih zaporedno vezanih SM, katerih razlika v obremenitvi lahko doseže 40 % M_n (slika 11 (a)), je zoper nujno povečanje faktorjev K_1 in K_2 regulatorja i_d^{ref} (tabela 5). Potreben tok i_d^{ref} , katerega potek prikazuje slika 11 (c), se giblje okoli vrednosti 4 A. V primerjavi z zaporedno vezavo treh SM (slika 10 (c)) je 1,25-kratno povečanje toka pri največji razliki v obremenitvi skladno s povečanjem faktorjev regulatorja i_d^{ref} .

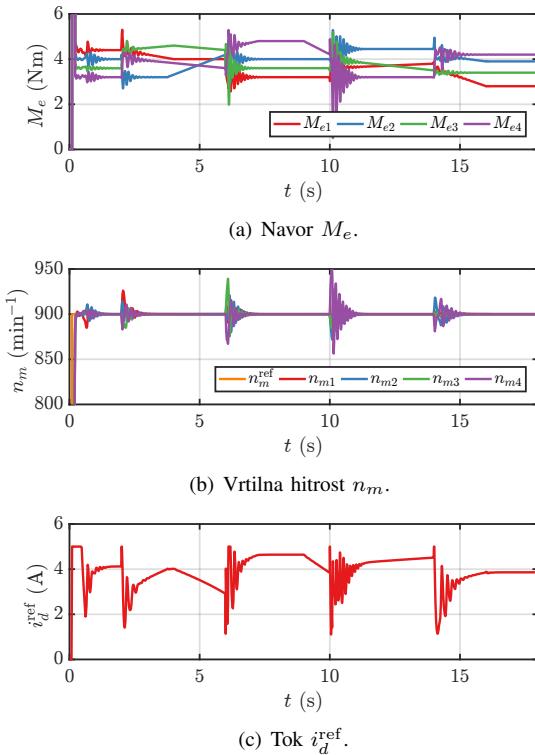
Tabela 5: Parametri regulatorja i_d^{ref} pri vezavi štirih SM.

$n_m^{\text{ref}} = 900 \text{ min}^{-1}$	$i_d^{\text{min}} = 1 \text{ A}$	$i_d^{\text{max}} = 5 \text{ A}$
Skaliran tok i_q^{ref} z dodanim odvodom u_q^{ref}		
$K_1 = 2,5$	$K_2 = 5$	

Rezultati simulacij s slike 11 potrjujejo zadovoljivo delovanje regulatorja i_d^{ref} . Po drugi strani velikost potrebnega toka i_d^{ref} zagotovo predstavlja precejšnjo pomajkljivost s stališča dodatnih izgub v statorskih navitijih, sploh če vemo, da pri zaporedni vezavi dveh SM tok i_d^{ref} v stacionarnem stanju ni presegel vrednosti 2 A.

7 SKLEP

V članku je predstavljen koncept izvedbe simulacijskega modela dveh ali več zaporedno vezanih SM, ki jih vodimo z enim FP. Rezultat opravljene stabilnostne analize pogonskega sistema je razkril, da vsiljevanje dovolj velike pozitivne vrednosti magnetilne komponente statorskoga toka i_d^{ref} zagotovi stabilno obratovanje različno obremenjenih SM, pri čemer njihovo kotno hitrost ne-posredno merimo. Z namensko razvitim simulacijskim modelom so bile preverjene štiri izvedbe regulatorja i_d^{ref} ,



Slika 11: Poteki veličin pri zaporedni vezavi štirih SM.

za najustreznejšo pa se je s stališča omejevanja izgub v navitjih motorjev in zagotavljanja ustreznih dinamičnih odzivov izkazala rešitev skaliranega tok i_q^{ref} z dodano razliko kotnih hitrosti.

Čeprav lahko opisano vodenje večjega števila SM z le enim FP smatramo za cenovno ugodno rešitev pri matričnih ventilatorskih sistemih, pa moramo ovrednotiti tudi širši kontekst uporabe takšnega pogona. Zaradi potrebnega dodatnega magnetilnega toka se povečajo topotne izgube, kar pomeni znižanje energijske učinkovitosti oziroma povišanje obratovalnih stroškov. Zaradi zaporedne vezave se soočimo tudi s težavo maksimalno dosegljive vrtilne hitrosti posameznega SM, ki je nižja od nazivne. Rešitev je uporaba FP z večjo napetostno rezervo, ki mora za potrebe zagotavljanja stabilnosti imeti tudi tokovno rezervo, kar pomeni višjo ceno takšnega FP. Cenovno ugodni komercialni FP tudi ne omogočajo uporabniku neposrednega spremenjanja regulacijskih algoritmov, kar one-mogoča implementacijo predstavljenega regulatorja magnetilnega toka. Zato bi bilo smiselno razviti namenski FP, kar pa zaradi omejenih serij zopet pomeni cenovno vprašljivo rešitev. Teoretično dognana ustrezna rešitev stabilnega vodenja takšnega pogona ima torej v praksi vrsto pomanjkljivosti, ki zahtevajo pred dokončno oceno ekonomski upravičenosti uporabe tovrstne izvedbe ventilatorskega pogona temeljito presojo.

LITERATURA

- [1] Seasons 4, “Fan Array System [Online].” Dosegljivo: <http://www.seasons4.net/wp-content/uploads/2012/09/BrochureRev031213.pdf>. [Dostopano: 4.2.2018].

- [2] Trane Engineers Newsletter, “Direct-Drive Plenum Fans and Fan Arrays [Online].” Dosegljivo: https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/engineers-newsletters/acoustics/admapn036en_0310.pdf. [Dostopano: 4.2.2018].
- [3] Nortek Air Solutions, “Fanwall technology in data centers [Online].” Dosegljivo: http://www.huntair.com/Portals/Huntair/Literature/NAS-DC-WP-1B_FWT-TCO.pdf. [Dostopano: 4.2.2018].
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. N. L. Nguyen, *Commande Predictive de deux Machines Synchrones alimentées en parallèle par un Onduleur de Tension Triphasé*. PhD dissertation, INP Toulouse, Genie Electrique, Electronique et Telecommunications (GEET), Laboratoire Laplace - UMR5213, 2013.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] D. Seto, F. Sun, J.F. Giers and N. Hootsmans, “Single electronic drive controlling two synchronous motors via modified vector control,” *Journal of Power Electronics*, 2003.

Matej Čadež je diplomiral leta 2015 in magistriral leta 2018 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Za svoje magistrsko delo je leta 2018 prejel fakultetno Prešernovo nagrado. Trenutno je zaposlen v podjetju Rudis d.o.o. Trbovlje na oddelku Projektiranje in tehnoški razvoj kot inženir sodelavec.

Rastko Fišer je diplomiral leta 1984, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je zaposlen kot izredni profesor. Predava predmete s področja električnih poganov in močnostne elektronike ter je predstojnik Laboratorija za elektromotorske pogone. Leta 1999 je za doktorsko disertacijo prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča, leta 2009 pa Vidmarjevo nagrado za celovito pedagoško delo. Njegovo raziskovalno delo je povezano z modeliranjem rotacijskih in linearnih električnih motorjev, načrtovanjem elektromotorskih pogonov ter novimi pristopi na področju nadzora stanja in diagnostike električnih strojev. Rastko Fišer je član več združenj IEEE.

Henrik Lavrič je diplomiral leta 1997, magistriral leta 2001 in doktoriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Sedaj je zaposlen na isti ustanovi kot asistent v Laboratoriju za elektromotorske pogone. Njegovo raziskovalno zanimanje vključuje naslednja področja: načrtovanje in optimizacija elektromotorskih pogonov in močnostnih pretvornikov, uporabo visoko učinkovitih elektromotorskih pogonov v industrijskih postrojih in razvoj specialnih merilnih pretvornikov za zahtevna industrijska okolja. Raziskuje tudi možnosti alternativne proizvodnje električne energije na vodotokih z izredno nizkimi padci.

Klemen Drobnič je doktoriral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Za doktorsko disertacijo s področja diagnostike električnih poganov je prejel Vodovnikovo in Bedjaničeve nagrade. Na isti fakulteti je danes zaposlen kot asistent, kjer sodeluje pri večih predmetih s širšega področja električnih poganov. V okviru znanstveno-raziskovalnega dela se ukvarja z različnimi vidiki elektrifikacije vozil, modeliranjem električnih poganov, razvojem večfaznih pogonskih topologij in diagnostiko rotacijskih strojev.