Paper No. T954, pp. 1-7

ANALIZA OSJETLJIVOSTI DINAMIČKIH MODELA ROTORSKOG KOLA KAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

mr Faruk Bilalović
mr Osman Mušić
ENERGOINVEST - OOUR IRCA

SAŽETAK

U članku su prezentirane dvije vrste dinamičkih modela rotorskog kola asinhrone mašine koji služe za dobijanje informacija o vektoru rotorskog fluksa mašine. Obradjena je i osjetljivost ovih modela na greške množača, postavljenih parametara mašine i ulaznih varijabli u modele.

SENSITIVITY ANALYSIS OF ROTOR CIRCUIT DYNAMIC MODEL IN THE SQUIRREL CAGE INDUCTION MACHINE

Two kinds of induction motor rotor ciruit dynamic models, used for getting informations on the machine rotor flux, are presented in the paper. Sensitivity of the two models to multiplier errors, set machine parameters and model input variables is discussed in detail.

UVOD

Neki sistemi upravljanja trofazne kavezne asinhrone mašine zahtijevaju informacije o vektoru rotorskog fluksa (L.1,L.2, L.3,L.4). Ugradjivanje Hall-ovih sondi u stator mašine narušava njen integritet, onemogućava regulaciju standardnog motora i implicira upotrebu specijalnog dodatnog uredjaja, tzv. vektorskog filtra (L.4). Prihvatljiviji način dobijanja ovih informacija je iz dinamičkih modela rotorskog kola. Radi pravilne procjene tačnosti ovako dobijenih informacija biće izvršena analiza osjetljivosti modela na tipične greške koje se mogu pojaviti.

DINAMIČKI MODELI ROTORSKOG KOLA

Iz diferencijalnih jednačina kavezne asinhrone mašine (L.5) se lako dobije opis vektora rotorskog fluksa u proizvoljnom ortogonalnom koordinatnom sistemu (μ,ν)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_{R\mu}\\ \Psi_{R\nu}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-r_R/x_R & \omega_K-n\\ -\omega_K+n & -r_R/x_R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_{R\mu}\\ \Psi_{R\nu}\end{bmatrix} + \frac{r_R x_H}{x_R}\begin{bmatrix}i_\mu\\ i_\nu\end{bmatrix} \qquad (1)$$

gdje su: n - ugaona brzina rotora mašina; x_R, x_H - svedeni nominalni induktivni otpori rotorskog i glavnog magnetnog kola mašine; $[\Psi_{R\mu}\ \Psi_{R\nu}]^T$, $[i_\mu, i_\nu]^T$ - vektori rotorskog fluksa i statorske struje u ortogonalnom koordinatnom sistemu (μ,ν); ω_K - ugaona brzina koordinatnog sistema (μ,ν) u odnosu na nepokretnu osu.

Jednačina (1) reprezentuje prirodnu strukturu modela rotorskog kola koji se upotrebljava za računanje rotorskog fluksa. Primijetimo prije svega da je za koordinatni sistem (μ,ν), u kome se modelira rotorsko kolo mašine, pogodno odabrati:

a) nepokretni koordinatni sistem (α,β), u kome se i vrši mjerenje komponenata vektora statorske struje

b) obrtni koordinatni sistem (p,r), čvrsto vezan za rotor mašine.

U slučaju a) je $\omega_K=0$, a za izračunavanje rotorskog fluksa neophodno je a priori raspolagati informacijama o vrijednosti komponenata vektora statorske struje $[i_\alpha\ i_\beta]^T$ i ugaone brzine n:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_{R\alpha}\\ \Psi_{R\beta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-r_R/x_R & -n\\ n & -r_R/x_R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_{R\alpha}\\ \Psi_{R\beta}\end{bmatrix} + \frac{r_R x_H}{x_R}\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix} \tag{2}$$

U slučaju b) ugaona brzina ne ulazi eksplicitno u jednačine rotorskog kola:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_{Rp}\\ \Psi_{Rr}\end{bmatrix} = -\frac{r_R}{x_R}\begin{bmatrix}\Psi_{Rp}\\ \Psi_{Rr}\end{bmatrix} + \frac{r_R x_H}{x_R}\begin{bmatrix}i_p\\ i_r\end{bmatrix} \tag{3}$$

Medjutim, za nalaženje vektora rotorskog fluksa prema (3) potrebno je izračunati vrijednosti komponenata i_p, i_r vektora statorske struje u koordinatnom sistemu koji se vrti zajedno sa rotorom. Osim toga, pošto se sinteza signala za upravljanje poluprovodničkih prekidača energetskog pretvarača vrši u nepokretnom koordinatnom sistemu (α,β), komponente Ψ_{Rp}, Ψ_{Rr} vektora fluksa dobijenog pomoću modela (3) moraju se naknadno transformisati u nepokretni koordinatni sistem. Obje transformacije, neophodne pri korišćenju modela (3) date su kao:

$$\begin{bmatrix}i_p\\ i_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\gamma & \sin\gamma\\ -\sin\gamma & \cos\gamma\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix}\Psi_{R\alpha}\\ \Psi_{R\beta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\gamma & -\sin\gamma\\ \sin\gamma & \cos\gamma\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_{Rp}\\ \Psi_{Rr}\end{bmatrix} \tag{4}$$

gdje je: γ - ugao izmedju koordinatnih sistema (p,r) i (α,β), a

$$n = \frac{d\gamma}{dt}$$

Razmotrimo konvergentnost modelskog fluksa rotora ka njegovoj stvarnoj vrijednosti. Diferencirajući razliku modelske i stvarne vrijednosti fluksa $\Delta\Psi_R$, a na osnovu jednačina modela dobićemo

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{R\alpha}\\ \Delta\Psi_{R\beta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-r_R/x_R & -n\\ n & -r_R/x_R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{R\alpha}\\ \Delta\Psi_{R\beta}\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{Rp}\\ \Delta\Psi_{Rr}\end{bmatrix} = -\frac{r_R}{x_R}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{Rp}\\ \Delta\Psi_{Rr}\end{bmatrix} \tag{6}$$

Jednačine (5) i (6) opisuju prigušeni prelazni proces sa amplitudom greške koja teži ka nuli po eksponencijalnom zakonu $\exp(-tx_R/r_R)$, pa je u tom smislu konvergencija modela (2) i (3) ekvivalentna. Objasnimo detaljnije pitanja osjetljivosti dinamičkih modela na greške mjerenja parametara asinhrone mašine i ulaznih veličina modela.

Uticaj greške mjerenja ugaone brzine rotora

Ovaj slučaj se, očigledno, odnosi samo na model rotorskog kola (2). Neka se vrijednost ugaone brzine n, koja se koristi pri modeliranju, razlikuje od stvarne vrijednosti za Δn; tada je:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_{R\alpha}\\ \Psi_{R\beta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-r_R/x_R & -n-\Delta n\\ n+\Delta n & -r_R/x_R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_{R\alpha}\\ \Psi_{R\beta}\end{bmatrix} + \frac{r_R x_H}{x_R}\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix} \tag{7}$$

Model rotorskog kola (7) je oscilatorna kontura sa dekrementom prigušenja $-r_R/x_R$ i rezonantnom frekvencom $n+\Delta n$. Pošto se rezonantne frekvence modelskog i stvarnog bloka razlikuju za Δn, dok su ulazni signali u oba bloka jednaki (i_α, i_β), izlazni signali iz ovih blokova će se u stacionarnom stanju razlikovati za kompleksnu veličinu $\Delta\Psi_R$

$$\Delta\Psi_R = \frac{j\Delta n}{\frac{r_R}{x_R} + j(s-\Delta n)}\,\Psi_R \tag{8}$$

gdje je: $s=\omega-n$ klizanje asinhrone mašine; Ψ_R - stvarna vrijednost vektora rotorskog fluksa u kompleksnoj formi. Iz relacije (8) se lako dobija da je neophodno da bude

$$\Delta n \ll \frac{r_R}{x_R} \tag{9}$$

kako bi relativna greška računanja rotorskog fluksa bila zanemariva, tj. $\| \Delta\Psi_R \| \ll \| \Psi_R \|$. Tako npr. za mašine 1-10 kW vrijednost r_R/x_R se obično nalazi u granicama 1-10%, pa je dopuštena relativna greška mjerenja brzine 0,1-1% za puni dijapazon frekvenci statorske struje. Zahtjevi na tačnost mjerenja ugaone brzine mogu se oslabiti ako se smanji dijapazon u kome se ona mijenja.

Uticaj greške koju unose množači

Ovaj slučaj je takodje interesantan samo za model rotorskog kola (2). Obično množači imaju za red veličine manju tačnost od sumatora i integratora. Neka upotrijebljeni množači imaju grešku u izlaznom signalu, koja ne prelazi granice $\pm\Delta_1$ i $\pm\Delta_2$, respektivno. Razmotrimo specijalan slučaj, kada su frekvenca ulaznog signala u model - statorske struje i ugaona brzina rotora jednake nuli, a Δ_1 i Δ_2 su konstante. U stacionarnom stanju tada vrijedi

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{R\alpha} \\ \Delta\Psi_{R\beta} \end{bmatrix} = \frac{x_R}{r_R} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Kako se zbog efektivnosti sistema upravljanja u stacionarnom nominalnom režimu obično održava $\| \Psi_R \| \approx 1$, da bi relativna greška izračunatog rotorskog fluksa bila zanemariva, moraju biti ispunjeni uslovi:

$$\Delta_1 \ll \frac{r_R}{x_R} \qquad \Delta_2 \ll \frac{r_R}{x_R} \tag{11}$$

Dakle, za normalan rad modela rotorskog kola koji zahtijeva informaciju o vrijednosti ugaone brzine rotora moraju biti ispunjeni odredjeni zahtjevi na tačnost mjerenja ugaone brzine i operacije množenja. Totalna relativna greška ne smije prelaziti vrijednost r_R/x_R. Ovaj zahtjev često neće biti ispunjen ako se pri realizaciji modela rotorskog kola koriste standardni davači ugaone brzine i standardni množači, koji imaju tačnost reda 0,5--2%. Ako se, pak, sa takvom opremom želi postići zadovoljavajuća tačnost, valja postaviti ograničenje na maksimalnu ugaonu brzinu, tako da i pri njoj odnos r_R/x_R bude još dovoljno veliki.

Model (3), (4) nema navedenih nedostataka. Naime, nije teško pokazati da greška direktne ili inverzne transformacije (4), koja se vrši nad ulaznim i izlaznim signalima modela (3), prouzrokuje grešku u računanju fluksa koja je jednaka greški transformacije.

Uticaj greške postavljanja parametara mašine

Parametar r_R/x_R je teško izmjeriti direktno pošto je rotor mašine kratko spojen. Indirektne metode proračuna parametra r_R/x_R mogu dovesti do znatnih grešaka (10-20%). Greška u postavljanju parametra r_R/x_R utiče samo pri nenultim klizanjima asinhrone mašine, tj. u prelaznim režimima ili pod teretom. Greška računanja rotorskog fluksa u stacionarnom režimu iznosi (u kompleksnom obliku):

$$\Delta\Psi_R = \frac{js\Delta}{\frac{r_R}{x_R}(1+\Delta)+js}\Psi_R \qquad (12)$$

gdje je Δ - relativna greška parametra r_R/x_R. Za normalno funkcionisanje modela (2) i (3) relativna greška Δ mora zadovoljiti nejednakost

$$\Delta \ll \frac{r_R}{x_R \cdot s} \qquad (13)$$

Relacija (13) se može razmatrati i kao oblast dopuštenih klizanja asinhrone mašine.

Greška u postavljanju parametra x_H ekvivalentna je promjeni koeficijenta pojačanja dinamičkih modela rotorskog kola po ulaznom signalu - statorskoj struji mašine. Parametar x_H se obično izračunava na osnovu izmjerene struje praznog hoda mašine, pa se može smatrati da se njegova vrijednost zadaje sa dozvoljenom tačnošću. Moguće greške u postavljanju x_H mogu se iskompenzirati promjenom zadane vrijednosti modula rotorskog fluksa (L.1, L.2, L.3).

ZAKLJUČAK

Analiza osjetljivosti dinamičkih modela rotorskog kola asinhrone mašine pokazuje da model (3), (4), sa transformacijom u koordinatni sistem čvrsto vezan za rotor i obratnom transformacijom u nepokretni koordinatni sistem, ne nameće stroge uslove na tačnost transformacije. Ipak, ovaj model ima značajan nedostatak - složeniji je. Zbog toga je pogodnije koristiti model rotorskog kola (2) u nepokretnom koordinatnom sistemu, ako su parametri asinhrone mašine i radni dijapazon ugaonih brzina takvi da davač ugaone brzine i množači imaju dozvoljene greške.

LITERATURA

1. A.Šabanović
D.B.Izosimov, Application of sliding modes to induction motor Control,IEEE Trans. on Ind.App.vol. IA - 17 № 1, p.p. 41-50, january/february 1981.

2. F.Bilalović
A.Šabanović
D.B.Izosimov, Upravljanje mehaničkih koordinata kavezne asinhrone mašine, "Automatika" 1-2/78, 1978.

3. F.Blaschke, Das Prinzip der Feldoriemtirung die Grundlage für die Transvektor Regelung von Drehfeldmaschinen, "Siemens - Z", 1971, 45, № 10.

4. F.Blaschke,
K.Böhm Verfaren der Felderfassung bei der Regelung stromrichtergespeister Asynchronmaschinen, Control in power electronics and electrical drives, IFAC symposium, Duesseldorf, october 7-9, 1974.

5. K.P.Kovač,
I. Rac , Perehodnye processy v mashinah permennogo toka, Gosenergoizdat, Moskva 1963.