

ENERGETSKO VISOKO UČINKOVITA PUHALA GNANA Z BREZSENZORSKO VODENIM SINHRONSKIM STROJEM S TRAJNIMI MAGNETI

Željko PLANTIĆ, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V tem delu so obravnavana energetska visokoučinkovita puhal, ki jih poganja sinhronski stroj s trajnimi magneti (SSTM). Za izboljšanje energetske učinkovitosti puhal je potrebno čim bolj zmanjšati izgube, ki se pojavljajo tudi zaradi neoptimalnega delovanja. Pri tem si lahko pomagamo z ustreznim vodenjem. Puhala obratujejo tudi v težkih obratovalnih pogojih (vlažnih prostorih, pod vplivom vibracij ipd.), kjer se skušamo izogniti uporabi mehanskih senzorjev položaja, do informacije o položaju, ki je potrebna pri vektorskem vodenju SSTM pa skušamo priti preko ustreznih modelov in merjenih tokov in napetosti. Tako vodenje imenujemo brezsenzorsko vodenje. Za nastavitev tokovnih in hitrostnih regulatorjev in pri izvedbi brezsenzorskega vodenja pa moramo čim boljše poznati parametre stroja. Njihovemu določanju se posvečamo v tem delu.

ABSTRACT

This paper deals with the energy saving high efficient fans and blowers driven by permanent magnet synchronous machine (PMSM). In order to improve the efficiency of fans and blower, the losses due to the non-optimal operation should be minimized. A proper control of the PMSM can help to reach this goal. The fans and blower often operate under operating conditions where operation without position sensor is desired. In such cases the rotor position required in the PMSM control can be determined using appropriate models and measured currents and voltages, which leads to the sensorless control realizations. Successful implementation of the sensorless control requires a very good knowledge of PMSM parameters. Some of the methods appropriate for their determination are discussed in this paper.

1. UVOD

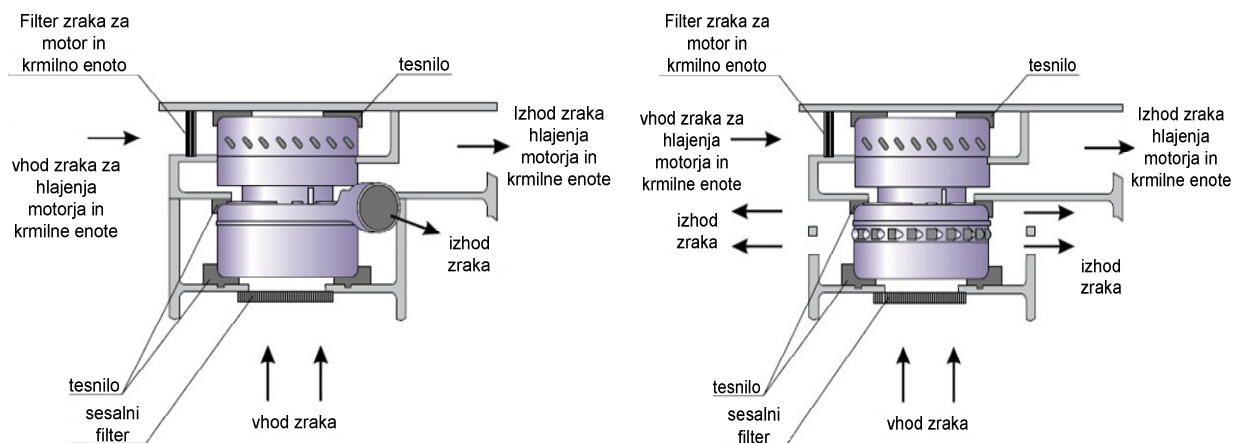
V današnji tehniki je nepredstavljivo, da ne bi uporabljali puhal. V različnih oblikah jih najdemo v industrijskih aplikacijah, v medicinskih in farmacevtskih napravah, v sistemih za čiščenje odpadnih vod, pri pnevmatskih pogonih in kompresorjih, v sistemih za prezračevanje prostorov, v tekstilni in kemijski industriji, v papirni industriji, v gorljivih celicah, v proizvodnji hrane in pijač kakor tudi v gospodinjstvu [1].

Zaradi vse večjih potreb po električni energiji in vse večjem zmanjševanju možnosti izgradnje novih sistemov za proizvodnjo električne energije se vse bolj uveljavljata termina kot sta optimizacija električnih porabnikov in učinkovita raba električne energije. Ker puhal vsebujejo približno štirinajst odstotni delež porabnikov električne energije v motornih pogonih [2], jih je tudi potrebno optimizirati, da porabijo čim manj tako dragocene električne energije. V tehniki je uveljavljeno več načinov obratovanja puhal. Najslabši način je ta, da puhal obratujejo s konstantno hitrostjo ves čas. Da bi zagotovili optimalno obratovanje in s tem optimalno porabo električne energije, moramo obratovanje puhal prilagoditi potrebam, kar pomeni reduciranje pritiska in/ali pretoka medija, ki ga ustvarjajo puhal. Reduciranje pritiska in/ali pretoka se je prej izvajalo s pomočjo mehanskih dušil in loput, ki so se odpirala ali zapirala v odvisnosti od potreb in je opisano v [3, 4] splošno za črpalke, puhal in kompresorje ter v [5] v industriji kaljenja stekla. Ta način je bolj zahteven za vzdrževanje, ne omogoča natančen nadzora puhal in je običajno drag. Lahko tudi uporabimo frekvenčno nastavljeni kontroler, s katerim spreminjamo hitrost vrtenja [6]. Bolj primeren in zadovoljiv način je uporaba pretvornikov [7] s katerim lahko hitrostno vodimo pogonski stroj puhal, s čem spreminjamo hitrost vrtenja in verno sledimo zahtevam. Za vektorsko vodenje pogonskega stroja potrebujemo informacijo o položaju rotorja. To lahko zagotovimo na dva načina, z meritvijo ali pa z matematičnim modelom, ki ga računa iz merjene napetosti in tokovnega odziva. Pri meritvah si običajno pomagamo z merilniki položaja kot so na primer inkrementalni dajalniki, hallove sonde ipd. Ker puhal pogosto uporabljamo v težkih pogojih kot sta na primer prisotnost vibracij ter vlažna okolica, takšni merilniki pogosto odpadejo. Zaradi tega se vse bolj raziskujejo in uporabljajo matematični modeli, s katerimi bi zamenjali fizične merilnike položaja rotorja. Take pristope srečujemo pod nazivom brezsenzorsko vodenje. Za pravilno vodenje pogonskega stroja moramo tako zelo dobro poznati model in parametre stroja, pa tudi pravilno določiti parametre regulatorjev, ki poskrbijo za ustrezno dinamiko in spremembe hitrosti vrtenja. Parametre strojev lahko določamo na različne načine. Nekateri od njih so opisani v tem delu, opise nekaterih pa lahko najdemo tudi v [8, 9].

2. ENERGETSKO VISOKOUČINKOVITA PUHALA

Kot je v uvodu že omenjeno, puhal srečujemo v različnih aplikacijah, kot so: papirna industrija, kopirnice večjih razsežnosti, pri dviganju, prenos in ravnanje z opremo, pnevmatski transporti in pogoni, prezračevanje in čiščenje zraka v industrijskih halah, čiščenju odpadnih vod in dekontaminacija tal, v medicini in farmaciji, naprave za vpihavanje in kompresorji,

gorljive celice, sesalniki in gospodinjski aparati ter mnoge druge. Obstaja več različnih vrst puhal od katerih se najpogosteje srečuje tangencialna (Slika 1 a)) in radialna puhal (Slika 1 b)). Kot je razvidno iz omenjenih slik, pri tangencialnih puhalih zrak tangencialno izhaja skozi izhodno cevko in se najpogosteje uporablja za puhalo, ki imajo zahtevo po visokem tlaku zraka. Pri radialnih puhalih pa zrak izhaja radialno in se taka puhalo uporabljajo predvsem za velik pretok zraka.



Slika 1: Vrste puhal: a) tangencialni tip; b) radialni tip

Pod energetske učinkovitimi puhal razumevamo vse vrste puhal, ki obratujejo optimalno v skladu z njihovimi zahtevami. To pomeni, da je pogonski stroj hitrostno voden in se ga da prilagoditi zahtevam aplikacij v kateri se ga uporablja. Kot pogonske stroje puhal najpogosteje uporabljamo koračne motorje in sinhronske stroje s trajnimi magneti, neredko tudi asinhronske stroje. Da bi lahko izbrali ustrezno puhalo moramo biti pozorni na določene specifikacije puhal, kot so: nazivna napetost, nazivna moč, sesalno ali pihalno delovanje, pretok zraka na vhodni odprtini, način pretoka zraka na izhodu – tangencialno ali radialno, temperatura okolice zaradi vhodnega zraka ter hlajenja pogonskega stroja, število stopenj, možnost regulacije vhodnega in izhodnega medija, maksimalen pretok in tlak zraka, ki ga puhalo ustvarja, velikost puhal, cena ipd [1].

Pri puhalih moramo paziti na varnost obratovanja. Na pravilen način moramo preprečiti poškodbe ljudi ter tudi same opreme tako, da ne more priti do neposrednega stika zunanjih predmetov s puhalo. To običajno preprečimo s posebnimi filtri in mrežicami, ki ne dovoljujejo nevarnih stikov zunanjih predmetov z notranjimi rotirajočimi deli puhal. S filtri preprečimo tudi nabiranje prahu, ki lahko povzroča predvsem termične težave.

Osnovne tehnične zahteve, ki jih puhalo morajo zadovoljiti so običajno zaščita proti zavrtem rotorju, zaščita proti termičnim preobremenitvam, gladek zagon, nadtokovna zaščita, pod- in prenapetostna zaščita ter regulacija hitrosti vrtenja [1].

3. VODENJE POGONSKEGA SINHRONKEGA STROJA S TRAJNIMI MAGNETI

Sinhronski stroj s trajnimi magneti (SSTM) je zaradi svojih pozitivnih lastnosti (visok izkoristek, velika tokovna gostota na enoto volumna stroja, ...) eden izmed najbolj uporabljanih strojev v pogonih. Zaradi omejitev obratovanja SSTM na omrežni napetosti in različnih zahtev v pogonih ta stroj pogosto uporabljamo in vodimo skupaj z ustreznim pretvornikom. V nadaljevanju bosta prikazana dva načina vektorskega vodena SSTM, z in brez merilnika položaja. Za simulacijske izračune moramo poznati model SSTM. Nelinearni model SSTM zapisan v rotirajočem dq -koordinatnem sistemu opišemo z napetostnimi enačbami (1) in (2), ki opisujejo električni del stroja ter z navorno enačbo (3) in enačbo gibanja (4), ki opisujeta mehanski del stroja. Z nelinearnim modelom SSTM upoštevamo vse magnetne nelinearnosti, križne sklopitve zaradi nasičenja ter medsebojni vpliv utorov na statorju in trajnih magnetov na rotorju.

$$\mathbf{u}_{dq} = R\mathbf{i}_{dq} + \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{dq} + \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{mdq} \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; \mathbf{i}_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \boldsymbol{\psi}_{dq} = \begin{bmatrix} \psi_d(i_d, i_q, \theta) \\ \psi_q(i_d, i_q, \theta) \end{bmatrix}; \boldsymbol{\psi}_{mdq} = \begin{bmatrix} \psi_{md}(\theta) \\ \psi_{mq}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$t_e = p_p \left[\left(\frac{\partial \psi_d}{\partial \theta} - \psi_q + \frac{\partial \psi_{md}}{\partial \theta} - \psi_{mq} \right) i_d + \left(\frac{\partial \psi_q}{\partial \theta} - \psi_d + \frac{\partial \psi_{mq}}{\partial \theta} - \psi_{md} \right) i_q \right] \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = p_p (t_e - t_b) - f\omega \quad (4)$$

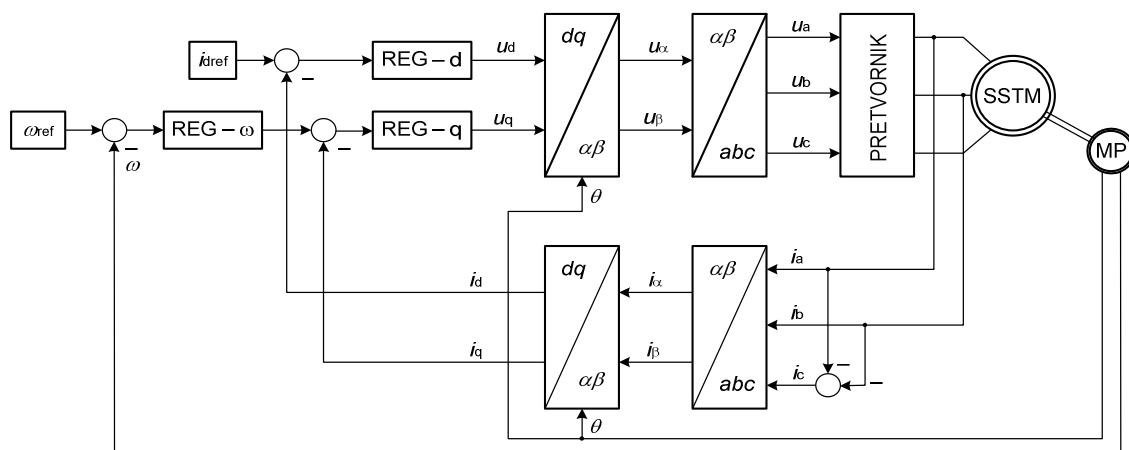
V enačbah (1) do (4) sta u_d in u_q napetosti v d - in q -osi, i_d in i_q toka v d - in q -osi, R statorska ohmski upornosti, ψ_d in ψ_q magnetna sklepa zaradi vzbujanja statorskih tokov v d - in q -osi, ψ_{md} in ψ_{mq} magnetna sklepa zaradi trajnih magnetov v d - in q -osi, θ položaj rotorja (električni kot), ω električna kotna hitrost, t_e električni navor stroja, t_b navor bremena, f koeficient viskoznega trenja, J vztrajnostni moment in p_p število polovih parov.

Model zapisan z napetostnimi enačbami (1), navorno enačbo (3) in enačbo gibanja (4) je osnova za analizo in sintezo vodenja SSTM.

3.1 Vektorsko vodenje SSTM z merilnikom položaja

Pri vektorskem vodenju stroja potrebujemo pri transformacijah iz rotirajočega dq -koordinatnega sistema v originalni trifazni statorski sistem in obratno informacijo o položaju

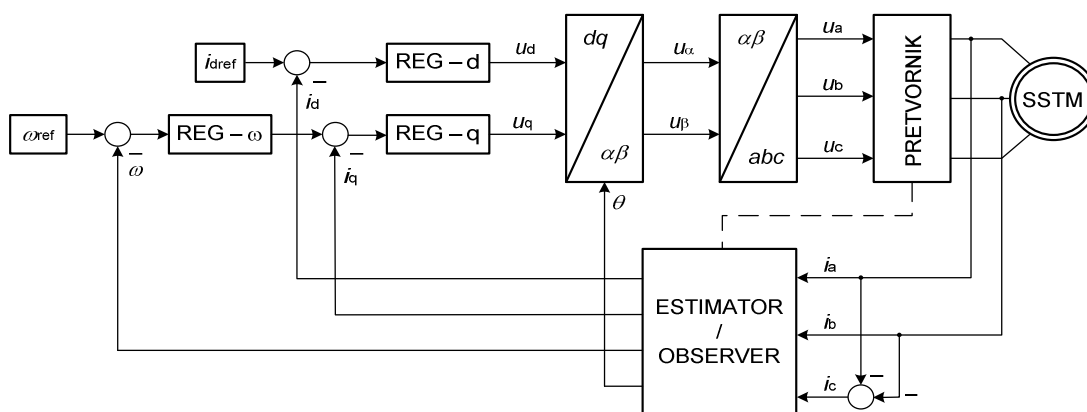
rotorja. To lahko pridobimo tako, da položaj določimo z merilnikom ali pa ga izračunamo z ustreznim matematičnim modelom. Slika 2. prikazuje klasično vektorsko vodenje SSTM, pri čem položaj rotorja merimo s pomočjo merilnika položaja (MP), ki je običajno inkrementalni dajalnik ali pa hallove sonde. S takim vodenjem spreminjamo referenčno vrednost hitrosti in toka v q -osi s čimer prilagajamo dejansko hitrost vrtenja rotorja in s tem hitrost vrtenja puhalu željeni, oziroma zahtevani vrednosti hitrosti.



Slika 2: Shema vektorskega vodenja z merilnikom položaja rotorja

3.2 Vektorsko vodenje SSTM brez merilnika položaja

Slika 3. prikazuje vektorsko vodenje SSTM brez uporabe merilnika položaja. Informacijo o položaju rotorja računamo s pomočjo matematičnega modela, ki iz merjenih statorskih napetosti in tokov računa hitrost vrtenja in položaj rotorja.



Slika 3: Shema vektorskega vodenja brez merilnikom položaja rotorja

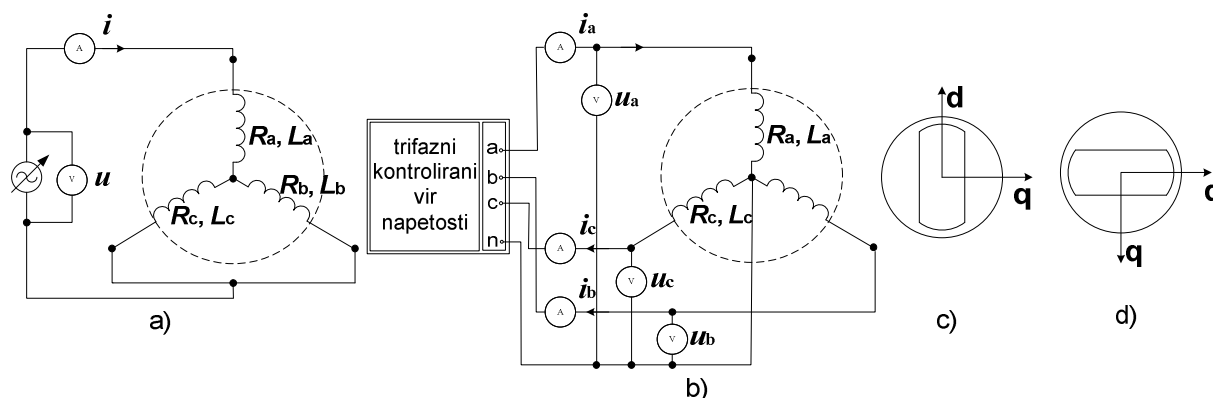
Matematični model obravnavamo kot ocenjevalec (estimator) ali opazovalnik (observer). Pri estimatorjih računamo ocenjeno vrednost položaja rotorja in nimamo povratne povezave s katero sproti popravljamo pogrešek. Pri opazovalnikih pa sproti računamo položaj rotorja in popravljamo pogrešek, ki se pojavlja pri računanju. Obstaja veliko metod za računanje položaja rotorja, ki jih lahko razdelimo v tri osnovne skupine. Prvo skupino lahko imenujemo odprtozančne metode: metoda direktnega računanja kota, določanje rotorskega kota iz izračuna statorske induktivnosti, metoda integracije inducirane napetosti ter metoda razširjene inducirane napetosti. Drugo skupino lahko imenujemo zaprtozančne metode: metoda Kalmanovega filtra za linearne sisteme in metoda razširjenega Kalmanovega filtra za nelinearne sisteme, metoda modelno referenčnega adaptivnega vodenja sistema ter uporaba opazovalnika v drsnem režimu. Zadnjo skupino lahko imenujemo metode, ki temeljijo na neidealnih lastnostmi stroja: metoda injekcije visokofrekvenčnega signala, metoda injekcije nizkofrekvenčnega signala, posredna detekcija magnetnega fluksa pri on-line meritvi reaktance in podobno. Običajno so metode, ki vsebujejo povratno zanko bolj zahtevne za izvedbo vendar dajo bolj natančne rezultate. Težava večine metod je merjenje začetnega položaja rotorja ter položaja rotorja v območju zelo nizkih hitrosti in zelo visokih hitrostih. Velikokrat to težavo odpravljamo s kombinacijo dveh ali celo več metod.

4. DOLOČANJE PARAMETROV SINHRONSKEGA STROJA S TRAJNIMI MAGNETI

Parametri sinhronskega stroja so določeni z eksperimentalnimi meritvami na realnem SSTM, ki je uporabljen za brezsenzorsko vodenje. Uporabljeni sta dve metodi, ki temeljita na numerični integraciji izmerjenih statorskih napetosti in tokov v d - in q -osi. Stroj je napajan na dva načina, enofazno s pomočjo enega linearnega ojačevalnika in trifazno s tremi enofaznimi linearnimi ojačevalniki ter z dvema različnima frekvenčnima pretvornikoma. Parametri so prikazani v obliki $\psi(i)$ karakteristik.

4.1 Način napajanja SSTM

V namen določitve parametrov SSTM je stroj napajan na dva načina, enofazno in trifazno. V primeru enofaznega napajanja SSTM je uporabljen en enofazni linearni ojačevalnik (slika 4a)). V položaju, ko se rotor ustavi sta poravnani d -os in magnetna os faze 'a' (Slika 4c)). V tem položaju napajamo stator z napetostmi sinusne in pravokotne oblike različnih amplitud in konstantne frekvence, merimo tokovne odzive in napetosti s pomočjo katerih izračunamo parametre za d -os. Na to fizično premaknemo rotor v položaj, ko dobimo največjo amplitudo toka. V tem položaju ga zavremo (Slika 4d)) in ponovimo postopek ter iz izmerjenih napetosti in tokovnih odzivov izračunamo parametre za q -os.



Slika 4: Shematski prikaz: a) enofazno napajanja statorja; b) trifazno napajanje statorja; c) položaj rotorja za določanje parametrov v d -osi (pri trifaznem napajanju in za q -os); d) položaj rotorja za določanje parametrov v q -osi (samo pri enofaznem načinu napajanja)

V primeru trifaznega napajanja je stroj napajen s kontroliranim virom napetosti v obliki treh enofaznih linearnih ojačevalnikov ter z dvema različnima pretvornikoma. Postopek določitve je podoben prejšnjemu, ko smo stroj napajali enofazno. V tem načinu napajanja stroja z vsiljeno enosmerno komponento toka v d -osi najprej poravnamo d -os in magnetno os faze 'a'. V tem položaju (Slika 4c)) zavremo rotor, ki je potem zavrt skozi vse teste. Pri napajanju stroja z napetostmi sinusne in pravokotne oblike napetosti spreminjajoče amplitude in nizke konstantne frekvence najprej v d -osi, merimo tokovni odziv in napetost, iz česar izračunamo parametre za d -os. Nato na enak način ponovimo teste pri napajanju q -osi, iz česar določimo parametre stroja v omenjeni osi..

4.2 Metode računanja parametrov sinhronskega stroja s trajnimi magneti

Uporabljeni in primerjani sta dve metodi računanja parametrov SSTM. Temeljita na Faraday-evem zakonu in numerični integraciji. Pri izračunu sta uporabljeni izmerjena napetost in tokovni odziv. Izraz za časovni potek magnetnega sklepa (4) izhaja iz osnovne napetostne enačbe SSTM (1), ki ga dobimo, če upoštevamo pogoje, pri katerih so izvedeni testi. Rezultati obeh metod so podani v obliki $\psi(i)$ karakteristik.

$$\psi(t) = \int_0^t [u(\tau) - Ri(\tau)] d\tau + \psi(0) \quad (4)$$

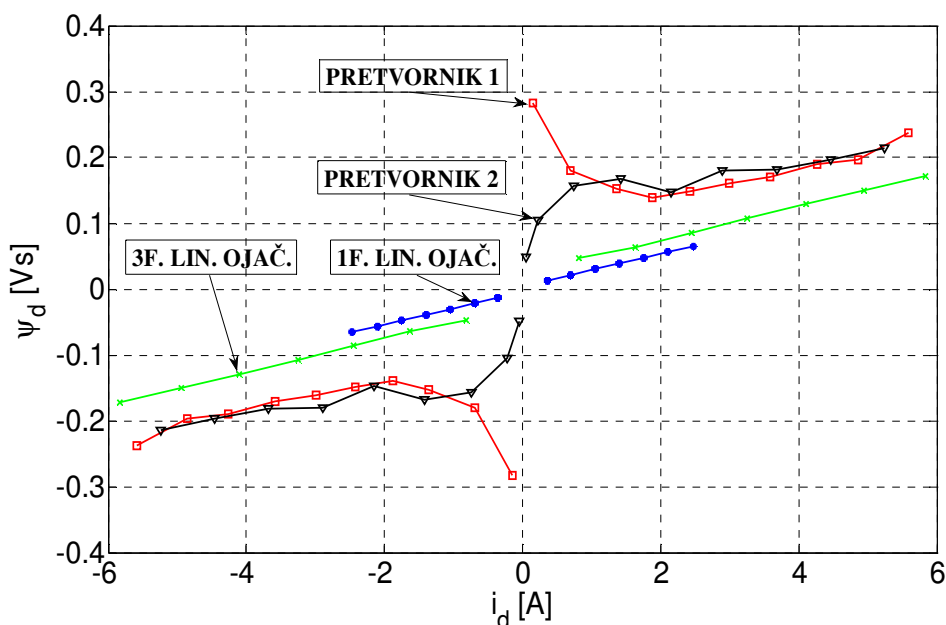
Pri tem je $\psi(0)$ preostali oziroma remanentni magnetni pretok, u in i sta izmerjena napetost in tokovni odziv, R pa je ohmska upornost statorskega navitja.

Razlika med obravnavanima metodama je v obliki napajalne napetosti. V prvem primeru je stroj bil napajen s sinusno obliko napetosti spremenljive amplitude (1V do 7V) in nizke konstantne frekvence (1,428 Hz). Nizka frekvenca napajalne napetosti je uporabljena zaradi zmanjševanja vpliva vrtnčnih tokov, ki bi se lahko pojavili v vodnikih statorskega navitja zaradi visoke frekvence. Ohmsko upornost statorskega navitja, ki zelo vpliva na natančnost

metode in se spreminja predvsem zaradi segrevanja statorskega navitja, ne moremo direktno računati in jo izmerimo ali jo vzamemo iz drugih meritev. Druga metoda temelji na pravokotni obliki napajalne napetosti spremenljive amplitude (1V do 7V) in iz istih razlogov kot v prvi metodi, konstantne nizke frekvence (1,428 Hz). Magnetni sklep računamo kot pri prvi metodi, z numerično integracijo (4), pri čem sta uporabljeni izmerjeni vrednosti napetosti in toka. Ohmsko upornost statorskega navitja računamo iz izmerjenih vrednosti toka in napetosti v ustaljenem stanju na koncu vsakega intervala po spremembi napajalne napetosti. Preden se zgodi naslednja sprememba mora tok doseči stacionarno stanje.

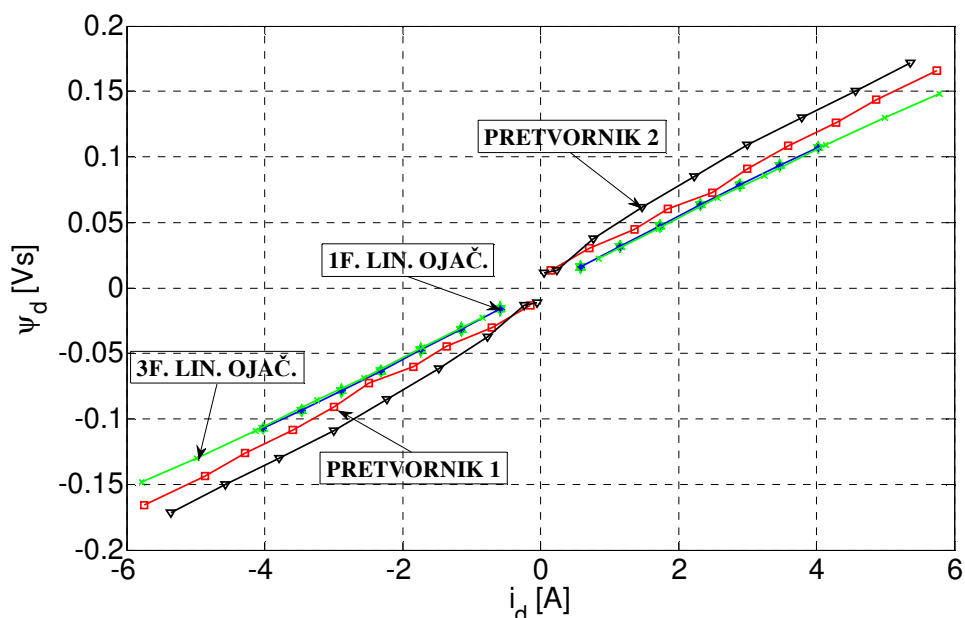
4.3 Rezultati določitve parametrov

Rezultati so podani v obliki $\psi(i)$ karakteristik. Ker imamo opravka s sinhronskim strojem, ki ima na površino nameščene trajne magnete pri čem sta induktivnosti v obeh oseh približno enaki, je podana primerjava dobljenih $\psi(i)$ karakteristik samo za d -os. Slika 5 prikazuje primerjavo $\psi(i)$ karakteristik dobljenih za primer, ko stroj napajamo s sinusno obliko napajalne napetosti za različne načine napajanja statorskega navitja SSTM. Iz rezultatov lahko ugotovimo, da se dobljene krivulje magnetnih sklepov najbolj ujemajo, ko je stroj napajan s pomočjo linearnih ojačevalnikov. Odstopanja se pojavljajo predvsem zaradi napačno določene ohmske upornosti statorskega navitja. Ugotovimo lahko, da so pri napajanju stroja s pretvornikom predvsem v območju manjših tokov, odstopanja večja. Vzrok za to je mogoče najti v nelinearnosti pretvornika.



Slika 5: $\psi_d(i_d)$ karakteristike za d -os v primeru različnih načinov napajanja SSTM s sinusno obliko napajalne napetosti

Slika 6 prikazuje primerjavo $\psi(i)$ karakteristik za različne načine napajanja statorskega navitja s pravokotno obliko napajalne napetosti. Vidno je, da se v tem primeru rezultati veliko bolj ujemajo kot v prejšnjem primeru, ko smo stroj napajali s sinusno obliko napetosti.



Slika 6: $\psi_d(i_d)$ karakteristike za d -os v primeru različnih načinov napajanj SSTM s pravokotno obliko napajalne napetosti

Iz rezultatov lahko ugotovimo, da najboljše rezultate dobimo v primeru, ko statorsko navitje SSTM napajamo z kontroliranim virom napetosti v obliki enega ali treh linearnih ojačevalnikov in s pravokotno obliko napajalne napetosti. To pa je predvsem zaradi tega, ker v tem primeru lahko sproti računamo ohmsko upornost statorskega navitja in ni vpliva nelinearnosti vira napetosti kot je to pri uporabi pretvornika (predvsem industrijskih pretvornikov za večje tokove).

5. SKLEP

Delo obravnava energetske visokoučinkovita puhal, ki so gnana s sinhronskim strojem s trajnimi magneti. Obravnavan in prikazan je način vodenja z mehanskim senzorjem in brez senzorja položaja rotorja. Slednjega v nekaterih aplikacijah ne moremo uporabiti predvsem zaradi neprimernih okoliščin kot so vibracije, vlažni prostor ipd. Da bi lahko pravilno hitrostno vodili stroj, moramo poznati njegove parametre. Do parametrov lahko pridemo na več načinov. V tem delu je prikazano nekaj načinov določitve nelinearnih parametrov SSTM. Obravnavana sta dva različna načina napajanja statorskega navitja, enofazno z enim enofaznim linearnim ojačevalnikom in trifazno s pomočjo treh vodenih enofaznih linearnih ojačevalnikov in s pomočjo dveh različnih pretvornikov. Podani sta dve metodi računanja

parametrov, ki temeljita na numerični integraciji izmerjenih napetosti in tokovnih odzivov sinusne in pravokotne oblike. Parametri stroja so podani v obliki $\psi(i)$ karakteristik.

6. LITERATURA

- [1] Brushless Programme – katalog od Domela
- [2] Solutions Energy Saving Technology – EMERSON Industrial Automation, Fans & Blowers – Variable Frequency Drive Application
- [3] H. N. Hickok, Adjustable Speed – A Tool for Saving Energy Losses in Pumps, Fans, Blowers and Compressors, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL IA-21, No. 1, pp 124-136, January/February 1985.
- [4] V. Groza, V. Giurgiu, C. D. Pitis, J. S. Thongam, Energy Saving Techniques in Ventilation Processes with Fans Operating at Variable Load, IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009.
- [5] S. S. Cuffe, P. W. Hammond, A Variable Frequency AC Blower Drive Installation for Efficient and Accurate Control of Glass Tempering, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL IA-21, No. 4, pp 1047-1052, July/August 1985.
- [6] J. Ipser, The Application of Adjustable-Frequency Controllers to Forced-Draft Fans for Improved Reliability and Energy Saving, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL 24, No. 4, pp 628-634, July/August 1988.
- [7] N. Hatti, K. Hasegawa, H. Akagi, A 6.6-kV Transformerless Motor Drive Using a Five-Level Diode-Clamped PWM Inverter for Energy Saving of Pumps and Blowers, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008.
- [8] G. Štumberger, B. Štumberger, D. Dolinar, Identification of linear synchronous reluctance motor parameters, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 40, No. 5, pp. 1317-1324, September./October 2004.
- [9] Ž. Plantić, Gorazd Štumberger, Primerjava eksperimentalnih metod za določanje parametrov trifaznega sinhronskega stroja s trajnimi magneti, ERK-Elektrotehniška in računalniška konferenca, Slovenija, Portorož, 2010.

NASLOV AVTORJEV

Željko Plantić¹, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Gorazd Štumberger^{1,2}

¹TECES, Pobreška cesta 20, SI-2000 Maribor, Slovenija, e-mail: zeljko.plantic@teces.si
Tel: + 386 2 333 13 62 Fax: + 386 2 333 13 51

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, SI-2000 Maribor, Slovenija, e-mail: gorazd.stumberger@uni-mb.si