

Štirikvadrantni pogonski sistem za TFM motorje moči 50 kW

Miran Rodič*, Jože Korelič*, Franci Lahajnar♦, Uroš Rupar♦, Ciril Močnik♦
*Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ul. 17, SI-2000 Maribor
♦Kolektor Group d.o.o.
Vojkova ulica 10, SI-5280 Idrija
miran.rodic@uni-mb.si, joze.korelic@uni-mb.si, Franci.Lahajnar@kolektor.com,
uros.rupar@kolektor.com, ciril.mocnik@kolektor.com

50 kW four-quadrant TFM drive system

A 50kW inverter system for four-quadrant transverse flux machine (TFM) was developed in the frame of CC-SURE project. The system enables bidirectional energy flow between power grid and electric machine, as well as power factor correction.

In the frame of hardware design a three-phase switching inverter, which uses IGBTs as switches, was developed. It can be used either as an active three-phase rectifier or an inverter for electric motors. Driver circuits are integrated with the IGBT module. Implementation with galvanic isolated triggering was chosen. Air and water cooling are possible.

The software is executed on 32 bit microcontroller with digital signal processor core, without floating point unit (FPU). The basis is event-oriented control system, which is implemented using microcontroller interrupt logic. Not only the real-time algorithms, but also protective functions are implemented as interrupt routines.

Kratek pregled prispevka

V okviru projekta KC-SURE je bil razvit štirikvadrantni pretvornik za pogonski sistem električnih motorjev s prečnim fluksom (TFM). Sistem omogoča dvosmerni pretok energije med omrežjem in električnim motorjem in korekcijo faktorja moči.

V okviru strojne opreme je bil izdelan trifazni stikalni pretvornik, ki kot stikala uporablja IGBT tranzistorje. Uporabljen je lahko kot aktivni trifazni usmernik ali kot razsmernik za napajanje izmeničnih motorjev. Prožilna stopnja je integrirana z IGBT modulom. Izbrana je bila izvedba galvansko ločenega proženja. Možna je izvedba z vodnim ali zračnim hlajenjem.

Programska oprema se izvaja na 32 bitnem mikrokontrolerju z jedrom digitalnega signalnega procesorja, vendar brez enote za računanje s plavajočo vejico (FPU). Osnova je dogodkovno orientiran sistem vodenja, ki je izveden z uporabo prekinitvene logike mikrokontrolerja. Kot prekinitvene rutine niso izdelani samo programi za delovanje v realnem času, ampak tudi velik del zaščitnih funkcij.

1 Uvod

Električni motorji sodijo med najpomembnejše porabnike električne energije, ki pa s stališča prevzemanja energije iz električnega omrežja ne delujejo najbolj optimalno. Težave nastanejo predvsem zaradi faktorja moči, ki je različen od 1. Tok iz omrežja tako ni več sinusne oblike, temveč se v njem pojavijo višjeharmonske komponente, kar vpliva na kvaliteto električne napetosti omrežja. Posledično prenos električne moči ni več optimalen, pojavljajo se tudi motnje, ki negativno vplivajo na delovanje drugih naprav. Težave so še toliko večje, če gre za električne motorje večjih moči.

Da bi se temu izognili, namesto klasičnega diodnega usmernika v sodobnih elektromotornih pogonih uporabljamo usmernike s korekcijo faktorja moči (PFC) [1], [2], [3], [4], [5]. Na ta način zagotovimo, da ima fazni tok (ali vsi trije fazni toki, če gre za trifazni vir) obliko fazne napetosti in se elektromotorni sistem glede na električno omrežje obnaša kot navadno uporovno breme, torej prevzema iz njega praktično samo delovno energijo. V idealnem primeru, ki ga distributerji znajo zelo ceniti, je mogoče faktor moči tudi nastavljanje, glede na potrebe omrežja, in tako kompenzirati vplive jalove energije ostalih bremen.

Dodatno se v industriji pogosto pojavi potreba po štirikvadrantnem delovanju, kar pomeni da mora biti omogočeno tudi vračanje energije v omrežje. To ni koristno samo s stališča energije omrežja, temveč pomeni tudi, da odvečno energijo na pogonu prenesemo v omrežje in je ni treba porabiti v sistemu samem, npr. z uporabo zaviralnih uporov. S tem se zmanjšajo potrebe po hlajenju sistema.

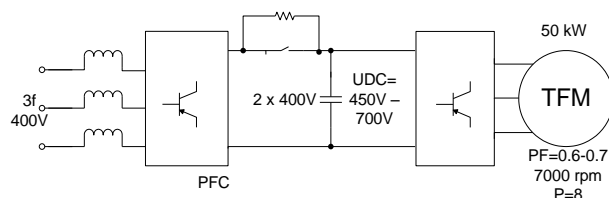
Električni motorji, še posebno izmenični, tudi sicer za svoje kvalitetno delovanje potrebujejo vodenje, s katerim zagotavljamo ne samo sledenje želenim veličinam (hitrost, navor, ...), temveč tudi optimalno delovanje s stališča porabe energije in manjšanja disipativnih izgub, ki povzročajo segrevanje motorja ter s tem krajšanje njegove življenjske dobe. Osnovni principi vodenja so opisani v delih [6], [7], [8].

V nadaljevanju opisani pretvorniški sistem nudi uporabniku vse navedene možnosti, štirikvadrantno delovanje z nastavljivim faktorjem moči ter možnostjo vračanja energije v omrežje.

V okviru projekta je bil tako na podlagi izdelane študije in zasnove sistema, podprte s simulacijskimi rezultati, skonstruiran in izdelan funkcionalni model sistema trifaznega štirikvadrantnega stikalnega pretvornika s korekcijo faktorja moči (PFC) in pretvornika za vodenje izmeničnih motorjev (sinhronskih motorjev s trajnimi magneti, PMSM). Sistem je namenjen napajanju in vodenju trifaznih električnih motorjev moči do 50 kW. Sestavljata ga dva trifazna stikalna pretvornika, ki sta med seboj povezana preko enosmerne zbiralke. Izdelane so bile osnovne komponente funkcionalnega modela, strojna in programska oprema.

2 Opis sistema

Pretvorniški sistem kaže blokovna shema (Slika 1). Na sliki so podane tudi nekatere karakteristike sistema.



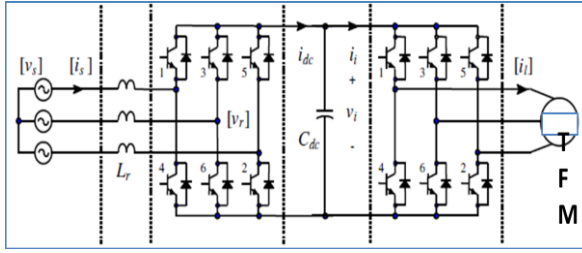
Slika 1: Pretvorniški sistem

Sestavljata ga dva trifazna pretvornika s po šestimi polprevodniškimi stikali (Slika 2), kar je klasična struktura trifaznih pretvornikov. Pretvornika sta med seboj povezana preko enosmerne zbiralke, na kateri je za zmanjšanje valovitosti napetosti uporabljen kondenzatorski blok (na sliki ponazorjen s C_{dc}). Vklonno/izklopni releji niso prikazani.

Pretvornik je na omrežje povezan preko reaktorskih dušilk, električni motor pa je lahko priključen neposredno. Omrežje je ponazorjeno s tremi napetostnimi viri, vidimo lahko, da je sistem priključen na medfazno napetost.

V nadaljevanju bosta prikazana principa vodenja aktivnega usmernika (PFC) in

električnega motorja (sinhronski motor s trajnimi magneti, PMSM).



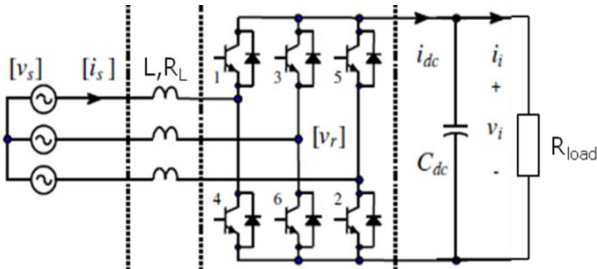
Slika 2: Elektronsko vezje pretvornikov

3 Modeliranje in vodenje PFC

Princip vodenja bo podan na podlagi nadomestne sheme (Slika 3), kjer bo namesto dejanskega bremena (pretvornik električnega motorja s priključenim PMSM) uporabljen kar upor R_{load} , ki bo ponazarjal obremenitev.

3.1 Model PFC

Model je izdelan za primer simetričnega vezja (dušilke in stikalni elementi so enaki), delujočega v linearnem območju (izven zasičenj) [9], [10].



Slika 3: Model PFC

Zapišemo ga z enačbo:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - R_L \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{f1} \\ u_{f2} \\ u_{f3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{U_{dc}}{R_{load}}$$

kjer je L induktivnost dušilke (reaktorja), C_{dc} kapacitivnost kondenzatorskega bloka na enosmerni zbiralki, R_L upornost navitja dušilke (reaktorja), R_{load} upornost bremena, U_{dc} napetost na enosmerni zbiralki in i_{dc} tok v enosmerno zbiralko. i_1, i_2, i_3 so fazni toki (toki skozi dušilke), u_1, u_2, u_3 fazne napetosti (omrežne napetosti), u_{f1}, u_{f2}, u_{f3} pa modulacijske napetosti.

3.2 Vodenje PFC

Načrtovani algoritem uporablja vektorsko vodenje toka v orientaciji napetosti omrežja ter nadrejeno regulacijo napetosti na izhodu (enosmerni zbiralki pretvornika). Vodenje omogoča štirikvadrantno robustno delovanje v relativno širokem področju parametrov, obenem pa je dovolj enostavno za preprosto in zanesljivo izvedbo na predvideni mikrokrmilniški platformi.

Pretvorbo v koordinate napetostnega vira (v našem primeru omrežja) izvedemo z uporabo znanih Parkove in Clarkine transformacije. Transformacijski kot Θ izračunamo z uporabo:

$$\Theta = \text{atan} 2(u_b, u_a). \quad (2)$$

kjer napetosti v u_a in u_b dobimo z uporabo (3) in (4):

$$u_a = u_1, \quad (3)$$

$$u_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_3 - u_2), \quad (4)$$

Napetost v koordinatah vira izračunamo z:

$$u_d = u_a \cos(\Theta) + u_b \sin(\Theta), \quad (5)$$

$$u_q = -u_a \sin(\Theta) + u_b \cos(\Theta). \quad (6)$$

Tudi tok skozi navitja je za potrebe algoritma vodenja zapisan v koordinatah napetosti vira (omrežja):

$$i_d = i_a \cos(\Theta) + i_b \sin(\Theta), \quad (7)$$

$$i_q = -i_a \sin(\Theta) + i_b \cos(\Theta). \quad (8)$$

kjer i_a in i_b dobimo z uporabo (9) in (10):

$$i_a = i_1, \quad (9)$$

$$i_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_3 - i_2), \quad (10)$$

Model je zapisan kot:

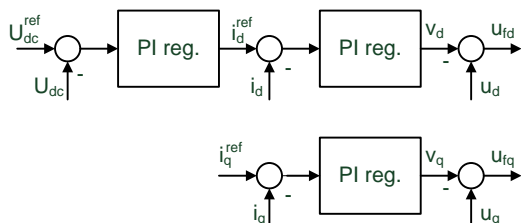
$$L \frac{di_d}{dt} = u_d - R_L i_d + \omega L i_q - u_{fd}$$

$$L \frac{di_q}{dt} = u_q - R_L i_q - \omega L i_d - u_{fq} \quad (11)$$

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{load} = (i_d S_d + i_q S_q) - \frac{U_{dc}}{R_{load}}$$

kjer sta i_d in i_q fazna toka v koordinatah napajalne napetosti, u_d in u_q fazni napetosti v koordinatah napajalne napetosti, u_{rd} in u_{rq} modulatorski napetosti v koordinatah napajalne napetosti ter ω kotna frekvenca omrežne napetosti. S_d in S_q predstavljata faktorja odprtja v koordinatah napajalne napetosti.

Vodenje je izvedeno z zunanjo napetostno in notranjo tokovno regulacijsko zanko, ločeno po koordinatah (vzdolžni – d in prečni – q). Če želimo doseči sofaznost omrežne napetosti in toka, moramo komponento q postaviti na ničelno vrednost, vzdolžno komponento toka (d) pa določamo z regulatorjem napetosti enosmerne zbiralke (U_{dc}). Uporabimo PI regulatorje, ki kljub svoji preprosti strukturi in izvedbi zadostijo predpisanim zahtevam. Algoritem vodenja zaradi enostavnosti podamo v grafični obliki (Slika 4). Izhod je modulatorski signal, ki ustreza modulatorski napetosti.



Slika 4: Algoritem vodenja PFC

Z uporabo algoritma vodenja dobljeno modulatorsko napetost v koordinatah napetostnega vira pretvorimo v modulatorsko napetost v fiksnih koordinatah z uporabo enačb:

$$u_{fa} = u_{fd} \cos(\Theta) - u_{fq} \sin(\Theta), \quad (12)$$

$$u_{fb} = u_{fd} \sin(\Theta) + u_{fq} \cos(\Theta). \quad (13)$$

Fazne modulatorske napetosti dobimo z uporabo enačb (14) - (16):

$$u_{f1} = u_{fa} \quad (14)$$

$$u_{f2} = -\frac{1}{2}u_{fa} - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{fb} \quad (15)$$

$$u_{f3} = -\frac{1}{2}u_{fa} + \frac{\sqrt{3}}{2}u_{fb} \quad (16)$$

4 Modeliranje in vodenje PMSM

Tudi vodenje PMSM je izvedeno vektorsko, po podobnem principu kot vodenje PFC, le da

uporablja drug koordinatni sistem – koordinatni sistem rotorskega polja.

4.1 Model PMSM

Za model je uporabljen klasični model sinhronskega motorja [6], [7], [8], ki omogoča predstavitev in simulacije sinhronskih motorjev s površinskimi in potopljenimi magneti. Model motorja je podan in izveden v koordinatah rotorskega polja:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p\omega_r L_q \\ p\omega_r L_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + p\omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_e \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\psi_e i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}), \quad (18)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L, \quad (19)$$

$$\frac{d\Theta_r}{dt} = \omega_r, \quad (20)$$

$$\Theta_e = p\Theta_r, \quad (21)$$

kjer sta u_{sd} in u_{sq} napetosti na sponkah statorja v koordinatah rotorskega polja ter i_{sd} in i_{sq} toka skozi statorsko navitje v koordinatah rotorskega polja. ψ_e predstavlja magnetni pretok rotorja, R_s upornost statorskega navitja, L_d lastna induktivnost statorskega navitja v d-osi (vzdolžni) in L_q lastna induktivnost statorskega navitja v q-osi (prečni), p število polovih parov, ω_r hitrost vrtenja rotorja, J vztrajnostni moment motorja, T_e proizvedeni navor motorja, T_L navor obremenitve motorja, Θ_e transformacijski kot (orientacija polja) ter Θ_r kot zasuka rotorja.

Poudariti je potrebno, da v primeru uporabe sinhronskega motorja s površinskimi magneti velja:

$$L_d = L_q = L_s. \quad (22)$$

4.2 Vodenje SPMSM

Vodenje je izvedeno po klasičnem in uveljavljenem postopku, ki ga v literaturi imenujejo vektorsko vodenje (pogosto je uporabljena kratica FOC).

Z uporabo Parkove in Clarkine transformacije pretvorimo model in dobimo zapis v koordinatah statorja. Transformacijski kot Θ_e v našem primeru izmerimo (na gredi rotorja), lahko pa ga tudi dobimo iz observerja ali estimatorja.

Tok v statorskih koordinatah dobimo z uporabo (23) in (24):

$$i_{sa} = i_{s1}, \quad (23)$$

$$i_{sb} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{s3} - i_{s2}), \quad (24)$$

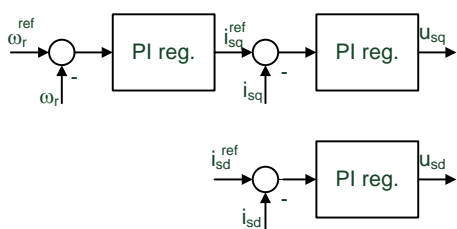
kjer so i_{s1} , i_{s2} in i_{s3} fazni toki skozi statorsko navitje.

Tok v koordinatah rotorskega polja izračunamo z:

$$i_{sd} = i_{sa} \cos(\Theta_e) + i_{sb} \sin(\Theta_e), \quad (25)$$

$$i_{sq} = -i_{sa} \sin(\Theta_e) + i_{sb} \cos(\Theta_e). \quad (26)$$

Vodenje je izvedeno z zunanjo hitrostno in notranjo tokovno regulacijsko zanko, prikazano ločeno po koordinatah (vzdolžni – d in prečni – q). Če želimo doseči maksimalni navor ob minimalnem toku, moramo vzdolžno komponento d postaviti na ničelno vrednost, prečno komponento toka (q) pa določamo z regulatorjem hitrosti vrtenja rotorja. Spet uporabimo PI regulatorje, ki tako kot v primeru vodenja PFC zadostijo predpisanim zahtevam. Algoritem vodenja zaradi enostavnosti podamo v grafični obliki (Slika 5). Izhod je napetost na sponkah statorja PMSM.



Slika 5: Algoritem vodenja PMSM

Iz napetosti v koordinatah rotorskega polja dobimo napetost v fiksnih koordinatah statorja z uporabo enačb:

$$u_{sa} = u_{sd} \cos(\Theta_e) - u_{sq} \sin(\Theta_e), \quad (27)$$

$$u_{sb} = u_{sd} \sin(\Theta_e) + u_{sq} \cos(\Theta_e). \quad (28)$$

Fazne napetosti pa dobimo z uporabo enačb:

$$u_{s1} = u_{sa} \quad (29)$$

$$u_{s2} = -\frac{1}{2}u_{sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{sb} \quad (30)$$

$$u_{s3} = -\frac{1}{2}u_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}u_{sb} \quad (31)$$

Dejansko gre preprosto povedano za razklopitev vodenja po navoru in magnetnem pretoku, kar izvedemo preko ustreznih transformacij toka, ki ga preslikamo v koordinatni sistem rotorskega polja. Preko komponente d (vzdolžne) tako krmilimo magnetenje toka, preko prečne komponente (q) pa navor.

V primeru višje dinamike sistema motorja je potrebno izvesti še dodatno razklopitev med magnetilno in navorno komponento statorskega toka. Na ta način postane vodenje posameznih vej popolnoma neodvisno.

5 Strojna in programska oprema

Strojna oprema sistema je sestavljena iz dveh glavnih komponent: sistema močnostne elektronike in električnega motorja.

5.1 Pretvorniški sistem

Pretvorniški sistem predstavljata dva trifazna stikalna pretvornika, ki kot stikala uporabljata IGBT tranzistorje. Stikalni pretvornik je tako uporabljen kot aktivni trifazni usmernik ali kot razsmernik za napajanje izmeničnih motorjev.

Prožilna stopnja je integrirana z IGBT modulom. Ker je prostor med priključki modula zelo omejen, je bilo potrebno zelo skrbno načrtovanje tako prožilne stopnje, kot tudi napajanja in razporeditve elementov. Izbrana je bila izvedba galvansko ločenega proženja, ki zagotavlja mnoge zaščitne funkcije in optimalno izvedbo proženja tranzistorjev. Tiskano vezje je v štiri slojni izvedbi, s čimer je bila omogočena optimalna izvedba prožilne stopnje.

Na prožilno stopnjo je predvideno vgraditi modul merilnika faznih napetosti in napetosti enosmerne zbiralke ter modul DC/DC pretvornika navzgor, ki omogoča prilagoditev potrebne napetosti za prožilno stopnjo razpoložljivi vhodni napetosti. Izvedena je tudi

galvanska ločitev merilnika napetosti.

Za meritev faznih tokov je bila izbrana izvedba treh senzorjev s Halovo sondo. Na modulu je izvedena prilagoditev napajanja, prilagoditev merilnega območja in prilagoditev napetostnemu območju A/D pretvornika.

Dodatni IGBT modul z diodo omogoča regulacijo toka dodatne zavore. Tiskano vezje zavore vsebuje vse potrebne komponente za to izvedbo. Modul vsebuje galvansko ločeno prožilno stopnjo, galvansko ločeno napajanje in merilnik toka.

Tiskano vezje enosmerne zbiralke je optimizirano tako, da so povezave med obema IGBT moduloma čim krajše, istočasno pa morajo imeti ustrezno velik presek, da zadostijo zahtevi po tokovni obremenitvi. Dodatno zmanjšanje dimenzij in povezav je bilo doseženo s sendvič izvedbo oziroma vzporedno vezavo dveh modulov. Da imajo povezave in priključki dovolj velik presek je bila izbrana izvedba dvoslojnega tiskanega vezja z debelino 105 μ m.

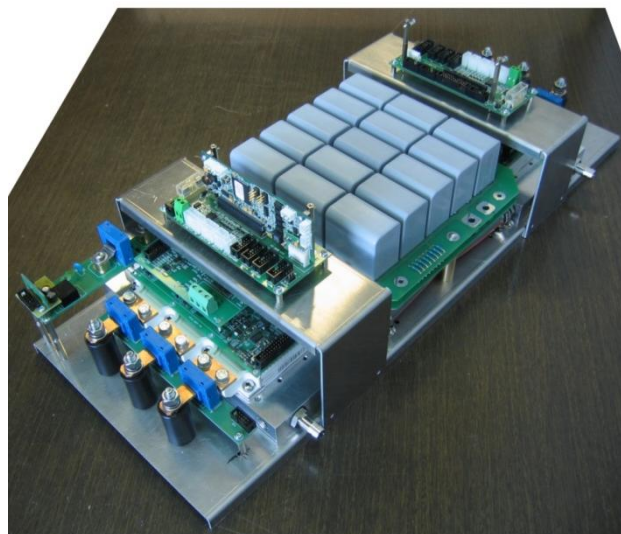
Za povezavo vseh naštetih modulov z mikrokrmilnikom skrbi povezovalni modul s konektorji in za signale potrebnimi prilagoditvenimi vezji. Opremljen je s konektorji za povezavo vseh notranjih modulov: proženja, merilnika napetosti, merilnika toka, zavnega modula, zunanjih senzorjev položaja, preko zaščitnih vhodnih vezij za digitalne vhode, tokovnih ojačevalnikov za digitalne izhode, priklopa napajalnika za elektroniko, komunikacijo z nadrejenim računalnikom in s konektorjem za priklop mikrokrmilnika.

Hlajenje močnih modulov je izvedeno s hladilnikom za vodno hlajenje, ki je bil za ta projekt posebej načrtovan. Izvedba ohišja omogoča enostaven in hiter dostop do vseh delov pretvornika, kar je pomembno za izvajanje meritev in testiranja.

Sestavljen pretvorniški sklop kaže Slika 6.

Slika 7 kaže osnovno ploščo z mikrokrmilnikom. Osnovo modula predstavlja 32b mikrokrmilnik proizvajalca Freescale, MPC5604P, z jedrom digitalnega signalnega

procesorja, vendar brez enote za računanje s plavajočo vejico (FPU).



Slika 6: Sestavljen pretvorniški sklop



Slika 7: Osnovna plošča z mikrokrmilnikom

5.2 Električni motor - PMSM

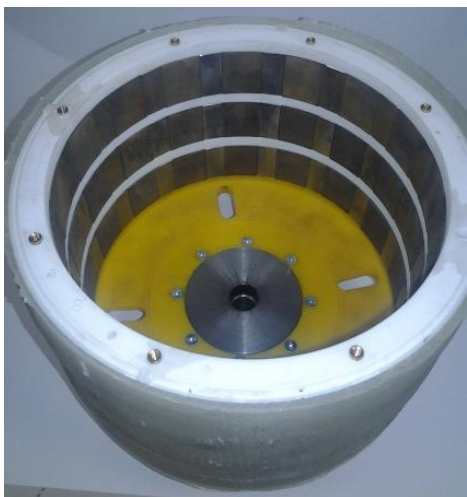
Kot elektromotor je predviden sinhronski motor s trajnimi magneti (kažeta ga Slika 8 in Slika 9), ki zaradi boljše izkoriščenosti magnetnega materiala uporablja koncentradorje polov.



Slika 8: Stator PMSM

Motor ima zunanji rotor in nazivni navor 70 Nm pri hitrosti vrtenja rotorja 7000 rpm. Izdelan

je za napetost 400V. Zaradi visoke vrtilne hitrosti je število polovih parov majhno, dodatno značilnost motorja pa predstavljajo nizke izgube v navitju ter znižane vrtilne izgube.



Slika 9: Rotor PMSM

5.3 Programska oprema

Programska oprema se izvaja na ciljnem mikrokrmilniškem sistemu. Osnova programske opreme je dogodkovno orientiran sistem vodenja, ki je izveden z uporabo prekinitvene logike mikrokrmilnika. Kot prekinitvene rutine niso izdelani samo programi za delovanje v realnem času, ampak tudi velik del zaščit, kot so npr. pretokovne in prenapetostne zaščite in napake delovanja stikal pretvornika. Izdelana programska oprema omogoča preizkušanje strojne opreme, vodenje usmernika s korekcijo faktorja moči in vodenje izmeničnega motorja. Načrtovana je na podlagi avtomata stanj, kar omogoča izboljšano preglednost in s tem zanesljivejše delovanje. Dodatno je s tem poenostavljeno iskanje napak. Izdelan je tudi pripadajoč uporabniški vmesnik, ki omogoča preizkušanje sistema.

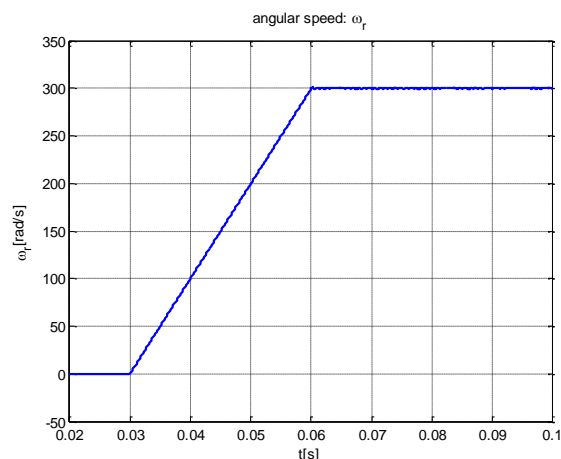
Poseben poudarek v programski opremi je na zaščitnih funkcijah, ki predstavljajo pomemben del kode. Izvedene so znotraj programa za izvajanje v realnem času in kot dogodkovno krmiljeni programski moduli (prekinitvene rutine). V okviru dogodkovno krmiljenih modulov se nekatere zaščitne funkcije ujemajo s tistimi iz programa v realnem času, kar omogoča višjo stopnjo varnosti delovanja.

6 Rezultati

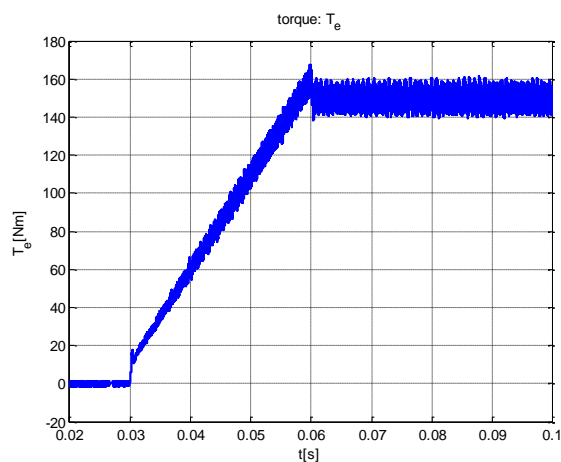
Prikazani rezultati so pridobljeni z uporabo simulacij v orodju Matlab/Simulink, ker nam uporabniški vmesnik realnega sistema ne omogoča sočasnih prikazov takega števila spremenljivk v takšni časovni bazi.

Prikazano je vodenje sistema v primeru zagona iz mirovanja do hitrosti vrtenja 300 rad/s, po rampi, katere strmina določa zagonski navor in tok. Odziv hitrosti podaja Slika 10, navor pa Slika 11.

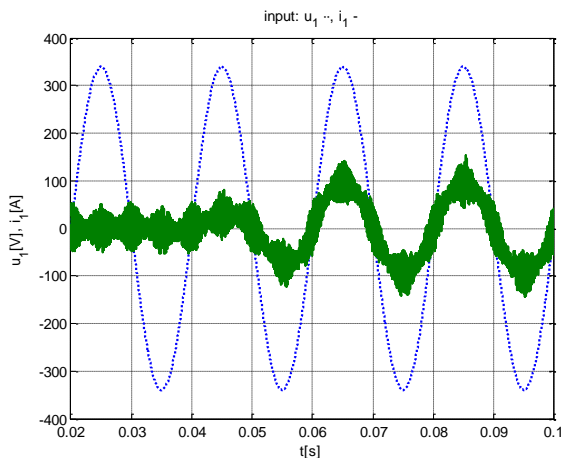
Slika 12 podaja fazni tok in napetost v prvi fazi, vidimo lahko, da sta veličini sofazni. Sočasno lahko opazujemo tudi potek napetosti na enosmerni zbiralki (Slika 13), kjer na začetku zaznamo prenehaj, pozneje pa je sledenje natančno.



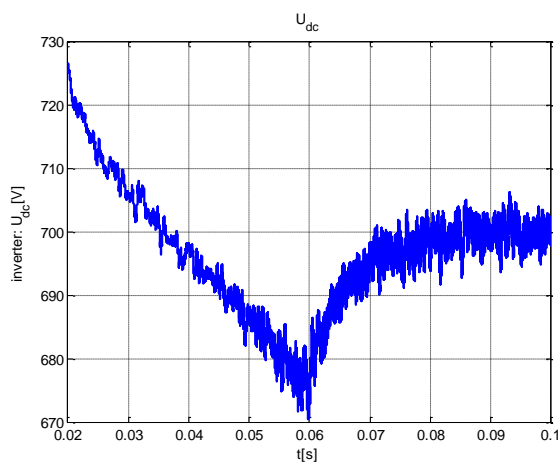
Slika 10: Kotna hitrost motorja



Slika 11: Navor motorja



Slika 12: Fazni toki in napetosti PFC – faza 1



Slika 13: Napetost enosmerne zbiralke

7 Zaključek

Predstavljen 50kW, 400V pretvorniški sistem daje možnost kompenzacije jalove moči, ter izboljšanja THD vhodnega toka in napetosti. Omogočeno je zračno ali vodno hlajenje. Uporabljen je 50 kW motor na osnovi TFM tehnologije. Sistem je uporaben v električnih vozilih, industrijskih aplikacijah ter za preizkuševališča pogonov visokih moči, kar omogoča možnost aktivnega zaviranja in vračanje energije v omrežje.

Štirikvadrantno delovanje, torej dvosmerni pretok energije, delovanje v generatorskem in motorskem režimu, sinusna oblika toka in napetosti z nizko vsebino višjih harmonikov omogočajo vključevanje sistema v aktivna omrežja prihodnosti (smart grids). Dodatno je omogočeno vplivanje na proizvodnjo in porabo jalove energije.

8 Zahvala

Delo na projektu poteka v okviru aktivnosti kompetenčnega centra KC-SURE »Napredni sistemi učinkovite rabe električne energije« (<http://www.sure.si>). Projekt delno financira Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo, v okviru Evropskih skladov za regionalni razvoj EU.

9 Literatura

- [1] O.B. Teck, J.W. Dixon, A.B. Kulkarni, M. Nishimoto, An Integrated AC Drive System Using a Controlled-Current PWM Rectifier/Inverter Link, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 3, No. 1, January 1988.
- [2] M. Milanovič, Močnostna elektronika, učbenik, Maribor : Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2010 ([Maribor] : UNI Založba).
- [3] K. Jezernik, VSS control of unity power factor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Apr 1999, Volume: 46, Issue: 2, str. 325 – 332.
- [4] J.R.Rodriguez, J.W. Dixon, J.R. Espinoza, J. Pontt, P. Lezana, PWM regenerative rectifiers: state of the art, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 52, Issue: 1, 2005, str. 5 – 22.
- [5] S. Basu, T.M.Undeland, PFC Strategies in light of EN 61000-3-2, Published in EPE PEMC 2004 Conference, Riga, Latvia, 1-3 September 2004.
- [6] Vanja Ambrožič, Sodobne regulacije pogonov z izmeničnimi stroji, učbenik, Ljubljana : Fakulteta za elektrotehniko, 1996.
- [7] D. Dolinar, G. Štumberger, Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov, učbenik, Maribor : Založniška dejavnost FERI, 2006 ([Maribor] : Tiskarna tehniških fakultet).
- [8] W. Leonhard, Control of Electrical Drives, 3rd Edition, Springer Verlag, 2001.
- [9] Chung-Chuan Hou, Hsinchu Po-Tai Cheng, Experimental verification of the active front-end converters dynamic model and control designs, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Feb. 2009, str. 370 – 375.
- [10] R.P. Burgos, E.P. Wiechmann, J. Holtz, Complex state-space modeling and nonlinear control of active front-end converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 52, April 2005, Issue: 2, str. 363 – 377.