

8. Procena vremenske konstante rotora u pogonu bez davača položaja

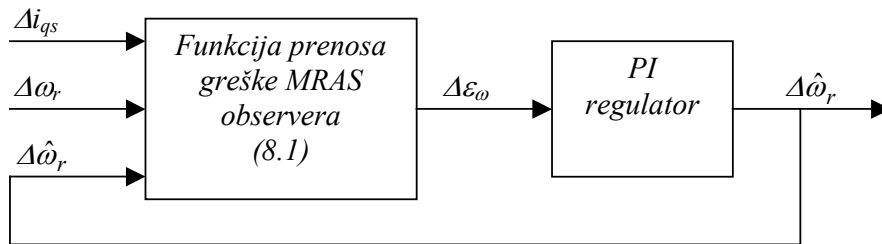
U pogonu bez davača na vratilu položaj fluksa rotora i mehaničku brzinu rotora je neophodno proceniti na osnovu terminalnih veličina. Za razliku od procene položaja fluksa rotora, procena brzine rotora jeste osetljiva na grešku u parametru vremenske konstante rotora. Ova greška nije prihvatljiva u velikom broju primena pogona sa veoma uskim specifikacijama po pitanju razvijene brzine rotora. U tim pogone je neophodno ugraditi mehanizam za korekciju parametra vremenske konstante rotora i time umanjiti stacionarnu vrednost greške brzine rotora.

U literaturi [A50] se pokazuje da u stacionarnom stanju pogona nije moguće simultano proceniti učestanost klizanja rotora i parametar rotorskog kola. Autori pokazuju da je za paralelnu procenu ove dve veličine neophodna promena stanja u pogonu i predlažu korekciju parametra rotora samo tokom tranzijenta u fluksu rotora nastalog promenom zadate brzine. Utisnuti test signal u d struju statora takođe dovodi do varijacije rotorskog fluksa i ostvaruje uslove za paralelnu korekcije brzine i parametra rotora. Različiti oblici test signala, uglavnom varijacije prostoperiodičnog, su predloženi u literaturi [A38], [A52].

U ovom poglavlju se analizira originalan način procene T_r koji je moguće koristiti i u *quasi* stacionarnom stanju pogona. Pretpostavlja se da je parametar T_r^* unapred korigovan u skladu sa komandom fluksa (model na slici 6.6) i da se ista ne menja tokom dalje procene. U toku daljeg rada u okolini stacionarne radne tačke pogon se zagreva i dodatna promena T_r je neminovna. Iako su zadate konstante vrednosti fluksa i brzine rotora, male promene greške MRAS observera brzine ($\Delta\varepsilon_\omega$) su moguće. Ove promene su posledica promena signala stvarne ($\Delta\omega_r$) i procenjene brzine ($\Delta\hat{\omega}_r$), kao i malih promena q struje statora (Δi_{qs}). Radi preglednosti, linearizovana funkcija prenosa MRAS greške je prepisana u (8.1).

$$\Delta\varepsilon_\omega = \frac{\Psi_{dro}^2 \left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2} (\Delta\omega_r - \Delta\hat{\omega}_r) + \frac{L_m \Psi_{dro} \left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \quad (8.1.)$$

Dinamiku malih signala u MRAS observeru brzine je moguće opisati modelom na slici 8.1.



Sl. 8.1. Dinamika malih signala u MRAS observeru brzine.

Zavisnost $\Delta\varepsilon_\omega$ od malih promena Δi_{qs} je uslovna, javlja se samo u slučaju da je parametar vremenske konstante rotora korišćen u strujnom modelu rotorskog fluksa netačan. Upravo ova

uslovna zavisnost navodi na mogućnost procene greške parametra T_r^* jednostavnom korelacijom malih signala struje q ose i signala greške $\Delta\varepsilon_\omega$. Da bi korelacija ova dva signala bila jasnija neophodno je analizirati sve signale koji postoje u sistemu datom na slici 8.1.

Signal procenjene brzine nastaje delovanjem povratne sprege u estimatoru. Ovaj signal je u funkciji greške $\Delta\varepsilon_\omega$ i moguće je eliminisati ga iz jednačina. U MRAS observeru deluje PI regulator kojim se zatvara povratna sprega po procenjenoj brzini rotora:

$$\Delta\hat{\omega}_r = \frac{K_p p + K_i}{p} \Delta\varepsilon_\omega. \quad (8.2.)$$

Na osnovu ove zavisnosti za funkcija spregnutog prenosa greške $\Delta\varepsilon_\omega$ se dobija:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_\omega &= \frac{K'_{mras} G_1(p)}{1 + \Psi_{dro}^2 G_2(p)} \Delta\omega_r + \frac{K'_{mras} L_m}{\Psi_{dro}} \frac{G_1(p) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right)}{1 + K'_{mras} \frac{K_p p + K_i}{p} G_2(p)} \Delta i_{qs} \\ &= \frac{K'_{mras} G_1(p)}{1 + K'_{mras} G_2(p)} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right], \end{aligned} \quad (8.3.)$$

gde su:

$$G_1(p) = \frac{\left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2}, \quad G_2(p) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2}, \quad K'_{mras} = K_{mras} \Psi_{dro}^2. \quad (8.4.)$$

Nakon daljeg uređenja izraza (8.3), linearizovana zavisnost greške MRAS observera brzine od nezavisnih ulaznih signala $\Delta\omega_r$ i Δi_{qs} glasi:

$$\Delta\varepsilon_\omega = \frac{K'_{mras} p \left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{p \left(\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2 \right) + K'_{mras} (pK_p + K_i) \left(p + \frac{1}{T_r} \right)} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right]. \quad (8.5.)$$

Slična funkcija spregnutog prenosa važi i za signal procenjene brzine:

$$\Delta\hat{\omega}_r = \frac{K'_{mras} (pK_p + K_i) \left(p + \frac{1}{T_r} \right)}{p \left(\left(p + \frac{1}{T_r} \right)^2 + \omega_{k0}^2 \right) + K'_{mras} (pK_p + K_i) \left(p + \frac{1}{T_r} \right)} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right]. \quad (8.6.)$$

Ove funkcionalne zavisnosti se mogu dodatno uprostiti odgovarajućim izborom pojačanja zatvorene povratne sprege MRAS estimatora. U literaturi [G1] se predlaže relativno jednostavno podešavanje parametara MRAS PI regulatora. Po predloženoj ideji pretpostavlja se neopterećen pogon u kome je moguće zanemariti stacionarnu vrednost učestanosti klizanja. Uz $\omega_{k0} \approx 0$, (8.5) i (8.6) postaju:

$$\Delta\varepsilon_\omega|_{\omega_{ko}=0} = \frac{K'_{mras} p}{p\left(p + \frac{1}{T_r}\right) + K'_{mras}(pK_p + K_i)} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right], \quad (8.7.)$$

$$\Delta\hat{\omega}_r|_{\omega_{ko}=0} = \frac{K'_{mras}(pK_p + K_i)}{p\left(p + \frac{1}{T_r}\right) + K'_{mras}(pK_p + K_i)} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right]. \quad (8.8.)$$

Da bi se funkcijama prenosa greške i procenjene brzine podesio željeni propusni opseg ω_c , i odgovarajući faktor prigušenja ξ , za PI pojačanja treba usvojiti:

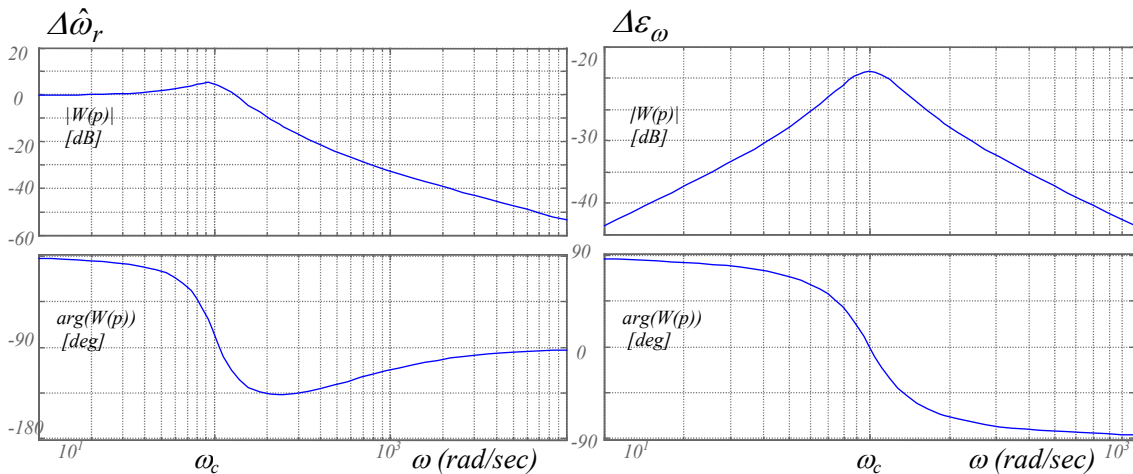
$$K_i = \frac{\omega_c^2}{K'_{mras}}, \quad K_p = \frac{-\frac{1}{T_r} + 2\xi\omega_c}{K'_{mras}}. \quad (8.9.)$$

Ovim funkcije spregnutog prenosa za $\Delta\varepsilon_\omega$ i $\Delta\hat{\omega}_r$ postaju:

$$\Delta\varepsilon_\omega|_{\omega_{ko}=0} = \frac{K'_{mras} p}{p^2 + 2\xi\omega_c p + \omega_c^2} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right], \quad (8.10.)$$

$$\Delta\hat{\omega}_r|_{\omega_{ko}=0} = \frac{\left(-\frac{1}{T_r} + 2\xi\omega_c \right) p + \omega_c^2}{p^2 + 2\xi\omega_c p + \omega_c^2} \left[\Delta\omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right]. \quad (8.11.)$$

Za $\omega_c=100 \text{ rad/s}$ i $\xi=0.29$, propusni opseg estimatora brzine se ograničava na 100 rad/s . Slike 8.2 prikazuju rezultujuće Bode dijagrame funkcija (8.10) i (8.11).



Sl. 8.2. Bode dijagram – a) procenjena brzina rotora i b) greška MRAS observera brzine (parametri PI reg. podešeni za $\omega_c=100 \text{ rad/s}$, $\xi=0.29$)

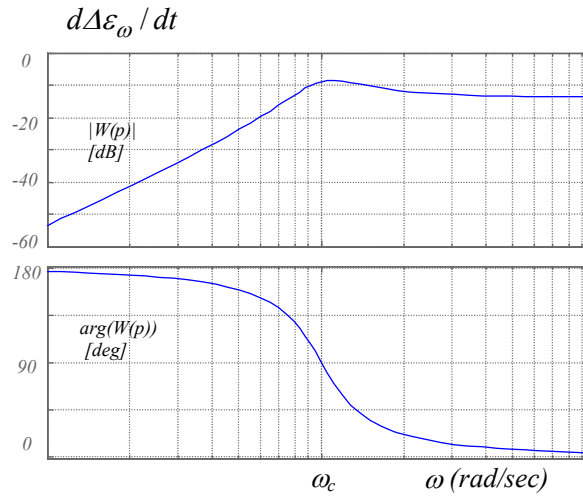
Dosad prikazana matematička analiza je pokazala da mali signal greške MRAS observera brzine zavisi od dve nezavisne veličine, male promene brzine rotora i male promene u q komponenti struje statora. Ova zavisnost se može i dalje uprostiti ako se posmatraju samo relativno visoke učestanosti. Usled ograničenog propusnog opsega mehaničkog dela sistema,

nije za očekivati značajne komponente signala brzine rotora na relativno visokim učestanostima. Ukoliko su iste ujedno i van propusnog opsega funkcije spregnutog prenosa MRAS observera ($\omega > \omega_c$), na njima ne treba očekivati ni značajne promene u procenjenoj brzini. Sa druge strane, kontura kontrole momenta ima znatno širi propusni opseg i na tim učestanostima mogu postojati značajne spektralne komponente signala promene Δi_{qs} .

Predložena nova tehnika procene T_r je zasnovana na vezi između prvog izvoda greške MRAS observera ($p \Delta \varepsilon$) i malih promena Δi_{qs} . Ta veza je data sa:

$$p \Delta \varepsilon_\omega = \frac{K'_{mras} p^2}{p^2 + 2\xi\omega_c + \omega_c^2} \left[\Delta \omega_r + \frac{L_m}{\Psi_{dro}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs} \right]. \quad (8.12.)$$

Za relativno visoke učestanosti ulaznih signala, transfer funkcija $W(p) = \frac{p^2}{p^2 + 2\xi\omega_c + \omega_c^2}$ poseduje skoro konstantnu amplitudnu karakteristiku i unosi minimalni fazni pomeraj u ulazni signal. Tipičan Bode dijagram ove funkcije dat je na slici 8.3.



Sl. 8.3. Bode dijagram prvog izvoda greške MRAS observera (parametri PI reg. podešeni za $\omega_c=100$ rad/s, $\xi=0.29$).

Bode dijagram na slici 8.3 pokazuje da funkcija prenosa $p \Delta \varepsilon$ na visokim učestanostima ne unosi značajno slabljenje ulaznih signala. Na istim učestanostima brzina rotora kao jedan od ulaza ne poseduje značajne spektralne komponente signala ($\Delta \omega_r|_{f \rightarrow \infty} \approx 0$). Time se konačno dolazi do zaključka da ukoliko postoji značajna komponenta izvoda greške MRAS estimatora brzine na višim učestanostima ista je nastala kao posledica Δi_{qs} .

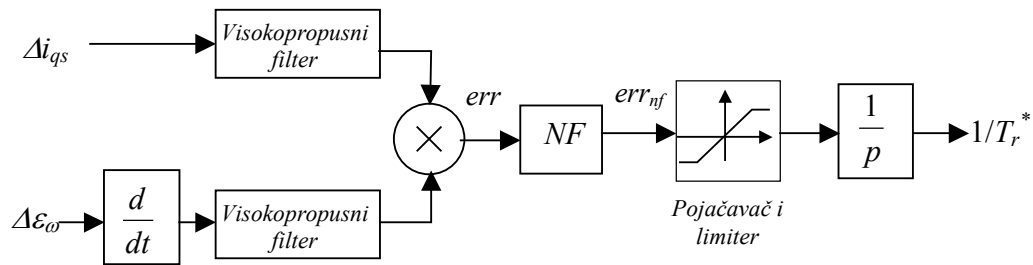
Mali signali $p \Delta \varepsilon$ i Δi_{qs} su korelisani samo ukoliko je parametar T_r^* netačan. Takođe je važno uočiti da ukoliko korelacija ovih signala postoji, njen znak je definisan znakom greške pomenutog parametra:

$$p \Delta \varepsilon_\omega|_{f \rightarrow \infty} \approx K_{mras} \Psi_{dro} L_m \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_r^*} \right) \Delta i_{qs}. \quad (8.13.)$$

Veza između signala $p \Delta \varepsilon$ i Δi_{qs} na relativno visokim učestanostima otvara novu mogućnost procene parametra vremenske konstante rotora. Prvo, neophodno je izdvojiti samo komponente spektra ovih signala koje su izvan propusnog opsega MRAS observera brzine.

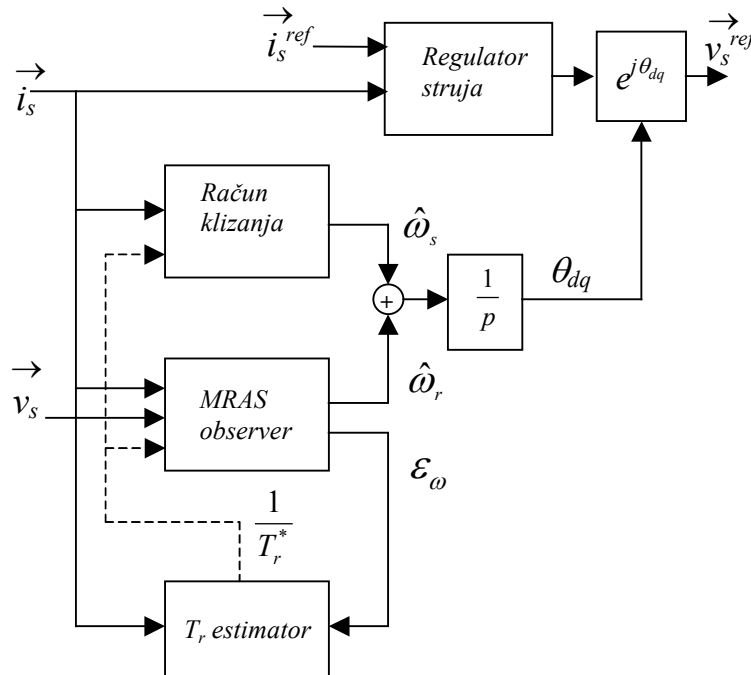
Time se eliminišu komponente spektra signala $p \cdot \Delta \varepsilon$ unutra ovog opsega koje ne zavise isključivo od Δi_{qs} i čija korelacija ne bi dovela do tačne informacije o grešci T_r^* . Razdvajanje viših spektralnih komponenti oba signala se vrši propuštanjem kroz identične visokopropusne filtre. Korelacija filtriranih komponenti ova dva signala donosi informaciju o znaku greške parametra koja se koristi u tipičnoj integralnoj akciji za korekciju parametra T_r^* .

Slike 8.4 i 8.5 ilustruju predloženu šemu za procenu parametra $1/T_r^*$. U šemi se koristi recipročna vrednost parametra iz nekoliko razloga. Prvo, parametar $1/T_r^*$ se direktno koristi u IFOC strukturi kao i u MRAS estimatoru i drugo, promena recipročne vrednosti rotorske konstante je u direktnoj vezi sa predloženim signalom greške. Slika 8.4 pokazuje način izdvajanja korisne informacije iz signala $p \cdot \Delta \varepsilon$ i Δi_{qs} . Iz oba signala se prvo izdvajaju visoke učestanosti. Nakon filtracije, korelacija ovih signala je izvršena jednostavnom operacijom množenja kojom se određuje trenutni znak njihove fazne razlike. Taj signal se ujedno koristi i kao znak greške u parametru $1/T_r^*$ i dovodi se na ulaz integratora čijom se akcijom isti parametar koriguje.



Sl. 8.4. Uprošćen prikaz bloka za procenu znaka greške parametra $1/T_r^*$ zasnovanu na korelaciji malih signala MRAS observera brzine.

Na slici 8.5 je prikazana struktura IFOC pogona sa MRAS observerom brzine. U ovu strukturu je takođe uključen predloženi mehanizam za procenu $1/T_r^*$.



Sl. 8.5 IFOC pogon sa MRAS observerom brzine i blokom za korekciju $1/T_r^*$.

Model za račun učestanosti klizanja i adaptivni model rotorskog fluksa u MRAS observeru brzine koriste istu recipročnu vrednost parametra T_r^* . Korekciju rada ova dva bloka je neophodno vršiti paralelno, sa istom promenom u parametru T_r^* . Ovo je neophodan uslov za pravilan rad predloženog korektivnog mehanizma. To nije i ograničavajući faktor primene istog pošto se u MRAS observeru brzine uvek koristi isti parametar T_r^* kao i u IFOC pogonu i time eliminiše eventualna greška u postavljanju polja statora.

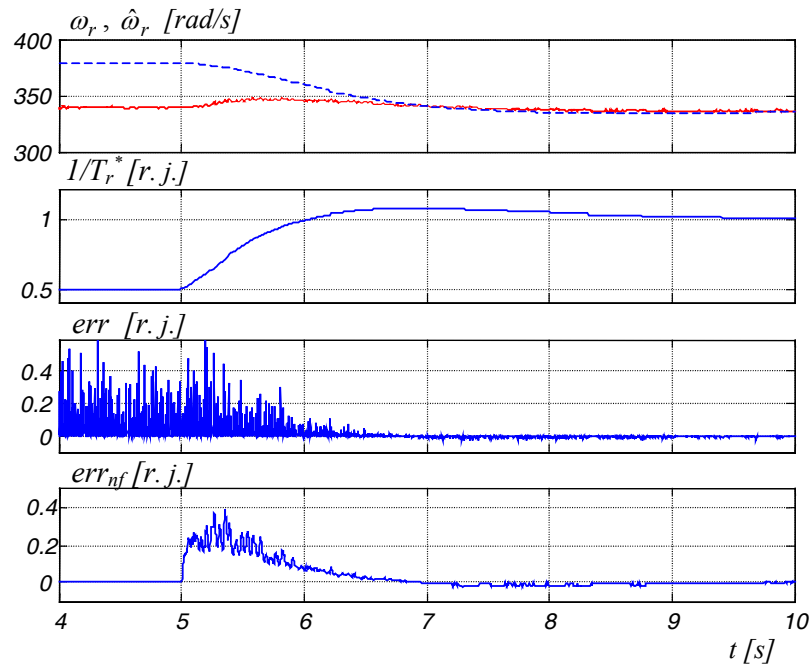
Rad predloženog mehanizma za korekciju parametra $1/T_r^*$ je delimično ispitan putem računarskih simulacija u programskom paketu Matlab, Simulink Toolbox. Izgrađen je dinamički model za simulaciju rada IFOC pogona sa MRAS observerom brzine. U model je, na način prikazan na slici 8.5, uključen i blok za korekciju parametra $1/T_r^*$. Analiziran je rad pogona u režimu kontrole momenta kao i u režimu kontrole brzine rotora. U slučaju kontrole momenta zadate su nominalne vrednosti struje d i q ose statora dok je brzina rotora povratnom spregom u modelu mehaničkog dela održavana u okolini 350 rad/s. Pri režimu kontrole brzine rotora ($\omega_{ref} = 350$ rad/s) zadata je nominalna struja d ose dok je struja q ose rezultat računarske simulacije povratne sprege po brzini rotora. Da bi se obezbedilo dovoljno malog signala u struju q ose u oba slučaja je dodat beli šum ograničenog spektra proizveden na izlazu Matlab bloka *Band Limited White Noise*.

Model pogona u oba slučaju ulazi u stacionarno stanje nakon protekle 4 sekunde simulacionog vremena. Da bi se modelovala realna situacija u pogonu vrednost parametra T_r^* korišćena u modelu kontrolera nije jednaka sa vrednošću parametra korišćenog u modelu motora. Time dolazi do greške u procenjenoj brzini rotora. Nakon ulaska modela u stacionarno stanje omogućuje se rad mehanizma za korekciju $1/T_r^*$. Usled utisnutog malog signala tipa belog šuma na učestanostima od interesa postoji dovoljno signala za rad ovog mehanizma koji na prikazanim rezultatima računarskih simulacija uspešno koriguje pomenuti parametar.

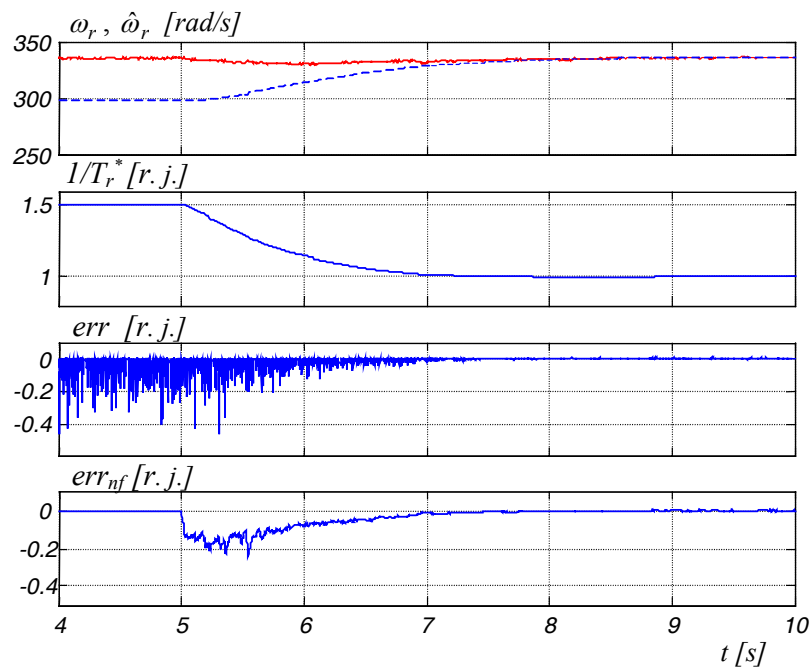
Na slikama koje slede prikazani su rezultati simulacija za ostvarenu (ω_r) i procenjenu brzinu rotora ($\hat{\omega}_r$) – isprekidana linija, recipročnu vrednost korigovanog parametra ($1/T_r^*$), faznu grešku nakon množača (err) kao i filtriranu vrednost ove greške (err_{nf}).

Slike 8.6 –8.7 su date za model pogona sa kontrolom momenta, dok su slike 8.8-8.9 date za model pogona sa zatvorenim povratnom spregom po brzini rotora. U oba slučaja su ispitane dve moguće greške recipročne vrednosti parametra $1/T_r^* = 1.5 1/T_r$ i $1/T_r^* = 0.5 1/T_r$.

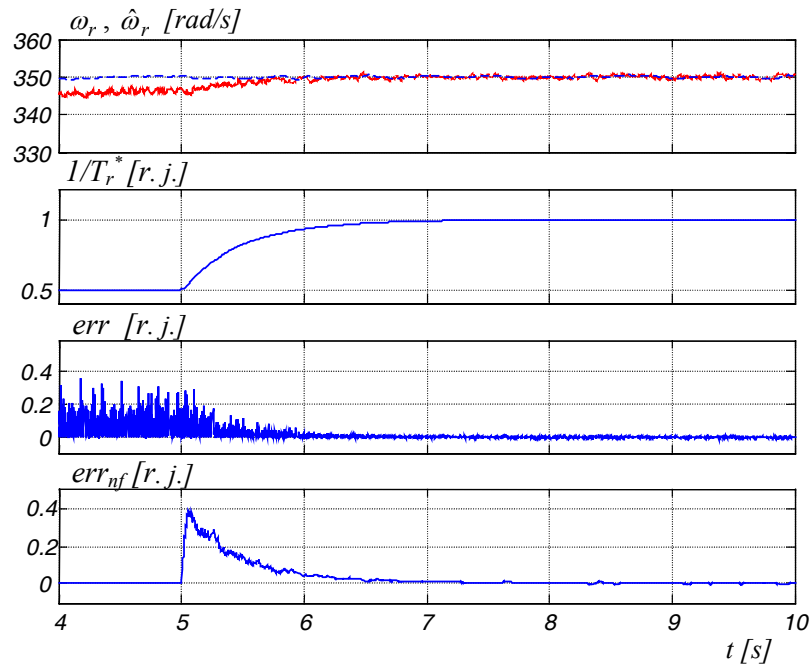
Sve računarske simulacije su izvršene na nelinearnom modelu IFOC pogona i njihovi dobri rezultati predstavljaju jedan korak do konačnog rešenja i potvrde predloženog mehanizma za korekciju. Ono što opisane računarske simulacije ne mogu da potvrde jeste ponašanje algoritma uz prisustvo malih signala već prisutnih u pogonu, da li tih signala ima dovoljno i kakav je sastav spektra tih signala. Takođe, predloženi mehanizam za korekciju parametra rotorskog kola koristi visoke učestanosti signala pri korekciji parametra i time pojačava uticaj šuma merenja kao i eventualne nemodelovane dinamike. Rezultati praktičnih eksperimenata koji obuhvataju sve ove uticaje su priloženi u poglavlju 9 ovog rada.



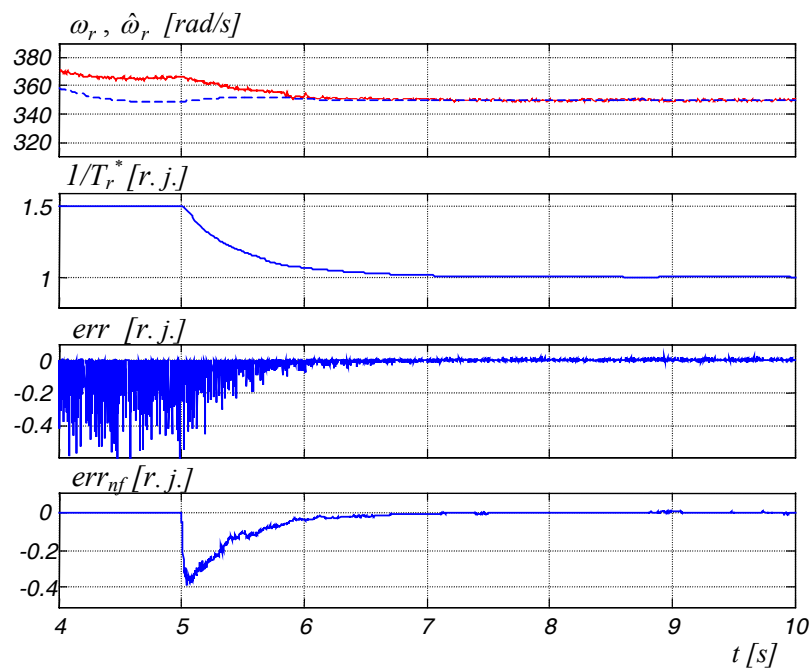
Sl. 8.6. Rezultati računarskih simulacija procene T_r . Ostvarena i procenjena brzina rotora, recipročna vrednost procenjenog parametra, signal greške i filtriran signal greške. Kontrola momenta uz utisnuti beli šum kao test signal, parametar $1/T_r^* = 0.5 1/T_r$.



Sl. 8.7. Rezultati računarskih simulacija procene T_r . Ostvarena i procenjena brzina rotora, recipročna vrednost procenjenog parametra, signal greške i filtriran signal greške. Kontrola momenta uz utisnuti beli šum kao test signal, parametar $1/T_r^* = 1.5 1/T_r$.



Sl. 8.8. Rezultati računarskih simulacija procene T_r . Ostvarena i procenjena brzina rotora, recipročna vrednost procenjenog parametra, signal greške i filtriran signal greške. Kontrola brzine uz beli šum kao test signal, parametar $1/T_r^* = 0.5 1/T_r$.



Sl. 8.9. Rezultati računarskih simulacija procene T_r . Ostvarena i procenjena brzina rotora, recipročna vrednost procenjenog parametra, signal greške i filtriran signal greške. Kontrola brzine uz beli šum kao test signal, parametar $1/T_r^* = 1.5 1/T_r$.