

### 3. Uticaj nepoznavanja vremenske konstante rotora na rad pogona sa davačem položaja

U ovom poglavlju je izvršena analiza parametarske osetljivosti algoritma indirektno vektorske kontrole. Po pomenutom algoritmu položaj rotorskog fluksa se ne meri, već procenjuje na osnovu struja statora i položaja rotora. Najznačajni izvor greške u proceni položaja vektora rotorskog fluksa predstavlja parametarski osetljiv model rotorskog kola. Model rotorskog kola simulira pojave u rotoru mašine koristeći pretpostavljenu vrednost vremenske konstante rotora kao parametar. To je ujedno i kritičan parametar čija greška direktno utiče na izračunatu učestanost klizanja (2.25) i na procenu položaja vektora rotorskog fluksa. Da se ova greška ne bi načinila, neophodno je pomenuti parametar menjati u skladu sa stvarnom vremenskom konstantom rotora.

Vremenska konstanta rotora asinhronog motora se menja u zavisnosti od temperature rotora kao i sa promenom nivoa saturacije magnetnih kola mašine,  $T_r = L_r/R_r$ . Kod asinhronog kaveznog motora provodnici rotora su obično izliveni od aluminijuma ili formirani ulaganjem punih bakarnih šina u žlebove rotora. Otpornost rotora zavisi od učestanosti rotorske struje i temperature namotaja. S obzirom na veličinu poprečnog preseka provodnika rotora sa porastom rotorske učestanosti moguća je pojava potiskivanja struje. Analiza promene otpornosti rotora sa učestanošću usled efekta potiskivanja izvršena je u literaturi [C1]. Vukosavić pokazuje da se kod motora manje snage na uobičajenim učestanostima rotorskih struja efekat potiskivanja može zanemariti u odnosu na promenu otpornosti sa temperaturom. Za motore veće snage, ukoliko su nominalno opterećeni, promena otpora u odnosu na jednosmernu struju iznosi samo 0.3 % što se takođe može zanemariti u odnosu na neminovnu promenu otpora sa temperaturom. Efekat potiskivanja je izraženiji kod motora veće snage i postaje značajan pri porastu opterećenja kada dovodi do uvećanja otpornost rotora do 3 %.

Sa druge strane, relativna promena rotorske otpornosti sa temperaturom je veoma značajna i iznosi približno 0.4% / 1°C. Promena temperature rotora zavisi od snage gubitaka i uslova hlađenja što je čini složenom za procenu. Ipak, pravilno projektovanje motora u skladu sa potrebama pogona limitira ovu promenu na manje od 130°C u odnosu na ambijent. U tom slučaju je optimalno postaviti vrednost parametra rotorskog kola koja odgovara sredini mogućeg temperaturnog opsega. Time se i dalje problem u potpunosti ne rešava, i ostavlja moguća relativna greška parametra u iznosu ±25%. Pri izboru mehanizma za korekciju ove greške može se uzeti u obzir da je brzina promene temperature rotora ograničena termičkom vremenskom konstantnom i da je reda veličine jednog minuta i više.

Usled nelinearne karakteristike magnećenja feromagnetika magnetni otpor zajedničkom fluksu statora i rotora je promenljiv. Promena induktivnosti magnećenja može da nastupi i za vreme manje od jedne sekunde pri naglom prelasku pogona u režim slabljenja polja. U literaturi [C2] Levi vrši analizu efekta magnetnog zasićenja u šemama indirektno orijentacije polja u kojima je parametar rotorskog otpora korektno podešen. Autor pokazuje da se za rad pogona sa nominalnim fluksom rotora može koristiti nominalna induktivnost magnećenja. Tada je efekat zasićenja vrlo mali u celom području od interesa (do trostruke vrednosti nominalnog momenta). Ovo nije slučaj u oblasti slabljenja polja gde korišćenje nominalne vrednosti induktivnosti magnećenja dovodi do značajne degradacije odziva pogona. Posledice neusklađene vrednosti korišćene induktivnosti magnećenja i stvarne u mašini su slične posledicama koje prouzrokuje neusklađena vrednost rotorskog otpora. Ipak, za razliku od

promene rotorske otpornosti sa temperaturom, promenu induktivnosti magnećenja sa promenom nivoa zasićenja je moguće unapred predvideti i ugraditi u model rotorskog kola [C2], [C3], [C4] i [A19].

Promena rasipne induktivnosti rotora je od sekundarnog značaja na tačnost modela rotorskog kola. U nominalnim režimima rada pogona opravdano je koristiti inicijalno podešene vrednosti. U slučaju preopterećenja, kada statorske struje, izlazni momenat i klizanje nekoliko puta premašuju nominalne vrednosti, dolazi do promena induktivnost rasipanja rotora i treba ih na neki način korigovati. Treba imati u vidu da su promene induktivnosti rasipanja kod motora sa zatvorenim žlebom značajnije nego kod motora sa otvorenim žlebom.

Konačno, postoji više razloga za promenu vremenske konstante rotorskog kola u toku rada pogona. Ukoliko se zadrži početna vrednost ovog parametra vremenom neminovno dolazi do narušavanja kvaliteta dinamičkog odziva i nepovoljnih statičkih karakteristika pogona. U radovima [A2] i [C5] se analizira uticaj nepodešene rotorske konstante na rad pogona. U radovima je prikazan uticaj greške u vremenskoj konstanti rotora na statičke i dinamičke odzive fluksa i momenta. Pokazano je da nepodešen estimator fluksa rotora dovodi do zavisnosti komponenti rotorskog fluksa od opterećenja i nelinearne funkcije između zadatog i ostvarenog momenta.

U ovom poglavlju rada detaljno je analizirano kretanje stacionarne radne tačke pogona koji radi u režimu kontrole momenta kao i pogona sa povratnom spregom po brzini rotora. Analitički je pokazano da promena radne tačke zavisi od usrednjene vrednosti odnosa utisnutih struja ali i od greške u parametru vremenske konstante rotora. Matematička analiza je potvrđena putem računarskih simulacija čiji rezultati su prikazani grafički. Da bi se uticaj greške u parametru  $T_r^*$  jasno naglasio, prilikom matematičke analize greška u ostalim parametrima nije uzeta u obzir.

### 3.1. Uticaj odstupanja parametra vremenske konstante rotora na komponente ostvarenog fluksa rotora

#### 3.1.1. Stacionarne vrednosti komponenti fluksa rotora

U slučaju dobro podešene vrednosti parametra korišćene u kontroleru ( $T_r^* = T_r$ ) procenjena vrednost položaja rotorskog fluksa je tačna i statorske struje se pravilno orijentišu u odnosu na rotorski fluks. Ako se u ovom slučaju zadrže konstantne vrednosti struja statora  $I_{ds0}$  i  $I_{qs0}$ , posle prelaznih procesa su ostvarene sledeće stacionarne vrednosti komponenti fluksa rotora:

$$\begin{aligned} \Psi_{dr0} &= L_m I_{ds0}, \\ \Psi_{qr0} &= 0, \end{aligned} \quad (3.1.)$$

uz konstantnu učestanost klizanja:

$$\omega_{k0} = \frac{1}{T_r} \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}. \quad (3.2.)$$

Ako parametar  $T_r^*$  korišćen u modelu rotorskog kola nije u skladu sa stvarnom vremenskom konstantom rotora  $T_r$ , pri utisnutim  $I_{ds0}$  i  $I_{qs0}$  više ne važe jednačine za ostvareni rotorski fluks date u (3.1). Izračunata učestanost klizanja

$$\omega_{k0} = \frac{1}{T_r^*} \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}, \quad (3.3.)$$

je različita od potrebne (3.2) i nove stacionarne vrednosti komponenti rotorskog fluksa se mogu dobiti na osnovu (3.4). Sistem jednačina stacionarne radne tačke za rotorsko kolo je dobijen na osnovu (2.24) eliminacijom komponenti prelaznog procesa:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_r} \Psi_{dr0} - \omega_{k0} \Psi_{qr0} &= \frac{1}{T_r} L_m I_{ds0}, \\ \frac{1}{T_r} \Psi_{qr0} + \omega_{k0} \Psi_{dr0} &= \frac{1}{T_r} L_m I_{qs0}. \end{aligned} \quad (3.4.)$$

Rešavanjem (3.4) za stacionarne vrednosti komponenti vektora rotorskog fluksa se dobija:

$$\begin{aligned} \Psi_{dr0} &= L_m \frac{I_{ds0} + \omega_{k0} T_r I_{qs0}}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2}, \\ \Psi_{qr0} &= L_m \frac{I_{qs0} - \omega_{k0} T_r I_{ds0}}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2}. \end{aligned} \quad (3.5.)$$

Jednačina (3.5) pokazuje da komponente rotorskog fluksa u pogonu sa pogrešnom  $T_r^*$  nisu jednake zadatim, i da zavise od obe komponente statorske struje. U izrazima (3.6) jasno su razdvojene zadata vrednost komponente vektora rotorskog fluksa i odstupanje nastalo usled nepodešene vrednosti parametra rotorskog kola:

$$\begin{aligned} \Psi_{dr0} &= L_m I_{ds0} + L_m \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) \frac{\omega_{k0} T_r}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2} I_{qs0}, \\ \Psi_{qr0} &= 0 + \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) L_m \frac{1}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2} I_{qs0}. \end{aligned} \quad (3.6.)$$

### 3.1.2. Varijacija stacionarnih vrednosti komponenti fluksa rotora

Jednačina (3.6) pokazuje da rad pogona sa pogrešnim parametrom  $T_r^*$  dovodi do razlike u ostvarenim ustaljenim vrednosti komponenti fluksa rotora. Amplituda i znak odstupanja ovih vrednosti od zadatih (3.1) zavise od greške u parametru rotorskog kola kao i od zadatih stacionarnih vrednosti struja statora. Odstupanje u  $d$  komponenti rotorskog fluksa iznosi:

$$\Delta \Psi_{dr0} = \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) L_m \frac{\omega_{k0} T_r}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2} I_{qs0}, \quad (3.7.)$$

dok za odstupanje u  $q$  komponenti rotorskog fluksa važi:

$$\Delta \Psi_{qr0} = \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) L_m \frac{1}{1 + (\omega_{k0} T_r)^2} I_{qs0}. \quad (3.8.)$$

U interesu je detaljnije ispitati odstupanja stacionarnih vrednosti komponenti rotorskog fluksa za različite vrednosti ova dva parametra.

### 3.1.2.1. Varijacija komponenti fluksa rotora uz nepromenjen odnos $T_r/T_r^*$ pri promeni odnosa zadatih struja statora

Pri normalnom radu pogona kontroler može zadavati različite komande fluksa i momenta. Promena zadatih struja može biti relativno brza u odnosu na promenu vremenske konstante rotora. Ovakva situacija dovodi do promene stacionarnih vrednosti komponenti fluksa rotora po jednačinama (3.7) i (3.8).

Ukoliko se u jednačini (3.7) eliminiše ustaljena vrednost klizanja kao zavisna promenljiva, izraz za promenu  $d$  komponente fluksa rotora usled promene odnosa zadatih komponenti vektora struje statora ( $I_{qs0}/I_{ds0}$ ), uz konstantu grešku u  $T_r^*$  glasi:

$$\Delta\Psi_{dr0} = \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) L_m I_{ds0} \frac{\left(\frac{T_r}{T_r^*}\right) \left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}\right)^2}{1 + \left(\frac{T_r}{T_r^*}\right)^2 \left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}\right)^2} . \quad (3.9)$$

Ukoliko se usvoji:

$$a = \frac{T_r}{T_r^*} \quad \text{i} \quad x = \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} , \quad (3.10)$$

dobija se sledeći izraz za grešku  $d$  komponente fluksa rotora:

$$\Delta\Psi_{dr0} = (1 - a) L_m I_{qs0} \frac{ax^2}{1 + a^2x^2} . \quad (3.11)$$

Prvi izvod po  $x$  ove funkcije

$$\frac{d\Delta\Psi_{dr0}}{dx} = (1 - a) L_m I_{ds0} \frac{2ax}{(1 + a^2x^2)^2} , \quad (3.12)$$

ukazuje na znak promene  $d$  komponente fluksa rotora pri promeni odnosa zadatih struja. Na osnovu izraza (3.9) i (3.12) može se zaključiti sledeće:

$$T_r/T_r^* > 1 \Rightarrow \frac{d\Delta\Psi_{dr0}}{dx} < 0 \Rightarrow \Psi_{dr0} \text{ je uvek manji od zadatog i monotono opada sa porastom } |I_{qs0}/I_{ds0}| ,$$

$$T_r/T_r^* < 1 \Rightarrow \frac{d\Delta\Psi_{dr0}}{dx} > 0 \Rightarrow \Psi_{dr0} \text{ je uvek veći od zadatog i monotono raste sa porastom } |I_{qs0}/I_{ds0}| .$$

Pogodniji izraz za prikaz varijacije  $q$  komponente fluksa rotora usled promene odnosa zadatih komponenti vektora struje statora i konstantom greškom  $T_r^*$  glasi:

$$\Delta\Psi_{qr0} = \left(1 - \frac{T_r}{T_r^*}\right) L_m I_{ds0} \frac{\left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}\right)}{1 + \left(\frac{T_r}{T_r^*}\right)^2 \left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}\right)^2} . \quad (3.13.)$$

Usvajanjem (3.10) dobija se sledeći izraz za grešku  $q$  komponente fluksa rotora:

$$\Delta\Psi_{qr0} = (1 - a) L_m I_{ds0} \frac{x}{1 + a^2x^2} . \quad (3.14.)$$

Analizom prvog izvoda po  $x$  funkcije date izrazom (3.14):

$$\frac{d\Delta\Psi_{qr0}}{dx} = (1-a)L_m I_{ds0} \frac{1-a^2x^2}{(1+a^2x^2)^2}, \quad (3.15.)$$

dolazimo do ekstremne tačke

$$x = \pm 1/a \quad \text{ili} \quad \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = \pm \frac{T_r^*}{T_r}. \quad (3.16.)$$

Funkcija data izrazom (3.15) je neparna u odnosu na  $x = I_{qs0}/I_{ds0}$  i ima dve ekstremne tačke.

A) Za  $I_{qs0} > 0$  ekstremna tačka je  $x = 1/a$ .

Drugi izvod funkcije date izrazom (3.15) po  $x$  glasi:

$$\frac{d^2\Delta\Psi_{qr0}}{dx^2} = (1-a)L_m I_{ds0} \frac{-6a^2x - 4a^4x^3 + 2a^6x^5}{(1+a^2x^2)^4} \quad (3.17.)$$

i njegova vrednost u tački  $x = 1/a$ ,

$$\left. \frac{d^2\Delta\Psi_{qr0}(x,a)}{dx^2} \right|_{x=1/a} = -(1-a)L_m I_{ds0} \frac{a}{2}, \quad (3.18.)$$

ukazuje sledeće :

$$\text{za } T_r/T_r^* > 1 \Rightarrow \left. \frac{d^2\Delta\Psi_{qr0}\left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}, \frac{T_r^*}{T_r}\right)}{dx^2} \right|_{\left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = \frac{T_r^*}{T_r}\right)} > 0 \Rightarrow \Psi_{qr0} \text{ ima minimum i } \Psi_{qr0} < 0,$$

$$\text{za } T_r/T_r^* < 1 \Rightarrow \left. \frac{d^2\Delta\Psi_{qr0}\left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}, \frac{T_r^*}{T_r}\right)}{dx^2} \right|_{\left(\frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = \frac{T_r^*}{T_r}\right)} < 0 \Rightarrow \Psi_{qr0} \text{ ima maksimum i } \Psi_{qr0} > 0.$$

(3.19.)

B) Za  $I_{qs0} < 0$  ekstremna tačka je  $x = -1/a$ .

Vrednost drugog izvoda funkcije date izrazom (3.15) u toj tački:

$$\left. \frac{d^2\Delta\Psi_{qr0}(x,a)}{dx^2} \right|_{x=-1/a} = (1-a)L_m I_{ds0} \frac{a}{2} \quad (3.20.)$$

ukazuje da:

$$T_r/T_r^* > 1 \Rightarrow \frac{d^2 \Delta \Psi_{qr0} \left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}, \frac{T_r^*}{T_r} \right)}{dx^2} \bigg|_{\left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = -\frac{T_r^*}{T_r} \right)} > 0 \Rightarrow \Psi_{qr0} \text{ ima maksimum i}$$

važi  $\Psi_{qr0} > 0$ .

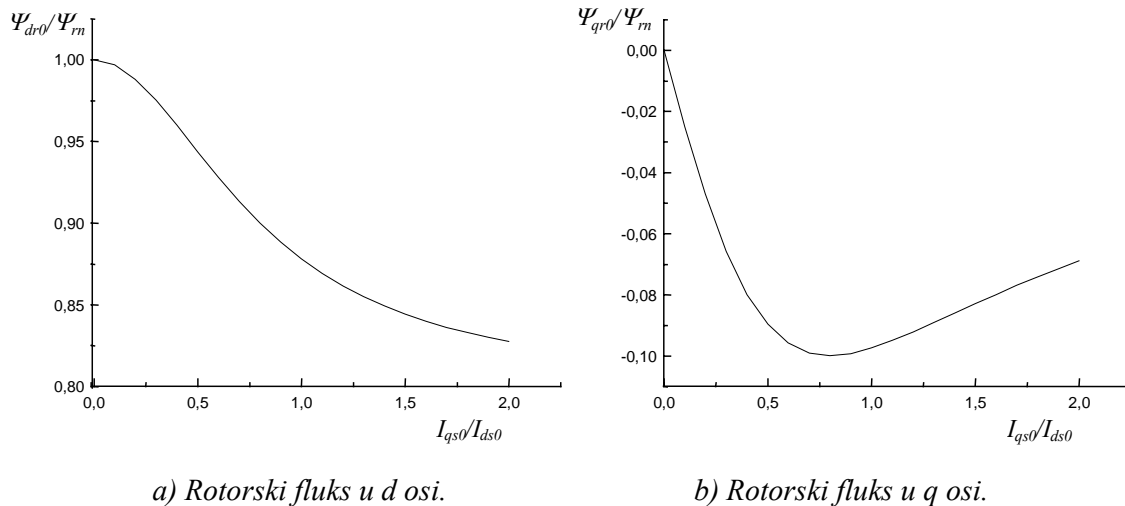
$$T_r/T_r^* < 1 \Rightarrow \frac{d^2 \Delta \Psi_{qr0} \left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}}, \frac{T_r^*}{T_r} \right)}{dx^2} \bigg|_{\left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = -\frac{T_r^*}{T_r} \right)} < 0 \Rightarrow \Psi_{qr0} \text{ ima minimum i}$$

važi  $\Psi_{qr0} < 0$ .

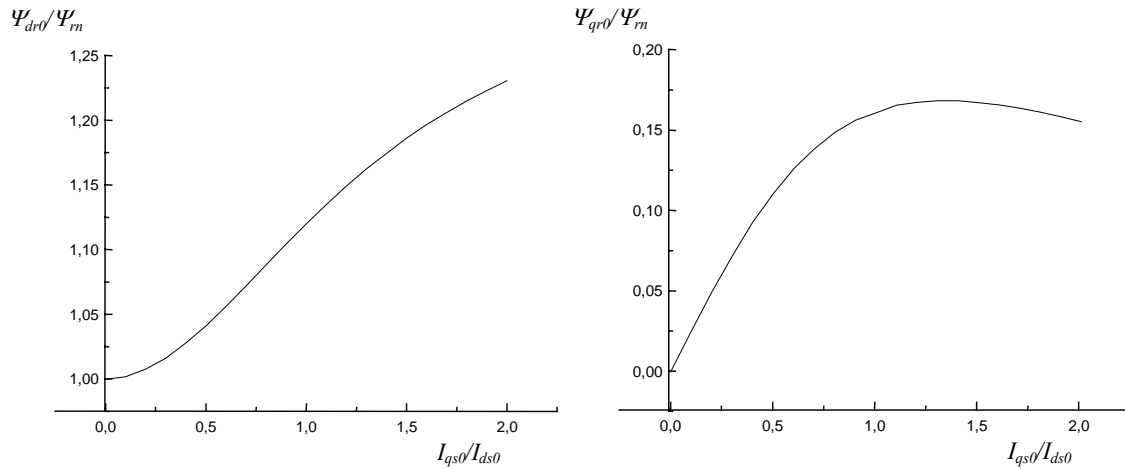
(3.21.)

Grafički prikaz promene stacionarnih vrednosti komponenti vektora rotorskog fluksa pri promeni odnosa stacionarnih vrednosti zadatih struja statora i konstantnoj grešci u parametru vremenske konstante rotora dat je na slikama 3.1 i 3.2. Da bi se jasnije prikazao uticaj greške u pomenutom parametru uticaj zasićenja magnetnih kola mašine nije razmatran. Takođe, slike prikazuju promenu stacionarnih vrednosti rotorskog fluksa samo za pozitivne odnose struja statora. U slučaju negativnih odnosa struja statora (za  $I_{qs0} < 0$ ) funkcija rotorskog fluksa u  $d$  osi  $\Psi_{dr0}$  je parna po  $I_{qs0}/I_{ds0}$  i simetrična je u odnosu na osu fluksa. Za komponentu fluksa rotora  $q$  ose  $\Psi_{qr0}$  važi da je neparna funkcija po odnosu struja statora  $I_{qs0}/I_{ds0}$  i da je simetrična u odnosu na koordinatni početak.

Na slikama je razmatrana promena odnosa struja statora u opsegu 0 - 2, za dva granična slučaja relativne greške parametra vremenske konstante rotora  $\Delta T_r/T_r = \pm 25\%$ . Rezultati su prikazani relativno u odnosu na nominalnu vrednost fluksa rotora.



Sl. 3.1. Kretanje ustaljenih vrednosti fluksa rotora u pogonu sa relativnom greškom  $T_r/T_r^* = 1.25$  pri promeni odnosa  $I_{qs0}/I_{ds0}$ .



a) Rotorski fluks u d osi.

b) Rotorski fluks u q osi.

Sl. 3.2. Kretanje ustaljenih vrednosti fluksa rotora u pogonu sa relativnom greškom  $T_r/T_r^* = 0.75$  pri promeni odnosa  $I_{qs0}/I_{ds0}$ .

Funkcionalne zavisnosti prikazane na slikama 3.1 i 3.2 pokazuju značajne promene stacionarnih vrednosti komponenti fluksa rotora sa promenom odnosa struja statora, pri istoj relativnoj grešci u parametru rotorskog kola. Ovo praktično znači promenu sa ustaljenom vrednošću momenta opterećenja na vratilu. Pogon koji nije opterećen nije osetljiv na grešku u parametru vremenske konstante rotora. Pri umanjenju opterećenja proračunata i stvarna učestanost klizanja postaju bliske nuli i moguća greška postaje minimalna.

Autori [A14] predlažu upravo razliku između ostvarenog i zadatog fluksa rotora kao pogodnu informaciju za korekciju parametra vremenske konstante rotora. Na osnovu terminalnih veličina, amplituda rotorskog fluksa se može proceniti i uporediti sa zadatom. Dobijena razlika je relativno mala za male odnose struja statora tako da se ovaj algoritam ne može primeniti pri malim opterećenjima na vratilu. Promena osetljivosti ove razlike sa opterećenjem takođe čini da vreme konvergencije ovog algoritma varira. Konačno, predloženi algoritam korekcije  $T_r^*$  je osetljiv i na grešku u proceni ostvarenog fluksa rotora. Iz pomenutog razloga ovaj algoritam ne može da radi pri brzinama rotora bliskim nuli za koje dolazi do značajne greške u procenjenom fluksu rotora.

### 3.1.2.2. Varijacija komponenti fluksa rotora uz nepromenjen odnos zadatih struja statora pri promeni odnosa $T_r/T_r^*$

Ukoliko pogon radi sa konstantom vrednošću zadatog fluksa rotora i nepromenjenom srednjom vrednošću radnog momenta odnos stacionarnih vrednosti struja statora ostaje nepromenjen. Promena temperature rotora dovodi do promene rotorske otpornosti i vremenom dolazi do greške u korišćenoj  $T_r^*$ . Od interesa je ispitati varijaciju stacionarnih vrednosti komponenti rotorskog fluksa pri promeni odstupanja parametra vremenske konstante rotora uz konstantan odnos zadatih komponenti struja statora.

Ako u jednačini (3.9) usvojimo:

$$x = \frac{T_r}{T_r^*} \quad \text{i} \quad a = \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} = \text{const} \quad , \quad (3.22.)$$

dobijamo funkcionalnu zavisnost greške  $d$  komponente fluksa rotora od odnosa  $T_r/T_r^*$ , sa odnosom struja statora kao parametrom:

$$\Delta\Psi_{dr0} = L_m I_{ds0} \frac{x(1-x)a^2}{1+x^2a^2}. \quad (3.23.)$$

Prvi izvod funkcije date izrazom (3.23) po  $x$  glasi:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\Psi_{dr0}}{dx} &= L_m I_{ds0} \frac{d}{dx} \left( \frac{x(1-x)a^2}{1+x^2a^2} \right) \\ &= -L_m I_{ds0} \frac{a^2(a^2x+2x-1)}{(1+x^2a^2)^2} \end{aligned} \quad (3.24.)$$

Na osnovu (3.24) dobija se ekstremna tačka (3.23),  $x_{1,2} = \frac{-1 + \sqrt{1+a^2}}{a^2}$ .

Uticaj odnosa stvarne i korišćene vrednosti parametra vremenske konstante rotora na rotorski fluks u  $d$  osi prikazan je sledećim nejednačinama:

$$\frac{T_r}{T_r^*} < \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{I_{qso}^2}{I_{dso}^2}}}{\frac{I_{qso}^2}{I_{dso}^2}} \quad \text{promena fluksa rotora u } d \text{ osi je monotono rastuća,}$$

$$\frac{T_r}{T_r^*} > \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{I_{qso}^2}{I_{dso}^2}}}{\frac{I_{qso}^2}{I_{dso}^2}} \quad \text{promena fluksa rotora u } d \text{ osi je monotono opadajuća.}$$

U praksi je interesantan opseg kojem pripadaju moguće relativne greške parametra u opsegu  $\pm 25\%$ , za koje važi da je funkcija za stacionarnu vrednost  $d$  komponente fluksa rotora (3.23) monotono opadajuća sa porastom relativne greške. Treba uočiti da je funkcija (3.23) parna po odnosu  $I_{qso}/I_{dso}$  i zaključak važi i za negativne komande elektromagnetnog momenta.

Ako u jednačini (3.13) usvojimo (3.22) dobijamo funkcionalnu zavisnost greške u stacionarnoj vrednosti  $q$  komponente fluksa rotora od relativne greške u vremenskoj konstanti rotora sa odnosom struja statora kao parametrom:

$$\Delta\Psi_{qr0} = L_m I_{ds0} \frac{(1-x)a}{1+x^2a^2}. \quad (3.25.)$$

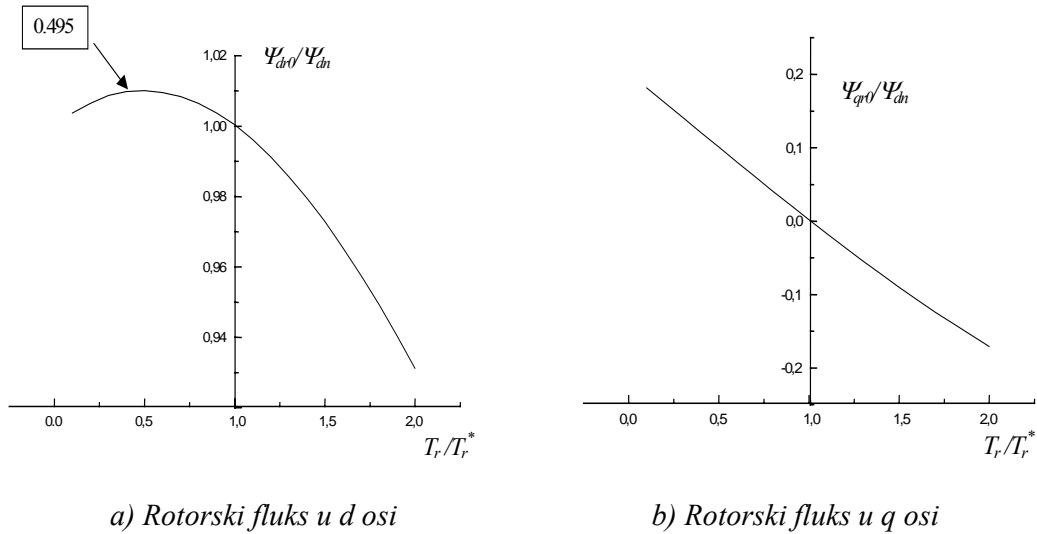
Prvi izvod funkcije (3.25),

$$\frac{d\Delta\Psi_{qr0}}{dx} = -L_m I_{ds0} \frac{a + 2a^3x - a^3x^2}{(1+x^2a^2)^2}, \quad (3.26.)$$

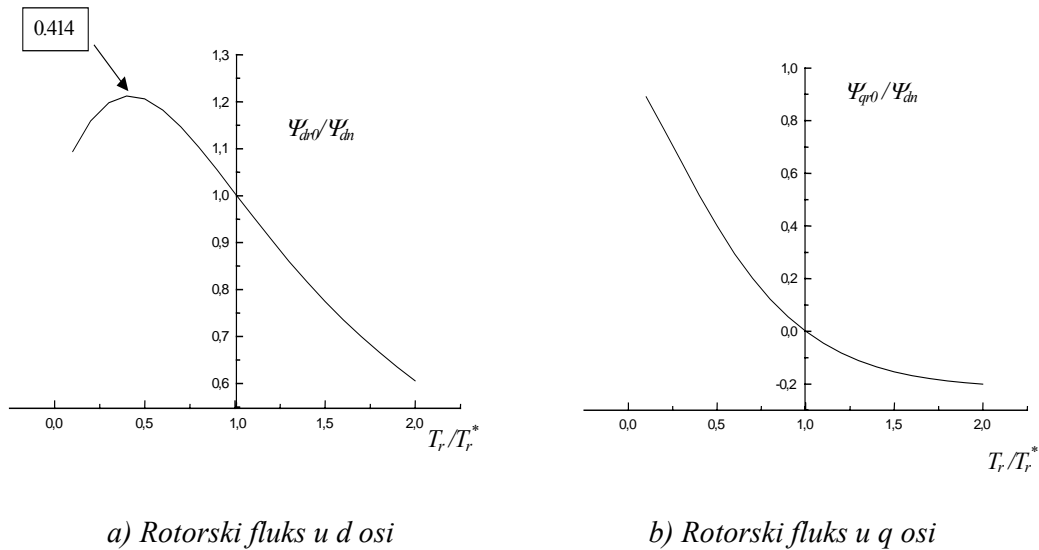
je manji od nule u opsegu relativne greške od interesa. Funkcija stacionarne vrednosti  $q$  komponente fluksa rotora po relativnom odnosu  $T_r/T_r^*$ , za vrednosti  $T_r/T_r^*$  od interesa, je monotono opadajuća.



Na slikama 3.3 i 3.4 prikazane su varijacije  $d$  i  $q$  komponente fluksa rotora sa promenom relativne greške u parametru vremenske konstante rotora za dva različita odnosa struja statora.



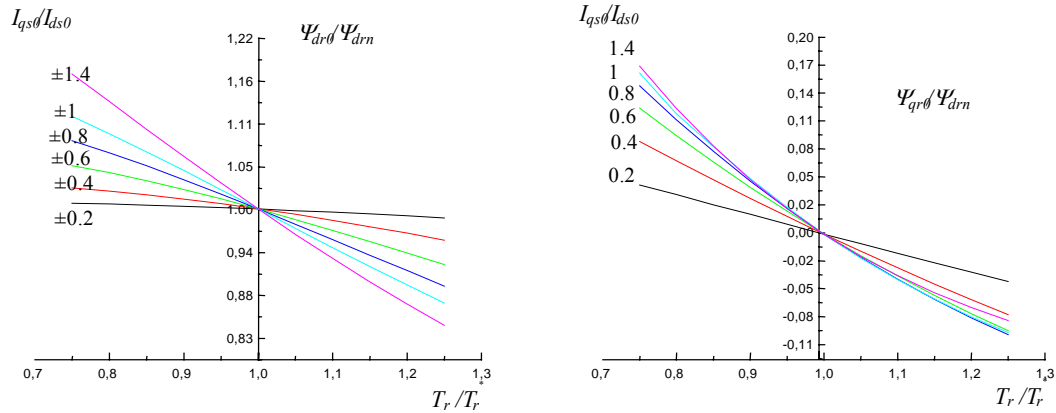
Sl. 3.3. Varijacija ustaljenih vrednosti fluksa rotora u pogonu za odnos  $I_{qs0}/I_{ds0} = 0.2$  pri promeni relativne greške  $T_r/T_r^*$  u opsegu  $[-100\%, +100\%]$ .



Sl. 3.4. Varijacija ustaljenih vrednosti fluksa rotora u pogonu za odnos  $I_{qs0}/I_{ds0} = 1$  pri promeni relativne greške  $T_r/T_r^*$  u opsegu  $[-100\%, +100\%]$ .

Iz sprovedene analize može se zaključiti da u opsegu od interesa,  $|T_r/T_r^* - 1| < 0.25$ , stacionarne vrednosti  $\Psi_{dr0}$  i  $\Psi_{qr0}$  opadaju sa porastom odnosa  $T_r/T_r^*$ . Ovo važi za pozitivne vrednosti komande momenta. Za negativne komande momenta  $\Psi_{dr0}$  opada a  $\Psi_{qr0}$  raste sa porastom odnosa  $T_r/T_r^*$ . Ilustracija uticaja stacionarnih vrednosti struja statora kao parametra

na zavisnost komponenti fluksa rotora od relativne greške u  $T_r^*$  data je na slici 3.5. Posmatran je opseg relativne greške od praktičnog interesa  $|T_r/T_r^* - 1| < 0.25$ .



a) Rotorski fluks u d osi

b) Rotorski fluks u q osi

Sl. 3.5. Varijacija stacionarnih vrednosti komponenti fluksa rotora pri promeni relativne greške  $|T_r/T_r^* - 1|$  u opsegu  $[-25\%, +25\%]$  i odnos  $I_{qs0}/I_{ds0}$  kao parametar.

Sprovedena analiza pokazuje da se uticaj greške u izabranom parametru  $T_r^*$  na obe komponente ostvarenog fluksa rotora u stacionarnom stanju ne može zanemariti. Takođe je pokazano da ova osetljivost pogona na promenu vremenske konstante rotora raste sa opterećenjem.

### 3.2. Uticaj odstupanja parametra vremenske konstante rotora na ostvareni elektromagnetni moment

Elektromagnetni moment nastaje kao vektorski proizvod magnetopobudne sile statora i fluksa rotora. Greška u računu klizanja utiče na amplitudu ostvarenog rotorskog fluksa i na ugao između vektora magnetopobudne sile statora i fluksa rotora. Time se ujedno menja i vrednost ostvarenog elektromagnetnog momenta (2.18).

Po završetku prelaznih procesa ( $t \gg T_r$ ) jednačina (2.18) postaje:

$$m_{el0} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{dr0} I_{qs0} - \Psi_{qr0} I_{ds0}), \quad (3.27.)$$

gde je  $m_{el0}$  stacionarna vrednost elektromagnetnog momenta nepodešenog sistema pri konstantnim zadatim strujama statora  $I_{ds0}$  i  $I_{qs0}$ . Ako se komponente fluksa rotora date jednačinama (3.5) uvrste u (3.27) dobija se sledeći izraz:

$$m_{elo} = m_{elo}^* \frac{\frac{T_r}{T_r^*} \left( 1 + \left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right)^2 \right)}{1 + \left( \frac{T_r}{T_r^*} \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right)^2} \quad (3.28.)$$

za stacionarnu vrednost ostvarenog elektromagnetnog momenta. Pri tome zadata vrednost elektromagnetnog momenta glasi:

$$m_{elo}^* = \frac{3}{2} p \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds0} I_{qs0}. \quad (3.29.)$$

Zadati momenat je ostvaren samo u slučaju  $T_r^* = T_r$ . U slučaju greške u parametra  $T_r^*$  funkcija između ostvarenog i zadatog el. momenta postaje nelinearna (3.28). Ako se koristi pravilna vrednost induktivnosti magnećenja odnos ostvarenog i zadatog elektromagnetnog momenta isključivo zavisi od relativne greške u  $T_r^*$  i odnosa zadatih struja. Analizom promenljivog dela izraza (3.29) dolazi se do sledećih nejednačina:

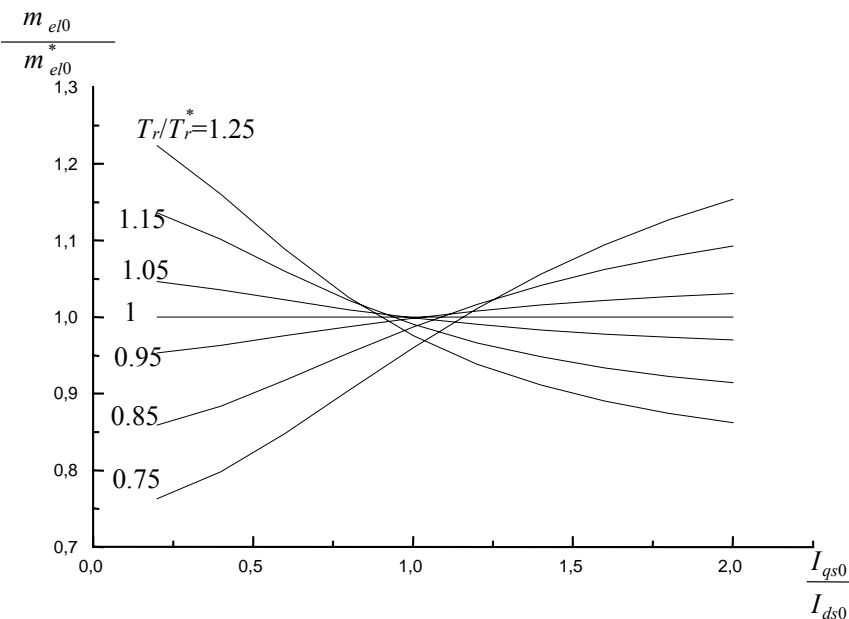
$$\frac{m_{el0}}{m_{elo}^*} \ll 1 \quad \Leftrightarrow \quad \left( \frac{T_r}{T_r^*} - 1 \right) \left[ 1 - \frac{T_r}{T_r^*} \left( \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right)^2 \right] \ll 0$$

za koje važe tri moguća slučaja:

$$\begin{aligned}
 1. \quad & T_r^* = T_r \quad \vee \quad \left| \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right| = \sqrt{\frac{T_r^*}{T_r}} \quad \Rightarrow \quad m_{el0} = m_{elo}^*, \\
 2. \quad & \left. \begin{array}{l} T_r^* > T_r \quad \wedge \quad \left| \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right| < \sqrt{\frac{T_r^*}{T_r}} \\ T_r^* < T_r \quad \wedge \quad \left| \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right| > \sqrt{\frac{T_r^*}{T_r}} \end{array} \right\} \quad \Rightarrow \quad m_{el0} > m_{elo}^*, \\
 3. \quad & \left. \begin{array}{l} T_r^* < T_r \quad \wedge \quad \left| \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right| > \sqrt{\frac{T_r^*}{T_r}} \\ T_r^* > T_r \quad \wedge \quad \left| \frac{I_{qs0}}{I_{ds0}} \right| < \sqrt{\frac{T_r^*}{T_r}} \end{array} \right\} \quad \Rightarrow \quad m_{el0} < m_{elo}^*. \quad (3.30.)
 \end{aligned}$$

Izrazi dati u (3.30) pokazuju da greška stacionarne vrednosti momenta, za razliku od greške stacionarnih vrednosti komponenti rotorskog fluksa, može porastom opterećenja pogona da promeni i znak.

Matematička analiza kretanja stacionarne vrednosti momenta pri neusklađenom parametru  $T_r^*$  potvrđena je putem računarskih simulacija. Zadata je konstantna komanda fluksa i za više vrednosti zadatog momenta zapisane su izlazne stacionarne vrednosti razvijenog elektromagnetnog momenta. Ispitana su sledeća relativna odstupanja parametra vremenske konstante rotora: -25 %, -15 %, -5%, 0%, 5%, 15% i 25%. Odnos struja statora je zadržan u opsegu 0 do 2. Na slici 3.6 prikazana je varijacija odnosa stacionarnih vrednosti razvijenog i zadatog elektromagnetnog momenta za pomenute kombinacije odnosa struja statora i odnosa stvarne i korišćene vremenske konstante rotora.



Sl. 3.6. Odnos ustaljenih vrednosti razvijenog i zadatog momenta za različite odnose struja statora i odnos  $T_r/T_r^*$  kao parametar.

Krive momenta prikazane na slici 3.6 mogu se objasniti na sledeći način. Na vrednost stacionarnog momenta utiču ostvarena amplituda vektora rotorskog fluksa i ugao između vektora rotorskog fluksa i magnetopobudne sile statora koji se suprotno menjaju sa greškom u korišćenom parametru. Ako je korišćen parametar veći od stvarnog u mašini ( $T_r^* > T_r$ ), računa se manje klizanje što izaziva povećanu amplitudu rotorskog fluksa i manji ugao između ova dva vektora. U suprotnom slučaju ( $T_r^* < T_r$ ), izračunato je veće klizanje od potrebnog što izaziva umanjene amplitude rotorskog fluksa i veći ugao između ova dva vektora. Obe veličine ujedno zavise i od odnosa struja statora i čine izlazni momenat izrazito zavisnim od tog odnosa. Na slici treba zanemariti granični slučaj odnos  $I_{qs0}/I_{ds0}=0$ , za koji je zadati moment jednak nuli i prikaz  $m_{elo}/m_{elo}^*$  nema smisla. Nedostatak ove matematičke analize se ogleda u nemodelovanom zasićenju magnetnog kola. Direktan uticaj zasićenja na krive sa slike 3.6 ogleda se u umanjenu odnosa razvijenog i zadatog momenta većih od jedan.

Interesantno je analizirati i promenu znaka greške pri porastu odnosa komponenti struje statora. Motori manje snage imaju manji odnos  $I_{qs0}/I_{ds0}$  usled relativno veće struje magnećenja. Oni uobičajeno rade u oblasti  $I_{qs0}/I_{ds0} < 1$  i kod njih ovaj efekat dolazi do izražaja samo u oblasti slabljenja polja. Za veće motore postoji veća mogućnost promene znaka greške momenta u radu sa momentima opterećenja ispod nominalnog. U radu [A14] autori predlažu korišćenje razlike između zadatog i razvijenog momenta za korekciju parametra vremenske konstante rotora. Mogućnost promene znaka greške ostvarenog momenta pri istoj vrednosti parametra  $T_r^*$  uveliko komplikuje primenu ovog mehanizma za korekciju.

### 3.3. Uticaj odstupanja parametra $T_r^*$ na statičke karakteristike pogona sa regulisanom brzinom

U prethodnom poglavlju analiziran je uticaj nepodešenosti parametra vremenske konstante rotora na stacionarne vrednosti komponenti rotorskog fluksa i razvijenog elektromagnetnog momenta pri konstantnoj komandi fluksa i elektromagnetnog momenta. U pogonu sa regulisanom brzinom situacija je drugačija, održavaju se konstantnim komanda fluksa i razvijeni elektromagnetni momenat. Ovo proizilazi iz činjenice da će regulator brzine, u stacionarnom stanju zadati potrebnu komandu momenta da bi se savladao momenat opterećenja pri zadatoj brzini. Stacionarna vrednost izlaznog elektromagnetnog momenta, potrebna za održavanje konstantne brzine uz prisustvo momenta opterećenja na vratilu motora ( $m_{opt}$ ) iznosi:  $m_{el0} = m_{opt}$ . U pravilno podešenom pogonu sa asinhronim motorom i vektorskim upravljanjem postoji linearna veza između zadatog i razvijenog elektromagnetnog momenta  $m_{el0} = C m_{el0}^*$ . Ova jednostavna veza važi i u stacionarnom i u dinamičkom režimu rada pogona i olakšava sintezu regulatora brzine i pozicije. Da bi se ostvario zadati elektromagnetni momenat stacionarna vrednost  $q$  komponenta struje statora iznosi:

$$I_{qs0} = \frac{2}{3} \frac{1}{p} \frac{L_r}{L_m^2} \frac{1}{I_{ds0}} m_{el0}^* . \quad (3.34)$$

Izračunato klizanje, takođe je vezano za vrednost zadatog momenta i glasi:

$$\omega_{k0} = \frac{1}{T_r^*} \frac{L_r}{(L_m I_{ds0})^2} \frac{2}{3p} m_{el0}^* . \quad (3.35)$$

U slučaju nepodešenog parametra  $T_r^*$  veza između stacionarnih vrednosti zadatog i ostvarenog elektromagnetnog momenta postaje, na osnovu (3.31):

$$m_{el0} = m_{el0}^* \left( \frac{T_r}{T_r^*} \right) \frac{1 + (\omega_{k0} T_r^*)^2}{1 + \left( \frac{T_r}{T_r^*} \right)^2 (\omega_{k0} T_r^*)^2} . \quad (3.36)$$

Ako se usvoji  $x = T_r/T_r^*$  i uvaži jednakost  $m_{el0} = m_{opt}$ , dobija se veza između stacionarnih vrednosti zadatog, ostvarenog momenta, kao i momenta opterećenja:

$$m_{el0} = m_{el0}^* x \frac{1 + (hm_{el}^*)^2}{1 + (\alpha hm_{el}^*)^2} = m_{opt} , \quad (3.37)$$

$$\text{gde je: } h = \frac{2}{3p} \frac{L_r}{(L_m I_{ds0})^2} . \quad (3.38)$$

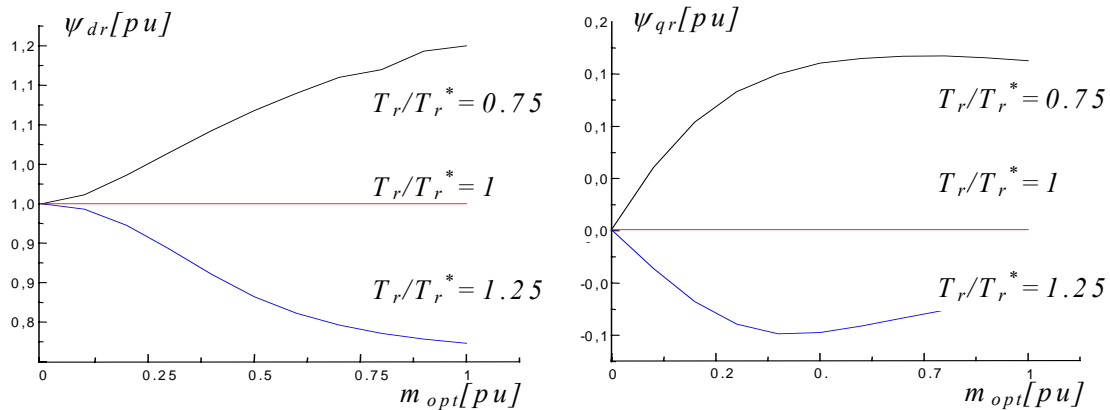
Rešavanjem jednačine (3.37) po  $m_{el0}^*$  dobija se potrebna srednja vrednost izlaza regulatora brzine, tj. zadata stacionarna vrednost momenta, za održavanje konstante brzine pri nametnutom momentu opterećenja  $m_{opt}$ . Pogodan oblik jednačine (3.37) za rešavanje numeričkim putem glasi:

$$\left( m_{el0}^* \right)^3 - \left( m_{el0}^* \right)^2 x m_{opt} + m_{el0}^* \frac{1}{h^2} - m_{opt} \frac{1}{x h^2} = 0 . \quad (3.39)$$

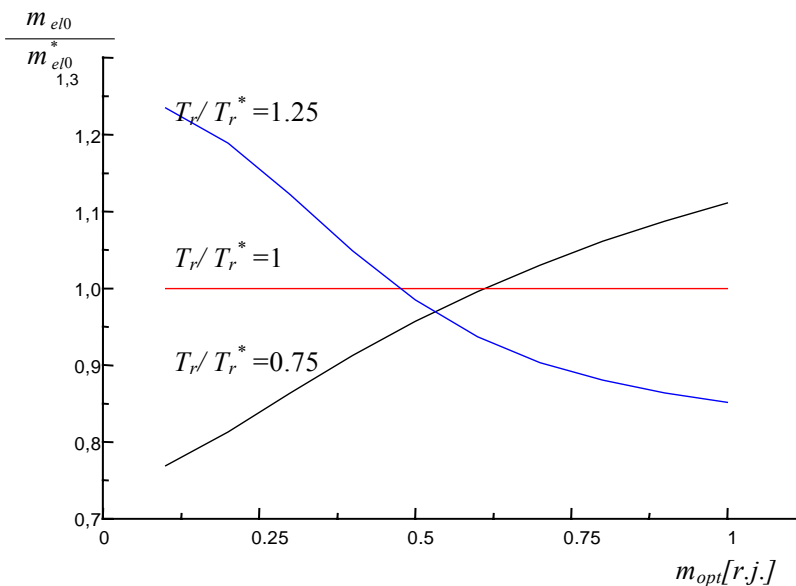
Jednačina (3.39) ima tri korena od kojih su dva konjugovano kompleksna i nemaju fizički smisao. Treći koren je realan i predstavlja potrebnu komandu elektromagnetnog momenta za održavanje konstantne brzine rotora.

Po okončanju prelaznih procesa u konturi regulatora brzine uspostavlja se stacionarna komanda momenta, realni koren (3.39), koja određuje potrebnu  $q$  komponentu statorske struje (3.34) i izračunato klizanje (3.35). Sve navedene veličine se razlikuju od potrebnih u pravilno podešenom pogonu. Ovim je, uz poznatu komandu fluksa, definisana stacionarna radna tačka pogona sa nepodešenim parametrom  $T_r^*$  u čijoj funkciji, poglavlje 3.1.2, variraju i ostvarene stacionarne vrednosti komponenti fluksa rotora.

Prikazana analiza pokazuje da u režimu regulisane brzine, za razliku od momentog režima rada pogona sa nepodešenim parametrom  $T_r^*$ , ne postoji jednostavna veza između potrebne komande momenta i momenta opterećenja. Samim tim se usložnjava i veza između zadatog i ostvarenog rotorskog fluksa. Iz tog razloga je efekat nepodešenosti parametra  $T_r^*$  na rad pogona u režimu regulisane brzine prikazan grafički. Svi grafici na x-osi imaju normalizovani momenat opterećenja, na y-osi promenljivu od interesa čiju promenu prikazuju za tri relativne greške parametra rotorske otpornosti  $|T_r/T_r^* - 1| = -25\%$ ,  $0\%$  i  $+25\%$ . Na slici 3.9 prikazane su  $d$  i  $q$  komponente stacionarnog fluksa rotora. Na slici 3.7 prikazan je odnos stacionarnih vrednosti ostvarenog i zadatog momenta.

a) Rotorski fluks u  $d$  osib) Rotorski fluks u  $q$  osi

Sl. 3.7 Varijacija komponenti fluksa rotora sa promenom momenta opterećenja u pogonu sa regulisanom brzinom.



Sl. 3.8. Varijacija odnosa stacionarnih vrednosti ostvarenog i zadatog momenta sa promenom momenta opterećenja u pogonu sa regulisanom brzinom.

Normalizovane vrednosti momenta opterećenja za koje greška statičkog pojačanja momenta menja znak su različite za različite motore. Presečnu vrednost ( $m_{opt} \approx 0.5$ ) sa slike 3.8 treba uzeti uslovno. Iako je odnos nominalnih vrednosti komponenti vektora struje statora različit za različite motore, generalno se može zaključiti sledeće. Postoji veliki broj mogućih vrednosti relativne greške u  $T_r^*$  i momenta opterećenja za koje dolazi do umanjenja statičkog pojačanja momenta. Ovaj efekat je dodatno izražen iz dva razloga. Usled porasta temperature rotora dolazi do porasta stvarne rotorske otpornosti i negativna greška parametra  $T_r^*$  se češće pojavljuje u praksi. Takođe, u ovoj analizi nije uzet u obzir efekat zasićenja magnetnih kola koji smanjuje amplitude ostvarenih komponenti rotorskog fluksa i dodatno obara ostvorena statička pojačanja momenta. Za umanjeno statičko pojačanje momenta, pri konstantnom momentu opterećenja, dolazi do povećanja potrebne komande momenta i samim tim i amplitude statorskih struja. Ovaj efekat značajno povećava gubitke u motoru i u samom pretvaraču.

Analiza izvršena u ovom poglavlju pokazuje da se efekat greške u parametru vremenske konstante rotora ne može zanemariti. Optimalan rad IFOC pogon zavisi od ovog parametra i podrazumeva njegovu tačnu vrednost. Ukoliko ovo nije tačno zadate vrednosti fluksa rotora nisu ostvarene. Time je ugrožena regulacija nivoa fluksa koja je neophodna u raznim primenama asinhronog motora i obezbeđuje optimalan rad i umanjuje radnu temperaturu motora. Ovim je rad pogona narušen kako u režimu rada sa konstantnim momentom tako i u oblasti slabljenja polja. Sa druge strane, potencijalno se umanjuje i statičko pojačanje momenta. Ovo je posebno važno u električnim pogonima koji rade na samoj granici strujnog kapaciteta ugrađenih energetski komponenti. U ovim pogonima svaka greška u parametru vremenske konstante rotora koja umanjuje statičko pojačanje momenta dovodi do uvećanja gubitaka u poluprovodničkim komponentama ali ujedno i redukuje maksimalni mogući elektromagnetni momenat koji pogon može da razvije.