

ELIMINACIJA PODRŽANIH OSCILACIJA U FREKVENTNO REGULISANOM POGONU ASINHRONOG MOTORA

Veran Vasić, Miodrag Zubrić, Radiša Jevremović, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*
 Slobodan Vukosavić, Vladan Vučković, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - Asinhroni motori se često koriste za pogon pumpi, ventilatora i sl. u otvorenoj povratnoj sprezi po brzini. U takvim pogonima pri brzinama manjim od 50% nozivne brzine postoji mogućnost nastanka podržanih oscilacija. Surozivanje podržanih oscilacija je najčešće nedopustivo zbog prirode same radne mašine koju pogoni asinhroni motor, tako da se često preduzima eliminacija podržanih oscilacija brzine. Zahtev koji se postavlja pri eliminaciji podržanih oscilacija jeste jednostavnost rešenja po mogućnosti bez uvođenja dodatnog hardvera, kako bi se zadržala jednostavnost pogona. Senzor struje jednosmernog međukola je često sastavni deo kola zaštite. U ovom radu se predlaže originalno rešenje za eliminaciju podržanih oscilacija zatvaranjem povratne sprege po struji jednosmernog međukola.

U V O D

U ranije objavljenim radovima od strane autora [1,2] razmatran je oscilatorni način rada asinhronog motora. Pokazano je kako linearizovani matematički model pogona može poslužiti za predviđanje oblasti nestabilnosti. U ovom radu navode se neka rešenja za suzbijanje podržanih oscilacija datih u referentnoj literaturi kao i jedno originalno rešenje iznetog problema.

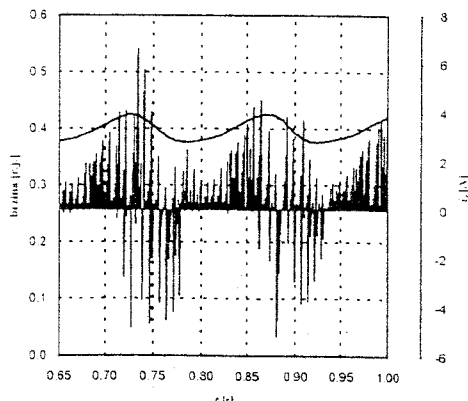
Rešenje problema podržanih oscilacija asinhronog motora, koji se napaja iz simetričnog sinusnog izvora napona, izneto je u radu [3]. Promenom parametara motora odnosno njihovom boljom "usklađenšću" moguće je eliminisati oscilacije brzine. Ovim predlogom rešenja ne mogu se eliminisati oscilacije već napravljenog pogona. Navedeno rešenje može poslužiti konstruktorima mašina. Slično rešenje problema se predlaže u [4,5] za slučaj asinhronog motora napajanog iz šestopulsnog naponskog invertora. Promenom parametara pogona da bi se eliminisale podržane oscilacije pogoršavaju se statičke karakteristike mašine.

Asinhroni motor napajan iz PWM invertora za iste parametre pogona poseduje manju oblast nestabilnosti u odnosu na napajanje iz šestopulsnog invertora [3]. U [6,7] predlaže se kolo za korekciju upravljačkih PWM signala da bi se izbegao oscilatorni režim rada asinhronog motora. Kolo za korekciju pomoću foto senzora detektuje trenutak promene znaka napona na priključcima motora u odnosu na trenutak promene upravljačkog signala tranzistora i određuje nos vremena za koliko je potrebno korigovati trenutak komutacije tranzistora u narednoj komutacionoj periodi. Detektuje se smer struje i na osnovu znaka struje vrši se korigovanje reference napona za iznos usrednjenog napona sled mrtvog vremena tokom komutacione periode [7]. Potreba za dodatnim hardverom predstavlja nedostatak predloženih rešenja.

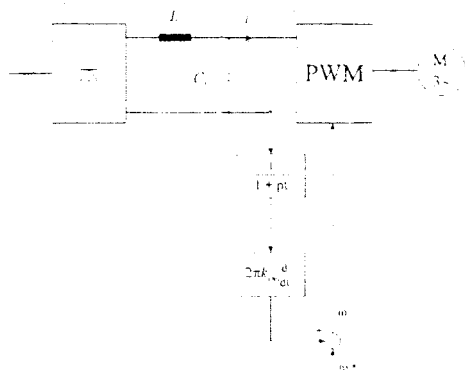
Istovremena kompenzacija izobličenja napona usled mrtvog vremena i pada napona na prekidačkim komponentama predložena je u [8,9]. Kompenzacija izobličenja napona realizuje se u realnom vremenu i postavljaju se znatni zahtevi za hardverom pri realizaciji samog rešenja. Kompenzacija je orijentisana prema PWM sa prostornim vektorom. Za metode koje upravljачke signale generišu prema PWM algoritmu koristi se modifikacija širine upravljačkih signala za eliminaciju izobličenja napona usled mrtvog vremena.

U ovom radu predlaže se modifikovanje učestanosti reference napona za eliminaciju podržanih oscilacija. Informacija o struji jednosmernog međukola raspoloživa je i koristi se u zaštitne svrhe. Referentna učestanost napona modifikuje se pomoću povratne sprege po struji jednosmernog međukola. Na Sl. 1, pokazano je da struja jednosmernog međukola i_d prati oblik brzine pri pojavi podržanih oscilacija brzine u pogonu. Propuštajući struju i_d kroz filter, dobija se signal koji odgovara brzini i koji se može iskoristiti za modifikaciju referentne učestanosti napona.

Pokazano je da uvođenje povratne sprege stabilizuje posmatrani pogon. Sve sopstvene vrednosti pogona nalaze se u levoj poluravni kompleksne ravni. Simuliran je vremenski odziv pogona sa uvedenom povratnom spregom. Predložena regulaciona struktura za eliminaciju podržanih oscilacija prikazana je na Sl. 2. Struja i_d se dovodi na filter čija je vremenska konstanta $\tau = 30$ ms da bi se eliminisali njeni harmonici, nakon toga se dovodi na diferencijator. Stacionarno stanje neće biti promenjeno uvođenjem povratne sprege po izvodu struje i_d .



Sl. 1. Vremenska zavisnost struje i_d i brzine pri pojavi podržanih oscilacija



Sl. 2. Regulatorna struktura za eliminaciju podržanih oscilacija

2. MATEMATIČKI MODEL POGONA SA UVAŽENOM POVRTATNOM SPERGOM PO STRUJI JEDNOSMERNOG MEĐUKOLA

U ovom delu biće izveden linearizovani matematički model pogona sa zatvorenom povratnom spregom po struji jednosmernog međukola. Biće pokazano da se sa uvođenjem povratne sprege svi polovi nalaze u levoj poluravni kompleksne ravni.

Da bi se dobio matematički model pogona sa povratnom spregom neophodno je uvažiti novo uvedeni povratni spregu. Povratna sprega se zatvara sa izvedom statora invertora, tako da je:

$$f_1 = f_1^* + k_{D\omega} \frac{di_1}{dt}$$

gde je:

$$k_{D\omega} \text{ -diferencijalno pojačanje,}$$

$$f_1^* (f_1^*) \text{ -učestanost (referentna učestanost)}$$

napona

Ako se izvrši linearizacija jednačine (1) i uvaži model [1,2] dobija se:

$$\Delta\omega_1 = 2\pi k_{D\omega} \frac{d\Delta i_1}{dt}$$

$$\Delta\omega_1 = 2\pi k_{D\omega} \frac{-3m_a}{4} \frac{1}{L_s} \left(\frac{d\Delta\psi_{\psi q}}{dt} - k_s \frac{d\Delta\psi_{\psi d}}{dt} \right)$$

U radovima [1,2] detaljno je izveden linearizovani matematički model pogona bez povratne sprege. Jednačina stanja za male poremećaje fluksa statora i rotora $\Delta\psi_d, \Delta\psi_q$ glase:

$$\frac{d\Delta\psi_q}{dt} = q_{11}\Delta u_q + q_{12}\Delta\psi_d + q_{13}\Delta\psi_q + q_{14}\Delta\psi_D + q_{15}\Delta\psi_Q + q_{16}\Delta\omega - \psi_{d0}\Delta\omega_1;$$

$$\frac{d\Delta\psi_D}{dt} = q_{21}\Delta u_q + q_{22}\Delta\psi_d + q_{23}\Delta\psi_q + q_{24}\Delta\psi_D + q_{25}\Delta\psi_Q + q_{26}\Delta\omega - \psi_{D0}\Delta\omega_1. \quad (4)$$

Gde su sa koeficijentima q_i označene veličine koje uvažavaju parametre pogona. Veličine sa indeksom 0 označavaju stacionarne vrednosti u okolini koje je izvršena linearizacija

Kada se (4) uvrsti u (3) dobija se $\Delta\omega$, kao linearna kombinacija promenljivih stanja.

$$\Delta\omega_1 = k_{D\omega}'' \left[p_{11}\Delta u_q + p_{12}\Delta\psi_d + p_{13}\Delta\psi_q + p_{14}\Delta\psi_D + p_{15}\Delta\psi_Q + p_{16}\Delta\omega \right]. \quad (5)$$

gde su

$$k_{D\omega}'' = \frac{k_{D\omega}'}{1 + k_{D\omega}'(\psi_{d0} - k_r \psi_{D0})}; k_{D\omega}' = -\frac{3m_a}{2L_s} \pi k_{D\omega};$$

$$p_{1i} = q_{1i} - k_r q_{2i}; \quad \text{za } i=1,2,3,4,5,6.$$

m_a -indeks amplitudske modulacije;

L_s -tranzijentna induktivnost statora;

k_r -koeficijent sprege namotaja rotora.

Jednačine stanja bez uvažavanja povratne sprege glase:

$$\frac{d\Delta y}{dt} = A\Delta y + \Delta\omega_1 b_2 + \Delta u + \Delta m_m b_1; \quad (6)$$

gde su

$$\Delta y^T = \left[\Delta u_q \quad \Delta\psi_d \quad \Delta\psi_q \quad \Delta\psi_D \quad \Delta\psi_Q \quad \Delta\omega \right];$$

$$b_2^T = \left[0 \quad \psi_{q0} \quad -\psi_{d0} \quad \psi_{Q0} \quad -\psi_{D0} \quad 0 \right];$$

$$\Delta u^T = \left[\Delta u_d \quad \Delta u_q \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right];$$

$$b_1 = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{p}{J} \right];$$

Uvođenjem povratne sprege modifikuje se matrica sistema, usled proizvoda $\Delta\omega b_2$. Matrica modifikacije usled povratne sprege po struji jednosmernog međukola za slučaj diskontinualnog moda ispravljačke sekcije glasi:

$$A_{D_{ov}}^{DISC} = \Delta\omega_1 b_2 = k_{D_{ov}}'' \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -P_{11}\psi'_{j0} & -P_{12}\psi'_{j0} & -P_{13}\psi'_{j0} & -P_{14}\psi'_{j0} & -P_{15}\psi'_{j0} & -P_{16}\psi'_{j0} \\ P_{11}\psi'_{j0} & P_{12}\psi'_{j0} & P_{13}\psi'_{j0} & P_{14}\psi'_{j0} & P_{15}\psi'_{j0} & P_{16}\psi'_{j0} \\ -P_{11}\psi'_{j20} & -P_{12}\psi'_{j20} & -P_{13}\psi'_{j20} & -P_{14}\psi'_{j20} & -P_{15}\psi'_{j20} & -P_{16}\psi'_{j20} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Matrica sistema pogona sa zatvorenim povratnom spregom po struji i_1 dobija se sabiranjem matrice (7) i odgovarajuće matrice sistema sa otvorenim povratnom spregom [2]. Izvođenja u ovom poglavlju su data uz pretpostavku da je struja filtra (i_1) diskontinualna. Za kontinualni režim matrica $A_{D_{ov}}^{CONST}$ je 7x7 i sadrži $A_{D_{ov}}^{DISC}$ kao submatricu a prva vrsta i prva kolona sadrže nule.

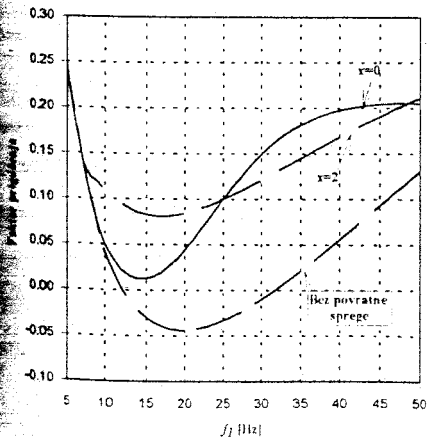
1. PRIKAZ REZULTATA SIMULACIJA

U ovom delu prikazani su rezultati dobijeni pomoću linearnog matematičkog modela pogona kao i simulacije vremenskog odziva potpunog matematičkog modela.

Na Sl. 3. prikazan je faktor prigušenja sa i bez uvažene povratne sprege. Bez povratne sprege faktor prigušenja postaje negativan za opseg učestanosti od 15-30 Hz. Uvođeći povratnu spregu faktor prigušenja postaje pozitivan. Da bi se smanjio uticaj povratne sprege, na odziv pogona, za oblast učestanosti gde je pogon stabilan i bez povratne sprege, posmatran je i slučaj kada je pojačanje u povratnoj sprezi promenljivo sa referentnom učestanošću, zakon promene pojačanja sa referentnom učestanošću glasi:

$$k_{D_{ov}} = k_{D_{ov}} \left(\frac{25}{f_1} \right)^x \quad ; \quad x = 0 \text{ ili } 2 \quad (8)$$

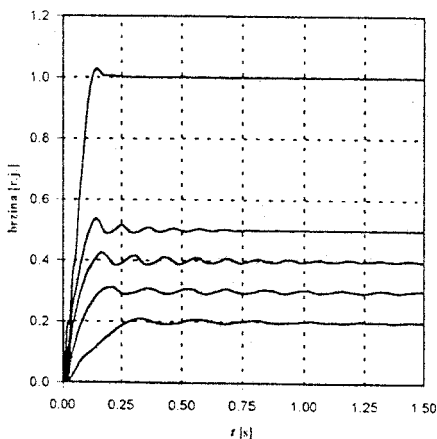
$$k_{D_{ov}} = -0,02$$



Sl. 3. Faktor prigušenja za različite vrednosti x

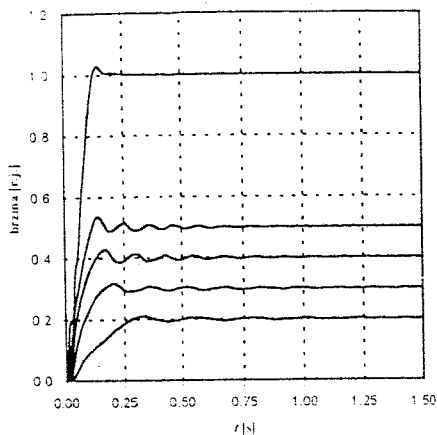
Simulacija vremenskog odziva pogona prikazana je na Sl. 4. i 5. Prikazan je odziv pogona kada je $x = 0$ i $x = 2$ za različite vrednosti referentne učestanosti f_1 . Podržane oscilacije brzine eliminisane su uvedenom povratnom spregom. Ako se referentna vrednost učestanosti menja prema (8), uz $x = 2$ faktor prigušenja pri učestanostima ispod polovine nazivne vrednosti je veći nego pri $x = 0$. Uvođenje povratne sprege po struji jednosmernog medukola ne utiče na odziv pogona pri učestanostima kada je pogon stabilan. Ako je pojačanje $k_{D_{ov}}$ promenljivo uz $x = 2$ odziv brzine pri učestanosti od $f_1 = 10$ Hz do $f_1 = 20$ Hz je bolje prigušen. Stacionarna vrednost brzine se pre dostiže odnosno prelazna pojava manje traje.

Efikasno suzbijanje podržanih oscilacija postiže se primenom povratne sprege po struji jednosmernog medukola. Faktor prigušenja ima veći iznos ako je pojačanje u povratnoj sprezi promenljivo sa učestanošću, prema opisanom zakonu promene.



Sl. 4. Vremenski odziv pogona $x = 0$

Rezultati prikazani u ovom radu dobijeni su za standardan SEVER-ov motor ZK 132 M4.



Sl. 5. Vremenski odziv pogona $x=2$

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan originalan način za eliminaciju podržanih oscilacija brzine u frekventno regulisanom pogonu sa asinhronom motorom. Pomoću linearizovanog matematičkog modela pogona, pokazano je da uvođenje povratne sprege po struji jednosmernog međukola eliminiše polove sistema sa pozitivnim realnim delom. Simulacije vremenskog odziva pogona potvrdile su ispravnost predloženog rešenja.

LITERATURA

- [1] Vasić V., Zubić M., Vukosavić S., Vučković V., "Podržane oscilacije brzine u pogonu asinhronog motora" IX Simpozijum energetska elektronika, 1997, Novi Sad.
- [2] Vasić V., Jevremović R., Zubić M., Vukosavić S., Vučković V., "Analiza oscilatornog načina rada asinhronog motora" Peta međunarodna konferencija TESLA III MILENIJUM Beograd, 1996, pp 1189-1197.
- [3] T. Nelson, A. Lipo, P. Krause: "Stability analysis of a symmetrical induction machine". *IEEE Trans. on Power*

Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp 1710-1717, November 1969.

- [4] A. Lipo, P.C Krause: "Stability analysis of a rectifier-inverter induction motor drive". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, pp 55-66, January 1969.
- [5] P. Krause, A. Lipo: "Analysis and simplified representations of a rectifier-inverter induction motor drive". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol PAS-88, pp. 588-596, May 1969.
- [6] Murai, T. Watanabe, H. Iwasaki: "Waveform distortion and correction circuit for PWM inverters with switching lag-times". *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.-23, pp 881-886, September/November 1987.
- [7] Jeong, M.H. Park: "The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 38, pp. 108-114, April 1991.
- [8] Choi, S.I. Yong, S.K. Sul: "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation". *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp.221-227, 1996.
- [9] J.W. Choi, S.K. Sul: "A new compensation strategy reducing voltage/current distortion in PWM VSI systems operating with low output voltages". *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, pp. 1001-1008, September/Oktobar 1995.

Abstract - Induction motor is frequently used in fan, compressor and pump drives utilizing speed open loop drive. In this drives for speed smaller than 50% of nominal value there is risk for arise of sustained speed oscillations. Speed sustained oscillations are undesirable for most part of drives, and we have to eliminate ones. Offering solution for eliminating speed oscillations must be simple, without addition hardware. In this paper is offer one originally solution for eliminating speed oscillation with dc-current feedback.

ELIMINATION OF SUSTAINED SPEED OSCILLATION IN INDUCTION MOTOR DRIVE

Veran Vasić, Miodrag Zubić, Radiša Jevremović
Slobodan Vukosavić, Vladan Vučković.