

Visokozmogljiv brezsenzorski pogon s sinhronskim strojem s trajnimi magneti

Matej Toman, Drago Dolinar, Gorazd Štumberger
Univerza v Mariboru
Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor
matej.toman@uni-mb.si

High performance sensorless drive with permanent magnet synchronous motor

Abstract: Permanent magnet synchronous motors are commonly used in high performance servo applications. To achieve high performance servo operation, exact position of the motor rotor must be known. It can be obtained from the position sensor, which operation can be limited in aggressive environments. Therefore, this article proposes calculation of the rotor position by a nonlinear state observer.

1 Uvod

Sinhronske stroje s trajnimi magneti (SSTM) srečujemo tudi v avtomatiziranih industrijskih pogonih. Prisotni so predvsem v tistih aplikacijah kjer je zahtevana velika natančnost vodenja položaja. Natančnost vodenja položaja med drugim zagotavlja tudi princip vektorskega vodenja stroja. Za uspešno izvedbo vektorskega vodenja pa je potrebno v vsakem trenutku poznati položaj rotorja stroja, oziroma položaj vektorja magnetnega sklepa trajnega magneta. To informacijo lahko zagotovi senzor položaja, ki je nameščen na rotorju stroja. Vendar uporaba sensorja položaja poveča ceno in velikost stroja. Poleg tega sensorji položaja postanejo nezanesljivi ob prisotnosti vibracij in vlage. Zaradi teh razlogov njihova uporaba v vseh aplikacijah ni mogoča. Zato je smiselno razmišljati o zamenjavi sensorja položaja z matematičnim algoritmom, s katerim položaj rotorja ni več merjena, temveč računana veličina. Takšno vodenje stroja brez sensorja položaja se imenuje brezsenzorsko vodenje.

Brezsenzorsko vodenje SSTM postaja vse bolj zanimivo, kar kažejo dela [1] do [3].

Pri brezsenzorskem vodenju je položaj rotorja izračunan z uporabo nelinearnega opazovalnika spremenljivk stanja. Ta je določen na osnovi dvoosnega modela SSTM. Vhodi v opazovalnik spremenljivk stanja so merjeni statorski toki, napetosti na sponkah stroja ter navor bremena. Ker napetosti na sponkah stroja zaradi pulzno-širinske modulacije niso enostavno merljive, se kot vhodi v opazovalnik uporabita referenčni napetosti. Referenčni napetosti pa se lahko bistveno razlikujeta od napetosti na sponkah stroja zaradi nelinearnosti napetostnega pretvornika.

V tem delu je ovrednoten vpliv uporabe referenčnih napetosti v opazovalniku na delovanje brezsenzorskega vodenja SSTM. V ta namen je najprej podan model nelinearnega opazovalnika spremenljivk stanja, ki je nato vključen v sistem vodenja. V nadaljevanju so na osnovi systemske matrike pogreškov opazovalnika in metode lege korenov določeni koeficienti omenjenega opazovalnika. Pravilna izbira koeficientov opazovalnika je ključnega pomena pri zagotavljanju stabilnosti sistema, saj lahko ob nepravilno izbranih koeficientih opazovalnika sistem vodenja postane nestabilen. S podanim eksperimentalnim sistemom sta bila opravljena dva testa. V prvem testu sta v opazovalniku uporabljeni napetosti, ki sta manjši od referenčnih napetosti, v drugem testu pa sta enaki. Za oba testa je podana primerjava med z opazovalnikom izračunanimi in merjenimi spremenljivkami stanja v obliki pogreškov opazovalnika.

2 Model nelinearnega opazovalnika spremenljivk stanja

Bistveni del brezsenzorskega vodenja je nelinearni opazovalnik spremenljivk stanja, ki temelji na dvoosnem modelu SSTM. Dvoosni model nelinearnega opazovalnika spremenljivk stanja je podan z napetostno enačbo (1), enačbo gibanja (2) in enačbo položaja (3). Povzet je po [4], kjer je tudi izpeljan.

$$\begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}_d \\ \hat{\dot{i}}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & p\hat{\omega}\frac{L_q}{L_d} \\ -p\hat{\omega}\frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} - p\hat{\omega}\frac{\psi_m}{L_q} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{dd} & k_{dq} \\ k_{qd} & k_{qq} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} \hat{i}_d & \hat{i}_q \end{bmatrix} p \frac{\psi_m}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + p \frac{L_d - L_q}{J} \begin{bmatrix} \hat{i}_d & \hat{i}_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}_d \\ \hat{\dot{i}}_q \end{bmatrix} - \frac{f}{J} \hat{\omega} - \frac{T_c}{J} - \frac{t_l}{J} + \begin{bmatrix} k_{od} \\ k_{oq} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

$$\hat{\theta} = p\hat{\omega} \quad (3)$$

Pri tem R označuje ohmsko upornost, p število polovih parov, ω mehansko kotno hitrost rotorja, θ električni kot zasuka rotorja, ψ_m gostoto magnetnega sklepa trajnega magneta, f, T_c, t_l in J pa označujejo koeficient viskozne trenja, Coulombovo trenje, navor bremena in vztrajnostni moment. $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, u_d, u_q, L_d$ in L_q označujejo toka, napetosti in induktivnosti zapisane v dvoosnem $d-q$ koordinatnem sistemu. Os d je definirana s smerjo največje magnetne prevodnosti in je poravnana s smerjo vektorja magnetnega sklepa trajnega magneta, medtem, ko je os q definirana s smerjo najmanjše magnetne

prevodnosti. \tilde{i}_d, \tilde{i}_q so označene spremenljivke stanja, ki so izračunane z opazovalnikom, medtem, ko so $\tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{i}_c$ označeni statorski toki trifaznega sistema, transformirani v dvoosni koordinatni sistem z enačbo (4).

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{i}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{T}^{-1} je transformacijska matrika, podana z zapisom (5). Ničelna komponenta toka je enaka nič, zato je iz zapisov (1) in (2) izpuščena.

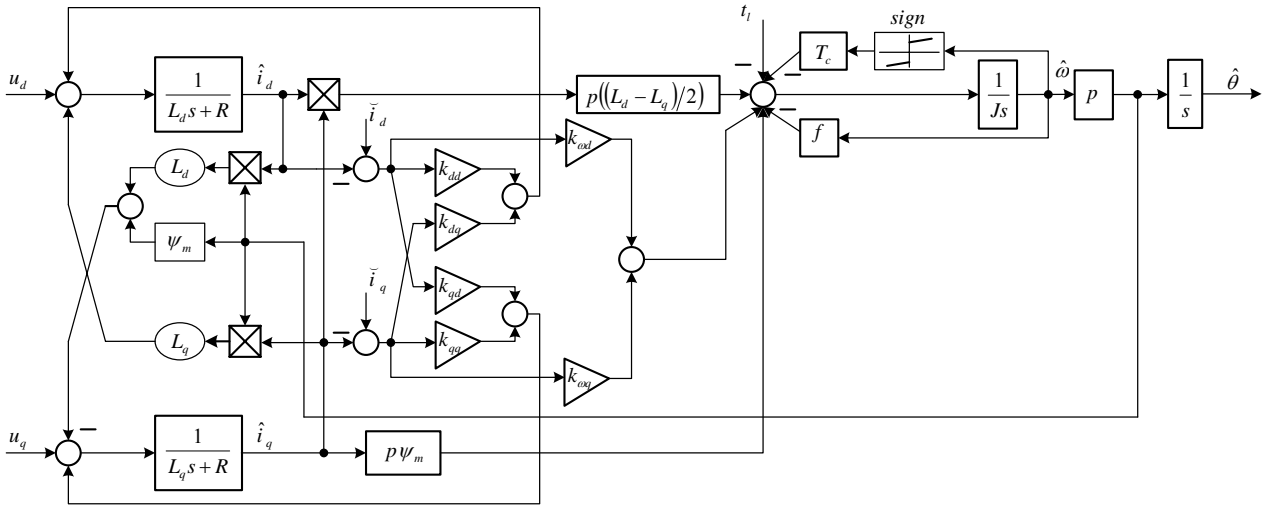
$$\mathbf{T}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \cos\left(\hat{\theta} + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\hat{\theta}) & -\sin\left(\hat{\theta} + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$k_{dd}, k_{dq}, k_{qd}, k_{qq}$ in k_{od} ter k_{oq} v (1) in (2) so koeficienti električnega in mehanskega podsistema opazovalnika. Izbira koeficientov opazovalnika vpliva na hitrost konvergence spremenljivk stanja k pravih vrednostim. To pomeni, da nepravilna izbira koeficientov vodi do nestabilnosti opazovalnika in s tem k nestabilnemu delovanju celotnega sistema vodenja. Določitev koeficientov opazovalnika je predstavljeno v naslednjem poglavju.

Model opazovalnika je v obliki blokovne sheme podan na sliki 1. Vhodi v model so merjeni statorski toki zapisani v dvoosnem koordinatnem sistemu \tilde{i}_d in \tilde{i}_q , napetosti u_d in u_q ter navor bremena.

3 Koeficienti opazovalnika

Koeficienti opazovalnika so pomnoženi z razliko tokov $\tilde{i}_d - \hat{i}_d$ in $\tilde{i}_q - \hat{i}_q$, ki jo ustrezno ojačajo. V kolikor je ojačanje preveliko, postane opazovalnik nestabilen, zato je izbira koeficientov opazovalnika ključna pri



Slika 1: Blokovna shema modela nelinearnega opazovalnika spremenljivk stanja

zagotavljanju njegove stabilnosti.

Uporabljen opazovalnik je nelinearen, zato je določitev koeficientov opazovalnika in analiza stabilnosti zelo zahtevna. Določitev postane še zahtevnejša, ko je opazovalnik vključen v zaprtozančno vodenje skupaj z nelinearnim napetostnim pretvornikom. V splošnem velja, da bo opazovalnik stabilen takrat, ko bo pogrešek med izračunanimi in merjenimi spremenljivkami stanja težil proti nič. Zato namesto analize stabilnosti opazovalnika kot takega raje analiziramo stabilnost pogreška opazovalnika. Pogrešek opazovalnika je določen z enačbo (6). Pri tem sta e_{id} in e_{iq} pogreška tokov v oseh d in q , e_ω in e_θ pa sta pogreška hitrosti in položaja. Pogrešek podaja razliko med z opazovalnikom izračunano in merjeno vrednostjo spremenljivke stanja.

$$\begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \\ e_\omega \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_d - i_d \\ \hat{i}_q - i_q \\ \hat{\omega} - \omega \\ \hat{\theta} - \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Model pogreškov opazovalnika zapisan z enačbo (7) je skupaj s členi sistemske matrike pogreškov opazovalnika (enačba (8)) povzet po [4]. Z' je označena linearizacija okoli delovne točke, kar pomeni, da enačba velja le za male

spremembe v okolici stacionarnih vrednosti kotne hitrosti ω , tokov I_d in I_q , ter napetosti U_d in U_q .

$$\begin{bmatrix} \dot{e}'_{id} \\ \dot{e}'_{iq} \\ \dot{e}'_\omega \\ \dot{e}'_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_{id} \\ e'_{iq} \\ e'_\omega \\ e'_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_{11} = -\frac{R}{L_d} - k_{dd}, A_{21} = -p\omega \frac{L_d}{L_q} - k_{dq}$$

$$A_{31} = p \frac{L_d - L_q}{J} I_q - p \frac{\psi_m}{J} k_{od}, A_{12} = p\omega \frac{L_q}{L_d} - k_{dq}$$

$$A_{22} = -\frac{R}{L_q} - k_{qq}, A_{32} = p \frac{L_d - L_q}{J} I_d + p \frac{\psi_m}{J} (1 - k_{oq})$$

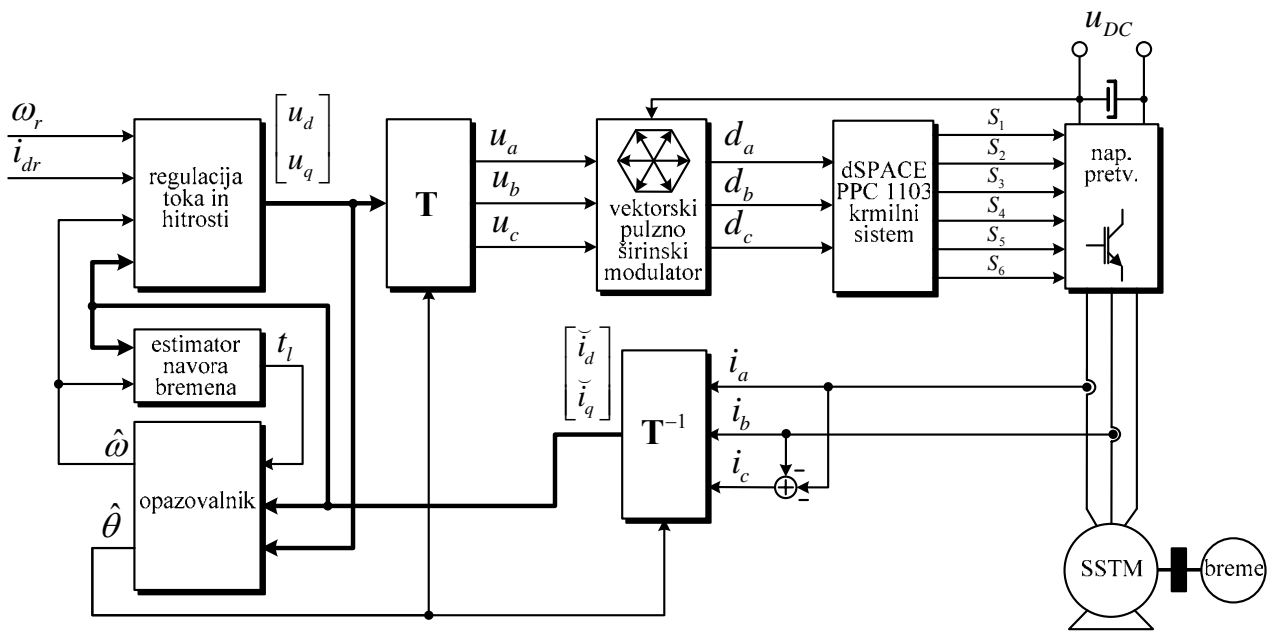
$$A_{13} = p \frac{L_q}{L_d} I_q, A_{23} = -p \frac{L_d}{L_q} I_d - p \frac{\psi_m}{L_q}$$

$$A_{33} = -\frac{f}{J}, A_{14} = p \left(k_{dd} I_q - k_{dq} I_d + \frac{1}{L_d} U_q \right)$$

$$A_{24} = p \left(k_{qd} I_q - k_{qq} I_d + \frac{1}{L_q} U_d \right)$$

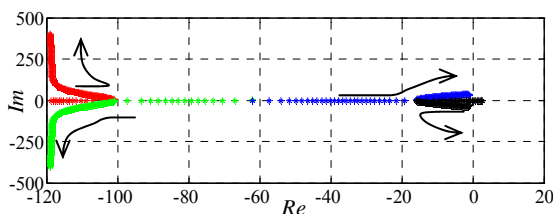
$$A_{34} = p^2 \frac{\psi_m}{J} (k_{od} I_q - k_{oq} I_d)$$

(8)

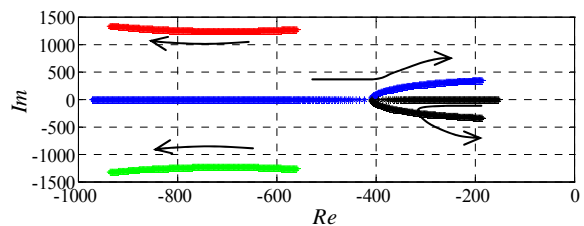


Slika 4: Shematska predstavitev hitrostnega vodenja SSTM z opazovalnikom spremenljivk stanja

Na sliki 2 je prikazana lega polov lineariziranega pogreška opazovalnika za stacionarne hitrosti od 0 do 200 rad/s za primer, ko je vrednost vseh koeficientov opazovalnika enaka nič. Pri tem je s puščicami ponazorjen potek lege polov električnega in mehanskega podsistema pri naraščanju hitrosti. Poli električnega podsistema so pomaknjeni levo od imaginarne osi, medtem ko so poli mehanskega podsistema zelo blizu imaginarne osi. Kot je razvidno s slike postane opazovalnik nestabilen v področju malih hitrosti, ko se pol mehanskega podsistema približa desni polravnini. Za izbrane koeficiene opazovalnika



Slika 2: Lega polov za $\omega = 0 \text{ rad/s}$ do $\omega = 200 \text{ rad/s}$ pri $k_{dd} = k_{dq} = k_{qd} = k_{qq} = 0$ in $k_{od} = k_{oq} = 0$



Slika 3: Lega polov za $\omega = 0 \text{ rad/s}$ do $\omega = 200 \text{ rad/s}$ pri $k_{dd} = 1000, k_{dq} = -100, k_{qd} = -100, k_{qq} = 1000, k_{od} = 785$ in $k_{oq} = -600$

(9) je na sliki 3 podan potek lege polov za stacionarne hitrosti od 0 do 200 rad/s.

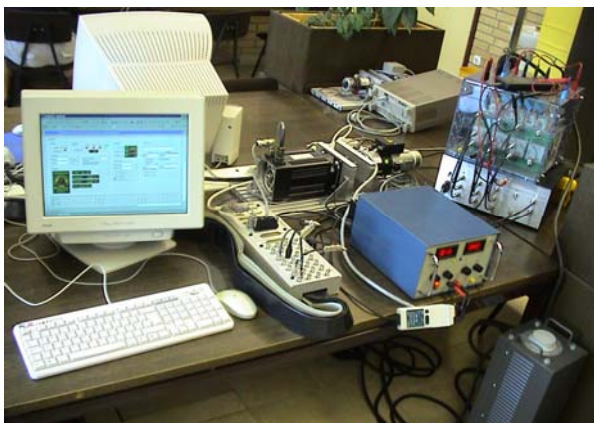
$$\begin{aligned} k_{dd} &= 1000, k_{dq} = -100, \\ k_{qd} &= -100, k_{qq} = 1000, \\ k_{od} &= 785, k_{oq} = -600 \end{aligned} \quad (9)$$

S slike 3 je razvidno, da se poli električnega podsistema pomikajo v levo, medtem, ko se poli mehanskega podsistema pomikajo k imaginarni osi. Od tod sledi, da je za izbrane koeficiente v območju spreminjanja hitrosti od 0 do 200 rad/s opazovalnik stabilen.

4 Sistem brezsenzorskega vodenja SSTM

Vključitev opazovalnika v sistem vektorskega vodenja je prikazan na sliki 4. Kot je razvidno s slike je navor bremena ocenjen z estimatorjem navora bremena, ki je povzet po [5]. V opazovalniku uporabljeni napetosti u_d in u_q nista merjeni napetosti na sponkah stroja, temveč referenčni napetosti na izhodu iz regulatorjev toka in hitrosti. Na sliki je z ω_r označena referenčna hitrost, z i_{dr} pa je označen referenčni tok v osi d , ki je med testoma enak 0. Transformacijski matriki \mathbf{T}^{-1} in \mathbf{T} poskrbita za ustrezno transformacijo tokov in napetosti v dvofazni in trifazni koordinatni sistem, vektorska pulzno-širinska modulacija pa za ustrezno pretvorbo referenčnih napetosti u_a, u_b in u_c v prevajalna razmerja d_a, d_b in d_c . Na podlagi prevajalnih razmerij dSPACE PPC 1103 krmilni sistem proži tranzistorje napetostnega pretvornika.

Eksperimentalni sistem s katerim sta bila opravljena testa brezsenzorskega vodenja je podan na sliki 5. Elementi eksperimentalnega



Slika 5: Eksperimentalni sistem

sistema so: SSTM s senzorjem položaja, enosmerni stroj - breme, vir enosmerne napetosti, trifazni napetostni pretvornik, merilna veriga za meritev tokov, dSPACE PPC1103 krmilni sistem z vhodno izhodnimi enotami ter osebni računalnik z razvojnim orodjem. Na napetostnem pretvorniku je med testoma napetost enosmerne vodila znašala

$u_{DC} = 200 V$, čas vzorčenja dSPACE krmilnega sistema pa $200 \mu s$.

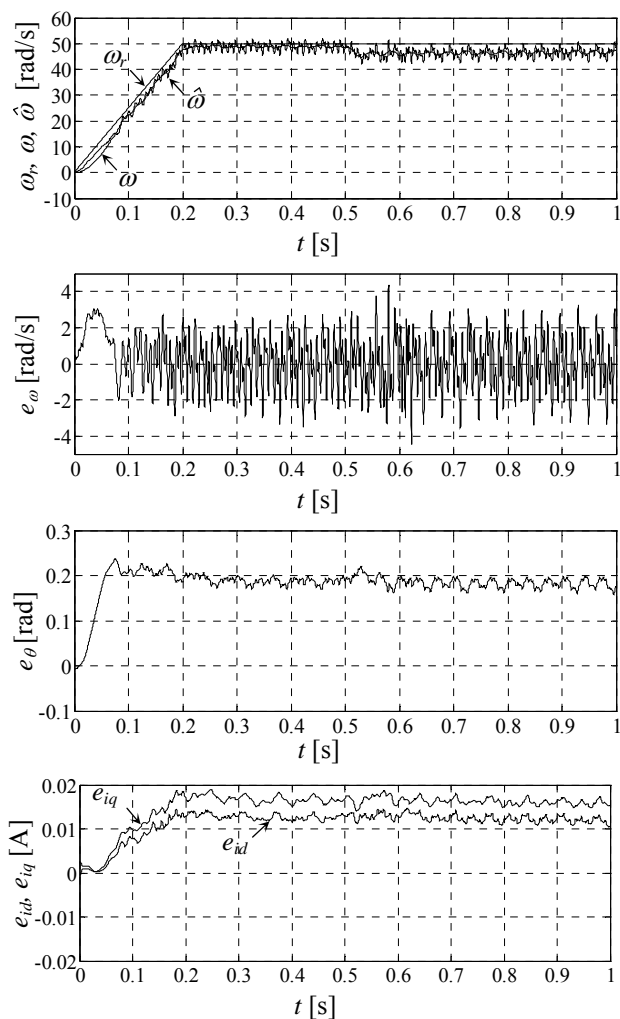
5 Rezultati

Z eksperimentalnim sistemom sta bila opravljena dva testa. V prvem testu je stroj pospešen do hitrosti $\omega = 50 \text{ rad/s}$ v času $t = 0,2 s$ ter obremenjen z navorom bremena $t_l = 0,5 Nm$ v času $t = 0,5 s$. Nazivni navor uporabljenega stroja znaša $t_N = 2,13 Nm$. Pri tem testu sta v opazovalniku uporabljeni napetosti, ki sta zmanjšani na $\sqrt{2/3}$ referenčne napetosti. Vhodni napetosti v opazovalnik se zato bistveno razlikujeta od tistih, ki so prisotne na sponkah stroja. Na sliki 6 so podani poteki referenčne hitrosti, hitrosti stroja in hitrosti izračunane z opazovalnikom spremenljivk stanja. Podani so tudi poteki pogreškov opazovalnika $e_\omega, e_\theta, e_{id}$ in e_{iq} .

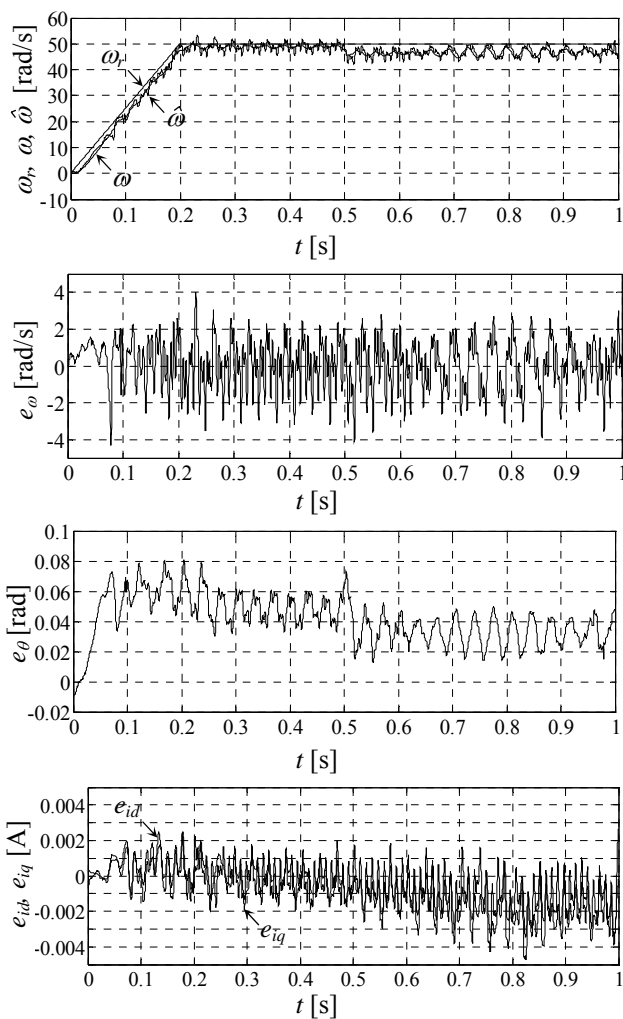
V drugem testu je stroj prav tako pospešen do hitrosti $\omega = 50 \text{ rad/s}$ v času $t = 0,2 s$ ter obremenjen z enakim navorom bremena kot v prvem testu. Razlika je v napetostih uporabljenih v opazovalniku, ki so tokrat enake referenčnim napetostim. Na sliki 7 so za ta primer podani poteki istih spremenljivk kot na sliki 6.

6 Sklep

V tem delu je ovrednoten vpliv v opazovalniku uporabljenih napetosti na njegovo delovanje. V ta namen sta bila izvedena dva testa. V prvem testu sta uporabljeni napetosti ki sta manjši, v drugem pa napetosti, ki sta enaki referenčnim napetostim. Za oba testa je podana primerjava med z opazovalnikom izračunanimi in merjenimi spremenljivkami stanja. Iz podanih rezultatov je razvidno da so pogreški opazovalnika večji v primeru, ko so v opazovalniku uporabljene napetosti, ki niso enake referenčnim napetostim. Ti pogreški so manjši a ne v celoti odpravljeni, ko v opazovalniku nastopajo referenčne napetosti,



Slika 6: Odziv opazovalnika pri uporabi napetosti, ki je manjša od referenčne napetosti



Slika 7: Odziv opazovalnika pri uporabi referenčne napetosti

saj se tudi referenčne napetosti razlikujejo od napetosti na sponkah stroja. Razlika nastopi zaradi mrtvih časov in padcev napetosti napetostnega pretvornika, ki pa nimajo bistvenega vpliva na stabilnost opazovalnika, saj opazovalnik ostane stabilen tudi v primeru večjih razlik med napetostimi. Vplivajo pa na pogrešek opazovalnika, saj bi se ta bistveno zmanjšal, če bi bile v opazovalniku namesto referenčnih napetosti uporabljene dejanske napetosti na sponkah stroja.

7 Literatura

[1] K. Tatematsu, D. Hamada, K. Uchida, S. Wakao, T. Onuki, New approaches with sensorless drives, *IEEE*

Ind. Appl. Magazine, Julij/Avg. 2000, vol. 6, no 4, str. 44-50.

- [2] G. Zhu, A. Kaddouri, A nonlinear state observer for the sensorless control of a permanent-magnet AC machine, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Dec. 2001, vol. 48, no 6, str. 1098-1108.
- [3] J. Jang, J. Ha, M. Ohto, K. Ide, S. Sul, Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Nov./Dec. 2004, vol. 40, no. 6, str. 1595-1604.
- [4] M. Toman, D. Dolinar, G. Štumberger, Brezsenzorsko vodenje sinhronskega stroja s trajnimi magneti, *Elektroteh. vestn.*, 2004, vol. 71, no. 5, str. 277-282.
- [5] D. Dolinar, G. Štumberger, Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov, *FERI*, Maribor, 2002.