

**ANALIZA STACIONARNOG STANJA ELEKTROMOTORNOG POGONA BEZ DAVAČA BRZINE**

Veran Vasić, Miodrag Zubić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*  
Slobodan Vukosavić, *Elektrotehnički fakultete u Beogradu*

**Sadržaj** - U radu se izučava uticaj razdešenosti parametara motora i parametara estimatora na stacionarno stanje elektromotornog pogona sa vektorski upravljanim asinhronim motorom bez davača brzine. Cilj rada je da se uspostavi matematički model pogona koji važi za stacionarno stanje u uslovima bez davača brzine. Uspostavljeni matematički model omogućuje jednostavnu analizu razdešenosti stvarnih parametara motora i parametara primenjenih estimatora (otpornost statora, rotorska vremenska konstanta). Ispravnost rezultata dobijenih primenom matematičkog modela za stacionarno stanje verifikovana je pomoću simulacija vremenskog odziva dinamičkog modela pogona. Rešenje sistema nelinearnih, algebarskih, simultanih, jednačina stacionarnog matematičkog modela dobijeno je primenom standardnih MATLAB-ovih funkcija.

**1. UVOD**

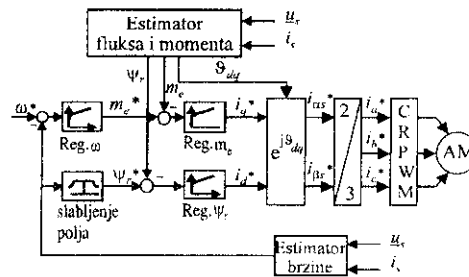
U savremenim industrijskim i tehnološkim procesima u pogonima sa promenljivom brzinom, asinhroni motori potiskuju jednosmerne motore postajući pri tome dominantni u primeni. Za realizaciju upravljanja po brzini obrtanja rotora potrebna je informacija o brzini odnosno davač brzine. Uпотреbom davača brzine smanjuje se robusnost i pouzdanost pogona sa asinhronim motorom [1-2]. U pogonima gde su potrebne znaatne vrednosti brzine (asinhroni motori povišene učestanosti) nekada nije moguće ni montirati davač brzine [3-5]. U raspoloživoj literaturi nalaze se brojni predlozi kojima se realizuje estimacija brzine. Najveći broj pogona sa vektorski upravljanim asinhronim motorom je opšte namene [1-8] gde se zadovoljavajuće performanse pogona mogu postići i bez davača brzine.

U radu je prikazan matematički model za stacionarno stanje pogona opšte namene prikazanog na Sl. 1. Uspostavljeni matematički model uvažava kako postojanje estimatora fluksa i momenta tako i odgovarajućeg estimatora brzine. Estimacija odgovarajućih veličina navedenim estimatorima realizuje se na osnovu merenih struja i napona i adekvatnog matematičkih modela. Ovako uspostavljen matematički model stacionarnog stanja omogućuje jednostavno izučavanje uticaja odstupanja parametara u modelu estimatora od parametara u modelu motora. Postojanje navedene razlike u vrednosti parametara uslovljava pogrešno izračunavanje estimiranih veličina. Matematički model i prikaz rezultata dati su u nastavku.

**2. MATEMATIČKI MODEL ZA STACIONARNO STANJE POGONA BEZ DAVAČA BRZINE**

U ovom delu uspostavljen je matematički model koji opisuje stacionarno stanje pogona opšte namene sa asinhronim motorom, prikazanog na Sl. 1. Primenjeno je

vektorsko upravljanje sa orijentacijom u odnosu vektor fluksa rotora.



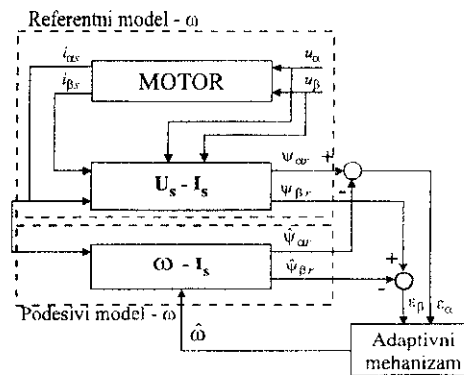
Sl. 1. Pogon opšte namene sa asinhronim motorom

Povratne sprege po brzini, fluksu i momentu zatvaraju se po estimiranim veličinama. Estimacija fluksa rotora realizuje se pomoću dva estimatora  $u_s-i_s$  (naponskog) i  $i_s-\omega$  (strujnog) estimatora koji su opisani sa jednačinama (1) i (2) respektivno.

$$p\hat{\psi}_{rV}^s = \frac{L_r}{L_m} \left[ u_s^s - (R_s + \sigma L_s p) i_s^s \right] \quad (1)$$

$$p\hat{\psi}_{rl}^s = \frac{L_m}{T_r} i_s^s - \left( \frac{1}{T_r} - j\hat{\omega} \right) \hat{\psi}_{rl}^s \quad (2)$$

U jednačinama (1) i (2) donji indeks  $V$  odnosno  $l$  ukazuju da se odgovarajuća veličina estimira naponskim odnosno strujnim estimatorom, gornji indeks ukazuje da su sve veličine u koordinatnom sistemu vezanom za stator a oznaka  $\hat{\phantom{x}}$  ukazuje da se radi o estimiranoj veličini. Povratna spreaga po fluksu rotora zatvara se po estimiranoj vrednosti iz  $u_s-i_s$  estimatora. Estimacija momenta realizuje se pomoću estimiranog fluksa rotora iz  $u_s-i_s$  estimatora i struja statora kao što je prikazano u (3).



Sl. 2. Principijelna šema za estimaciju brzine

$$\hat{m}_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \psi_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (3)$$

Estimacija brzine realizuje se observerom čija je struktura prikazana na Sl. 2. uz adaptivni mehanizam koji je opisan jednačinom (4):

$$\hat{\omega} = (K_p + \frac{K_I}{p}) (\hat{\psi}_{\alpha r} \hat{\psi}_{\beta r} - \hat{\psi}_{\beta r} \hat{\psi}_{\alpha r}) \quad (4)$$

U nastavku će biti ispisane jednačine koje opisuju dati pogon a u skladu sa gore prikazanim regulacionim strukturama. Jednačine stacionarnog stanja asinhronog motora:

$$u_d = R_{sm} i_d - \omega_{dq} (L_s i_q + L_m i_Q) \quad (5)$$

$$u_q = R_{sm} i_q + \omega_{dq} (L_s i_d + L_m i_D) \quad (6)$$

$$0 = R_{rm} i_D - \omega_{kl} (L_r i_Q + L_m i_q) \quad (7)$$

$$0 = R_{rm} i_Q + \omega_{kl} (L_r i_D + L_m i_d) \quad (8)$$

$$m_e = \frac{3}{2} p L_m (i_q i_D - i_d i_Q) \quad (9)$$

U ovim jednačinama nepoznate su sledeće veličine: naponi statora  $u_d$  i  $u_q$  struje motora  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_D$  i  $i_Q$ , sinhrona učestanost  $\omega_{dq}$  i klizanje  $\omega_{kl}$  (odnosno brzina). Ukupno osam nepoznatih u pet jednačina ako se pretpostavi da je moment opterećenja poznat i jednak momentu koji motor razvija. Sad je potrebno odrediti dodatne jednačine.

Dodatnu jednačinu je moguće napisati iz uslova da je stacionarna vrednost fluksa  $\psi_{QV0}$  estimirana  $u_s i_s$  estimatorom identički jednaka nuli.

$$\psi_{QV0} = \frac{L_r}{\omega_{dq} L_m} [-u_d + R_s i_d - \omega_{dq} \sigma L_s i_q] \equiv 0 \quad (10)$$

Iz ove jednačine sledi da je napon motora  $u_d$  "uslovno poznat" i da iznosi:

$$u_d = R_s i_d - \omega_{dq} \sigma L_s i_q \quad (11)$$

Dodatna jednačina se može napisati iz jednačine za estimirani moment. Estimacija momenta je realizovana na osnovu merenja napona i struja motora. Na osnovu ovih merenja estimira se fluks motora u  $u_s i_s$  estimatoru a zatim se izračunava moment motora (3) (ovo izračunavanje je u stojećem koordinatnom sistemu). Estimacija momenta se može realizovati i u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu (12):

$$\hat{m}_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} [i_q \psi_{DV0} - i_d \psi_{QV0}] = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} i_q \psi_{DV0} = m_e^* \quad (12)$$

U jednačini (12) uvažena je jednačina (10) a sa  $\hat{m}_e$  označen je estimirani moment dok je sa  $m_e^*$  označena referentna vrednost momenta a sa  $\psi_{DV0}$  stacionarna vrednost fluksa estimirana  $u_s i_s$  estimatorom i ona iznosi:

$$\psi_{DV0} = \frac{L_r}{\omega_{dq} L_m} [u_q - R_s i_q - \omega_{dq} \sigma L_s i_d] \quad (13)$$

Još jedna dodatna jednačina se može napisati iz jednačine za estimaciju fluksa. Estimacija fluksa se obavlja  $u_s i_s$  estimatorom fluksa i stacionarna vrednost fluksa ovog estimatora mora biti jednaka sa referentnom vrednošću  $\psi_r^*$  jer se po ovoj estimiranoj vrednosti fluksa zatvara povratna spreza po fluksu:

$$\psi_{DV0} = \frac{L_r}{\omega_{dq} L_m} [u_q - R_s i_q - \omega_{dq} \sigma L_s i_d] \equiv \psi_r^* \quad (14)$$

Poslednja nedostajuća jednačina može se napisati iz uslova za sinhronu brzinu.

$$\omega_{dq} = \omega^* + \omega_{kl} \quad (15)$$

gde je  $\omega^*$  referentna brzina ali je klizanje još uvek nepoznato. Sinhrona brzina se može dosta jednostavno odrediti iz jednačina stacionarnog stanja  $i_s$ - $\omega$  estimatora U stacionarnom stanju vrednost fluksa  $\psi_{QV0}$  estimirana  $i_s$ - $\omega$  estimatorom mora biti identički jednaka nuli:

$$\psi_{QV0} = L_m \frac{i_q - (\omega_{dq} - W) T_r i_d}{1 + [(\omega_{dq} - W) T_r]^2} \equiv 0 \quad (16)$$

odakle se dobija da je sinhrona brzina:

$$\omega_{dq} = W + \frac{i_q}{T_r i_d} \quad (17)$$

Sa  $W$  je označena stacionarna vrednost estimirane brzine koja je jednaka sa referentnom (zadatom brzinom).

Sada je napisan dovoljan broj jednačina da bi sistem bio rešiv. Sistem jednačina kojima je opisano stacionarno stanje pogona na Sl. 1. nakon jednostavnih algebarskih operacija glasi:

$$0 = (R_{sm} - R_s) i_d - \left( W + \frac{i_q}{T_r i_d} \right) (L_s (1 - \sigma) i_q + L_m i_Q) \quad (18)$$

Kada se jednačina (14) smeni u jednačinu za estimirani moment (12) moguće je sračunati struju  $i_q$  kao:

$$i_q = \frac{2 m_e^* L_r}{3 p L_m \psi_r^*} \quad (19)$$

Kada se jednačina (6) smeni u (14) dobija se:

$$\frac{\omega_{dq} L_m \psi_r^*}{L_r} = (R_{sm} - R_s) i_q + \left( W + \frac{i_q}{T_r i_d} \right) (L_s (1 - \sigma) i_d + L_m i_D) \quad (20)$$

$$0 = R_r i_D - \left( W + \frac{i_q}{T_r i_d} - \omega \right) (L_r i_Q + L_m i_q) \quad (21)$$

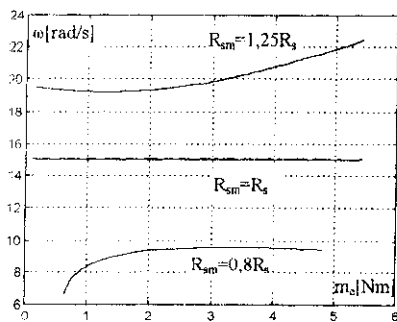
$$0 = R_r i_Q + \left( W + \frac{i_q}{T_r i_d} - \omega \right) (L_r i_D + L_m i_d) \quad (22)$$

Jednačine (19)-(22) predstavljaju skup jednačina koje opisuju pogon sa asinhronim motorom bez davača brzine sa estimacijom brzine pomoću observera prikazanog na Sl. 2. U jednačinama (19)-(22) ulazne veličine su  $m_e^*$ ,  $\psi_r^*$  i zadata brzina  $\omega^*$  ( $W$ ). Sistem jednačina treba rešiti po sledećim promenljivim  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_D$ ,  $i_Q$  i brzini motora  $\omega$ . U narednom delu prikazani su rezultati dobijeni pomoću stacionarnog modela pogona.

### 3. REZULTATI STACIONARNOG MODELA

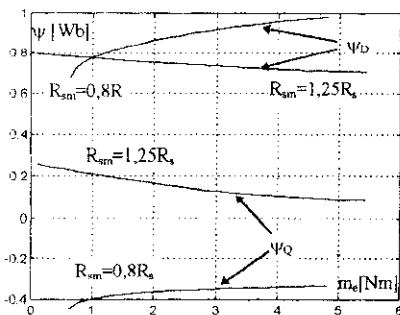
Tačnost estimacije stacionarnog stanja pogona sa Sl. 1. određena je sa tačnošću samih parametara asinhronog motora odnosno sa njihovom usklađenošću sa vrednostima u modelu estimatora. Matematički model opisan sa jednačinama (19)-(22) omogućuje jednostavnu analizu uticaja varijacije parametara na stacionarno stanje pogona.

Rezultati prikazani u ovom delu su dobijeni za standardan Severov motor ZK 80.

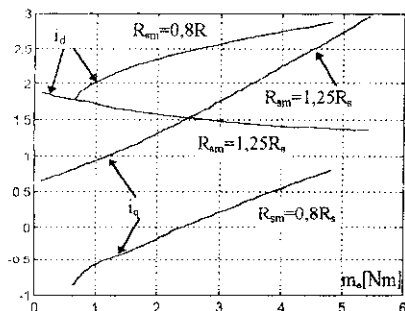


Sl. 3. Brzina pogona u funkciji momenta opterećenja

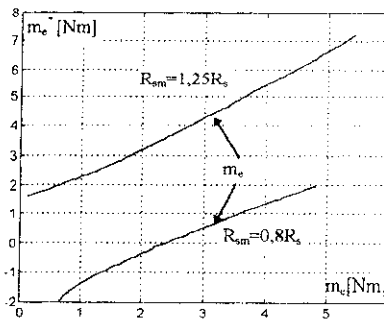
Od posebnog značaja je da se utvrdi uticaj razdešenosti vrednosti otpora statora i rotora u modelu motora i u modelu estimatora. Ova razdešenost se javlja usled promene otpornosti sa temperaturom tako da je ovu promenu teško predvideti. Promena temperature namotaja može usloviti promenu otpornosti za 25 % u odnosu na otpornost u hladnom stanju. Na Sl. 3. - 7. posmatran je uticaj varijacije otpora statora na brzinu obrtanja, flukseve rotora, struje statora i grešku u orijentaciji fluksa rotora.



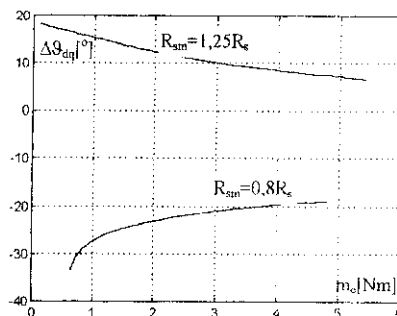
Sl. 4. Fluxevi motora  $\psi_D$  i  $\psi_Q$  u funkciji momenta opterećenja motora



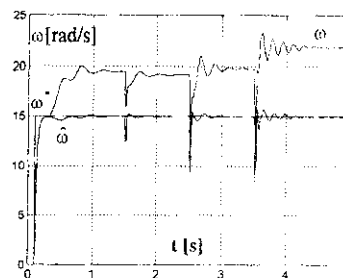
Sl. 5. Struje motora  $i_d$  i  $i_q$  proračunate stacionarnim modelom u funkciji momenta opterećenja motora



Sl. 6. Referentni moment (estimirani moment) u funkciji momenta opterećenja motora

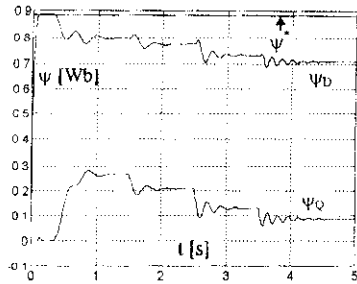


Sl. 7. Greška u uglu orijentacije vektora fluksa rotora izražena u stepenima ( $\Delta\theta_{dq} = \arctg(\psi_Q/\psi_D)$ ) u funkciji momenta opterećenja motora



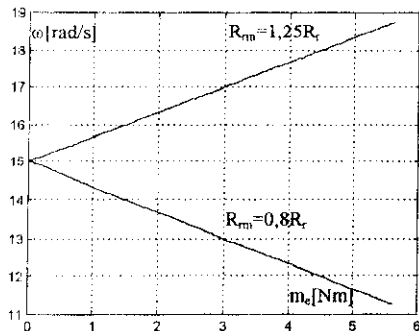
Sl. 8. Vremenski odziv brzine pri  $R_{fm} = 1,25R_s$

Na Sl. 8 i 9. prikazani su vremenski odzivi brzine i fluksa u motoru kada je otpornost statora motora za 25 % veća od vrednosti u modelu estimatora brzine. Vremenski odzivi navedenih veličina dobijeni su primenom dinamičkog matematičkog modela. Referentna brzina iznosi 15 rad/s. tokom zaleta motora otpornost statora motora je jednaka sa vrednošću u modelu estimatora. Tokom vremena od  $t = 0,3$  s do  $t = 0,75$  otpornost statora u modelu motora se uvećava za 25 %. Tokom zaleta motor je neopterećen. Motor je opterećivan u  $t = 1,5$  s,  $2,5$  s i  $3,5$  s sa 1 Nm, 3 Nm i 5 Nm. respektivno. Postignuto je zadovoljavajuće slaganje rezultata dobijenih stacionarnim Sl. 3.-7. i dinamičkim matematičkim modelom Sl. 8 i 9.



Sl. 9. Vremenski odziv fluksa pri  $R_{sm}=1,25R_r$

Na Sl. 10 prikazana je stacionarna vrednost brzine pri različitim opterećenjima ako se otpornost rotora u modelu motora razlikuje za  $\pm 25\%$  od vrednosti u modelu estimatora.



Sl. 10. Brzina pogona u funkciji momenta opterećenja

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je izveden stacionarni matematički model pogona sa asinhronim motorom bez davača brzine. Posmatran je pogon opšte namene sa orijentacijom u odnosu na fluks rotora. Pri izvođenju matematičkog modela uvažene su i stacionarne jednačine estimatora fluksa, elektromagnetnog momenta i brzine. Izvedeni matematički model omogućuje jednostavnu analizu uticaja nepoznavanja parametara u modelima estimatora na stacionarno stanje pogona. Simulacije vremenskog odziva pogona dinamičkog modela potvrđuju ispravnost matematičkog modela za stacionarno stanje pogona.

#### SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA

$\theta$  - u indeksu, stacionarna vrednost relevantne veličine,  
\* - referentne vrednosti.

$d, q$  - d, q komponente veličina statora,

$D, Q$  - d, q komponente veličina rotora,

$i_s^s, u_s^s$  - prostorni vektor (polifazor) struje (napona) statora.

$\hat{\psi}_{-rV}^s = \psi_{\omega rV}^s + j\psi_{\beta rV}^s(\hat{\psi}_{-rI}^s)$  - prostorni vektor (polifazor) fluksa rotora estimiran naponskim (strujnim) estimatorom u

stojećem koordinatnom sistemu sa odgovarajućim komponentama,

$\omega$  - brzina obrtanja,  $\omega_{dq}$  - sinhrona brzina,

$\omega_{kl}$  - brzina klizanja,  $W$  - stacionarna vrednost estimirane brzine,  $p$  - broj pari polova.

$R_s, R_r$  - otpornost statorskog (rotorskog) namota,

$R_{sm}, R_{rm}$  - otpornost statorskog (rotorskog) namota u modelu motora,

$L_s, L_r$  - sopstvena induktivnost statorskog (rotorskog) namota,

$L_m$  - induktivnost magnećenja,

$\sigma$  - koeficijent ukupnog rasipanja,

$T_r$  - rotorska vremenska konstanta.

#### LITERATURA

- [1] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Meet.*, 1989, pp 493-499.
- [2] G. Yang and T. H. Chin, "Adaptive speed identification scheme for a vector - controlled speed sensorless inverter - induction motor drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 4, pp. 820-824, July/August, 1993.
- [3] Tajima and Y. Hori, "Speed sensorless field - orientation control of the induction machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol 29, no. 1, pp. 175-180, January, 1993.
- [4] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol 30, no. 5, pp. 1234-1240, September/October, 1994.
- [5] Y. Hori and T. Umeno, "Implementation of robust flux observer based field orientation (FOFO) controller for induction machines," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Meet.*, 1989, pp 523-528.
- [6] H. Kubota, K. Matsuse and T. Nakano, "DSP - based speed adaptive flux observer of induction motor," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Meet.*, 1991, pp. 380-384.
- [7] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaption," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol 30, no. 5, pp. 1219-1224, September/October, 1994.
- [8] R. Bowes and J. Li "New robust adaptive control algorithm for high performance AC drives," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Meet.*, 1997, pp. 1-7.

#### STEADY STATE BEHAVIOUR OF SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVES

**Abstract** - The paper discusses influence of parameter mismatch on steady state solution of indirect feed forward, current fed, rotor flux orientated, sensorless induction motor drive. The aim of paper is to derive system of nonlinear algebraic equations which describe steady state of sensorless drive. This mathematical model enables study of parameter detuning on steady state solution. Steady state results are raised utilizing MATLAB's function.

Veran Vasić, Slobodan Vukosavić, Miodrag Zubić