

# 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 dodobra 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 podrobneje 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 statorskega toka in njegov vpliv na dinamične odzive pogonskega sistema. Predstavljen regulacijski algoritem omogoča nastavljanje minimalnega magnetilnega toka za zagotavljanje stabilnosti sistema, saj je njegovo vrednost smiselno omejevati zaradi dodatnih jouskih 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.

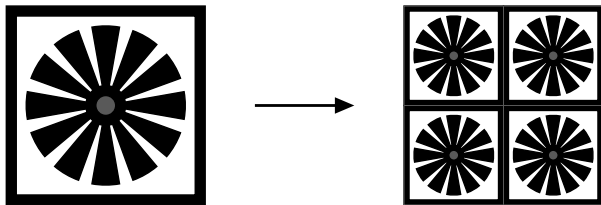
**Keywords:** PMSM, frequency converter, stability analysis, magnetizing current controller, fan drive

## 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 namestitve, znižanje nivoja hrupa in ob ustreznem

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 vrtilnim magnetnim poljem, katerega krožna frekvenca je določena s frekvenco napetosti razsmernika. V primeru povečanja bremenskega navora se sinhronskemu motorju poveča kolesni kot, tj. kot med vektorjema inducirane in statorske napetosti. Le-ta ne sme preseči vrednosti  $\approx 2$ , 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 najpogostejša izbira, v nadaljevanju obravnavamo izključno analizo pogona s takšno vrsto električnih motorjev.

V prvi polovici pričujočega 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 zagotavljala stabilno obratovanje sistema pri različno obremenjenih SM. V drugi polovici članka so podrobneje 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.

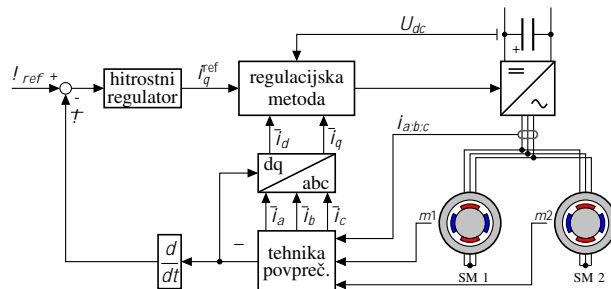
## 2 REŠITVE PRI VZPOREDNI VEZAVI

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 njihovih povprečnih

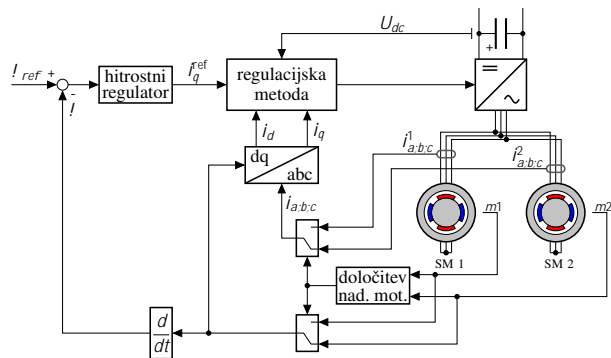
vrednosti tokov, kota zasuka in kotne hitrosti rotorja združena v ekvivalentni SM. Pravzaprav gre za klasično hitrostno regulacijo enega SM, kateri dodamo izračun povprečnih vrednosti veličin.



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 zaprt-zančne regulacije, medtem ko je SM, ki prevzame vlogo podrejenega motorja (angl. *slave*), voden odprt-zančno. 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 podrobneje opisan izbor s primerjanjem kota zasuka rotorjev obeh SM.

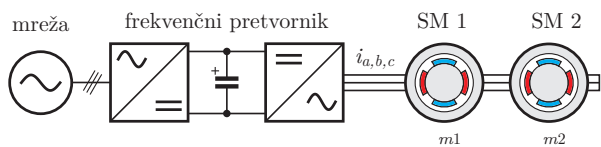


Slika 3: Shema izbora nadrejenega motorja pri vzporedni vezavi dveh SM.

## 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 nezamisljiv 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 <sup>-1</sup>
Inducirana napetost (pri $n_n$ )	$E_n$	56 V
Vztrajnostni moment	$J_n$	$4,93 \cdot 10^{-3}$ kg m <sup>2</sup>
Koeficient viskoznega trenja	$k_{tr}$	$1,371 \cdot 10^{-6}$ Nms rad <sup>-1</sup>
Parametri nadomestnega vezja		
Statorska upornost	$R_s$	1,01
Statorska induktivnost	$L_s$	8,8 mH
Magnetni sklep trajnih magnetov	$R$	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. Modelski 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

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

$$u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + l_r L_s i_d + l_r R \quad (1b)$$

Pogled na konfiguracijo pogona z zaporedno vezavo pokaže (slika 4), da se rotorska kota  $m_1$  in  $m_2$  posameznih motorjev v splošnem razlikujeta. Zato definiramo kot modelskega KS tako, da povprečimo njuni vrednosti

$$= \frac{r_1 + r_2}{2}; \quad (2)$$

kjer z upoštevanjem  $r_1 = p_p m_1$  in  $r_2 = p_p m_2$  zamenjamo mehanske veličine z električnimi. Električno kotno hitrost KS dobimo z

$$\dot{l} = \frac{d}{dt}; \quad (3)$$

prav tako tudi električni kotni hitrosti obeh motorjev

$$\dot{l}_{r1} = \frac{d r_1}{dt}; \quad \dot{l}_{r2} = \frac{d r_2}{dt}; \quad (4)$$

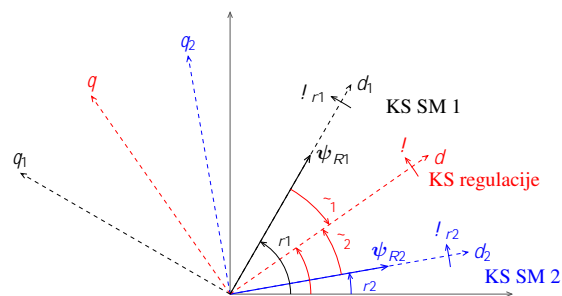
Očitno je, da lokalna KS obeh motorjev nujno ne sovpadata z modelskim KS. Ker izhodiščna napetostna

enačba za posamezni motor predpostavlja pravilno informacijo o kotu  $r_1$  (oz.  $r_2$ ), definiramo razliko kotov med modelskim KS in KS posameznega motorja

$$\tilde{\gamma}_1 = r_1 \quad (5a)$$

$$\tilde{\gamma}_2 = r_2 \quad (5b)$$

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

$$u_{d1} = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - l_r L_s i_q - l_r R \sin \tilde{\gamma}_1 \quad (6a)$$

$$u_{q1} = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + l_r L_s i_d + l_r R \cos \tilde{\gamma}_1; \quad (6b)$$

Podobno velja za motor SM 2

$$u_{d2} = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - l_r L_s i_q - l_r R \sin \tilde{\gamma}_2 \quad (7a)$$

$$u_{q2} = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + l_r L_s i_d + l_r R \cos \tilde{\gamma}_2; \quad (7b)$$

V enačbah (6) in (7) nastopata enaka tokova, tj. magnetilna komponenta  $i_d$  in navarna 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

$$u_d = 2R_s i_d + 2L_s \frac{di_d}{dt} - 2l_r L_s i_q - R \left( l_r \sin \tilde{\gamma}_1 + l_r \sin \tilde{\gamma}_2 \right) \quad (8a)$$

$$u_q = 2R_s i_q + 2L_s \frac{di_q}{dt} + 2l_r L_s i_d + R \left( l_r \cos \tilde{\gamma}_1 + l_r \cos \tilde{\gamma}_2 \right); \quad (8b)$$

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

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - 2R_s i_d - 2l_r L_s i_q - R \left( l_r \sin \tilde{\gamma}_1 + l_r \sin \tilde{\gamma}_2 \right)}{2L_s} \quad (9)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u_q - 2R_s i_q - 2l_r L_s i_d - R \left( l_r \cos \tilde{\gamma}_1 + l_r \cos \tilde{\gamma}_2 \right)}{2L_s}; \quad (10)$$

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

$$M_{e1} = \frac{3}{2} p_p R \left( i_q \cos \tilde{\gamma}_1 - i_d \sin \tilde{\gamma}_1 \right) \quad (11a)$$

$$M_{e2} = \frac{3}{2} p_p R \left( i_q \cos \tilde{\gamma}_2 - i_d \sin \tilde{\gamma}_2 \right); \quad (11b)$$

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

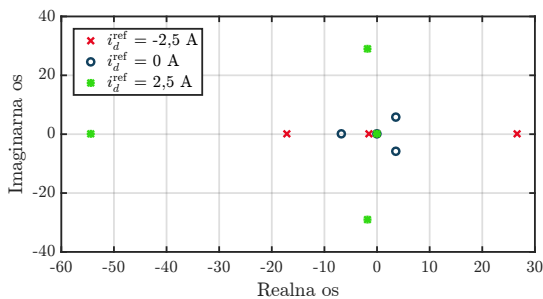
$$\frac{dI_{m1}}{dt} = \frac{1}{J} (M_{e1} - M_{br1}) - \frac{k_{tr}}{J} I_{m1} \quad (12a)$$

$$\frac{dI_{m2}}{dt} = \frac{1}{J} (M_{e2} - M_{br2}) - \frac{k_{tr}}{J} I_{m2}; \quad (12b)$$

kjer sta  $M_{br1}$  in  $M_{br2}$  bremenska navora 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. 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  $n_m^{ref} = 2000 \text{ min}^{-1}$  in razliki v obremenitvi obeh motorjev  $0,1 M_n$ . 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  $2,5 \text{ A}$ ,  $0 \text{ A}$  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



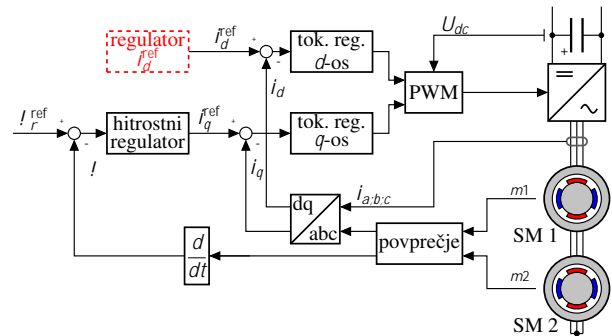
Slika 6: Lega polov v področju blizu imaginarne osi pri  $n_m^{ref} = 2000 \text{ min}^{-1}$  v odvisnosti od toka  $i_d^{ref}$ .

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

#### 5 REGULATOR REFERENČNE VREDNOSTI MAGNETILNEGA TOKA

Na podlagi rezultatov stabilnostne analize je smiselno razviti ustrezen regulator, s katerim nastavimo minimalno potrebno pozitivno referenčno vrednost  $d$  komponente toka, ki bo zagotovila stabilno obratovanje zaporedno vezanih SM. Tako omejimo dodatne toplotne 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 podrobneje 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 testiranjmi je bilo ugotovljeno, da sistem prenese razliko v obremenitvi tudi do  $0,9 M_n$ . 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]

$$i_d^{ref} = K_1 i_q^{ref} - i_{q;n}; \quad (13)$$

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

$$i_{q;n} = \frac{2}{3} \frac{M_n}{p_p R}; \quad (14)$$

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 $i_q^{ref}$ 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 vzornih intervalov ( $t_{vz} = 0;1$  ms). Trajanjecasovnega zamika je določeno eksperimentalno. V k-tem vzornem intervalu izračunamo  $i_d^{ref}$  z

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

Takšna izvedba regulatorja omogoča stabilno delovanje obeh SM v omejenem področju obratovanja, kjer razlika v njuni obremenitvi ne sme preseči  $0,4 M_n$ . Iz oscilogramov na slikah 8 (c) in 9 (c) je razvidno, da je duseenje prehodnega pojavave vedno relativno dolgotrajno, zato je potrebna bolj rešitev.

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

Ustrezne 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)

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

V tem primeru je duseenje oscilacij tokov  $i_d^{ref}$  (slika 8 (d)) in vrtilne hitrosti (slika 9 (d)) skorajda hipno zmanjšanih. 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 kon guraciji, kjer ocenimo le povprečno kotno hitrost obeh SM. Pri razsiritvi vezave na ve kot dva SM tcimo ob zaenkrat se nereseno 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 dinamičnih nastavljanjih  $i_d^{ref}$  in sta določeni eksperimentalno, lahko bralec najde v tabeli 3. Ob tem velja omeniti, da velikost tokov  $i_d^{ref}$  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 tokov  $i_d^{ref}$ .

Tabela 3: Parametri regulatorja  $i_d^{ref}$ .

$n_m^{ref} = 2000 \text{ min}^{-1}$	$i_d^{min} = 0;1 \text{ A}$	$i_d^{max} = 5 \text{ A}$
Konstantna vrednost $i_d^{ref}$		
$i_d^{ref} = 2;5 \text{ A}$		
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 VE C 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 vsebujeta dodaten člen inducirane napetosti

$$\begin{aligned} U_d &= 3R_s i_d + 3L_s \frac{di_d}{dt} - 3! L_s i_q - ! r_1 R \sin^{-1} - \\ &\quad ! r_2 R \sin^{-2} - ! r_3 R \sin^{-3} \\ U_q &= 3R_s i_q + 3L_s \frac{di_q}{dt} + 3! L_s i_d + ! r_1 R \cos^{-1} + \\ &\quad ! r_2 R \cos^{-2} + ! r_3 R \cos^{-3}. \end{aligned} \quad (17)$$

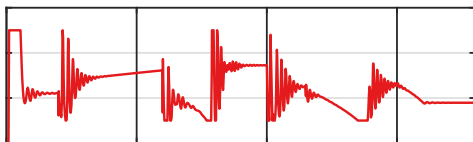
Zaradi dodatnega SM in omejene vrednosti napetosti enosmernega tokokroga  $U_{dc} = 540 \text{ V}$ , se najvišja še dosegljiva vrtilna hitrost zniža na vrednost  $1300 \text{ min}^{-1}$ . V primerjavi z vezavo dveh SM je pri vezavi treh za stabilno delovanje potreben približno 2-krat večji tok  $i_d^{ref}$ , kar skladno s tabelo 4 pomeni povečanje faktorjev  $K_1$  in  $K_2$  ter spodnje limite  $i_d^{min}$ . Povečanje slednje iz  $0,1 \text{ A}$  na  $1 \text{ A}$  zmanjša prenihaj toka  $i_d^{ref}$ . 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.

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

(a) Navor  $M_e$ .

(b) Vrtilna hitrost  $n_m$ .



(c) Tok  $i_d^{ref}$ .

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  $t = 8 \text{ s}$  pride do največje razlike v obremenitvi, ki ne nastopi skočno.

Regulator je v intervalu od  $6 \text{ s}$  do  $7,8 \text{ s}$ , kljub večanju razlike v obremenitvi, zmanjševal vrednost toka  $i_d^{ref}$ , saj se je skupna obremenitev približevala nazivni. Sistem je ob času  $7,8 \text{ s}$  že blizu meje stabilnega obratovanja, kar se vidi iz poteka vrtilne hitrosti na 10 (b). Ob njeni spremembi se odzove hitrostni regulator, ki poveča tok  $i_q^{ref}$ , 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 ustrezno.

## 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

$$\begin{aligned} U_d &= 4R_s i_d + 4L_s \frac{di_d}{dt} - 4! L_s i_q - ! r_1 R \sin^{-1} - \\ &\quad ! r_2 R \sin^{-2} - ! r_3 R \sin^{-3} - ! r_4 R \sin^{-4} \\ U_q &= 4R_s i_q + 4L_s \frac{di_q}{dt} + 4! L_s i_d + ! r_1 R \cos^{-1} + \\ &\quad ! r_2 R \cos^{-2} + ! r_3 R \cos^{-3} + ! r_4 R \cos^{-4}. \end{aligned} \quad (18)$$

Maksimalna dosegljiva vrtilna hitrost se pri napajanju sistema z nazivno napetostjo  $U_n$  ( $U_{dc} = 540 \text{ V}$ ) zniža na vrednost  $900 \text{ min}^{-1}$ . Za zagotavljanje stabilnega obratovanja štirih zaporedno vezanih SM, katerih razlika v obremenitvi lahko doseže 40 %  $M_n$  (slika 11 (a)), je zopet 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  $4 \text{ A}$ . 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.

$n_m^{ref} = 900 \text{ min}^{-1}$	$i_d^{min} = 1 \text{ A}$	$i_d^{max} = 5 \text{ A}$
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 pomanjkljivost s stališča dodatnih izgub v statorskih navitjih, sploh če vemo, da pri zaporedni vezavi dveh SM tok  $i_d^{ref}$  v stacionarnem stanju ni presegel vrednosti  $2 \text{ A}$ .

## 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 statorskega toka  $i_d^{ref}$  zagotovi stabilno obratovanje različno obremenjenih SM, pri čemer njihovo kotno hitrost neposredno merimo. Z namensko razvitim simulacijskim modelom so bile preverjene štiri izvedbe regulatorja  $i_d^{ref}$ ,

