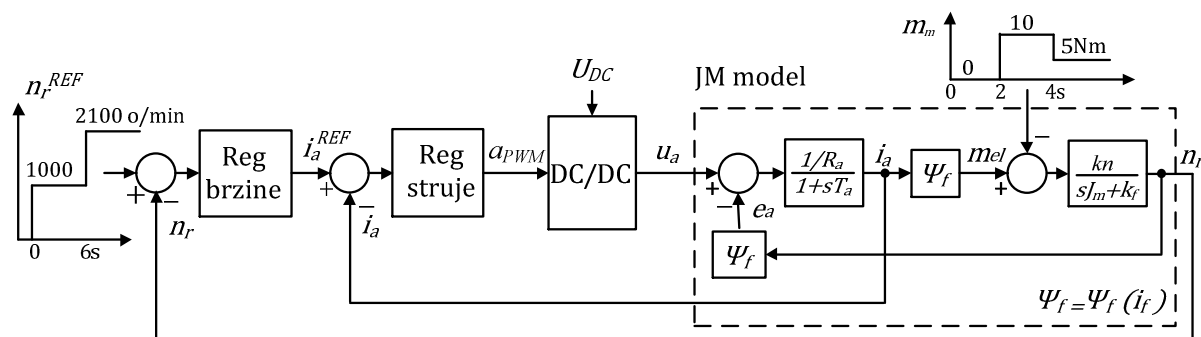


9.1. Rezultati simulacija rada motora sa jednosmernom strujom upravljanog po brzini

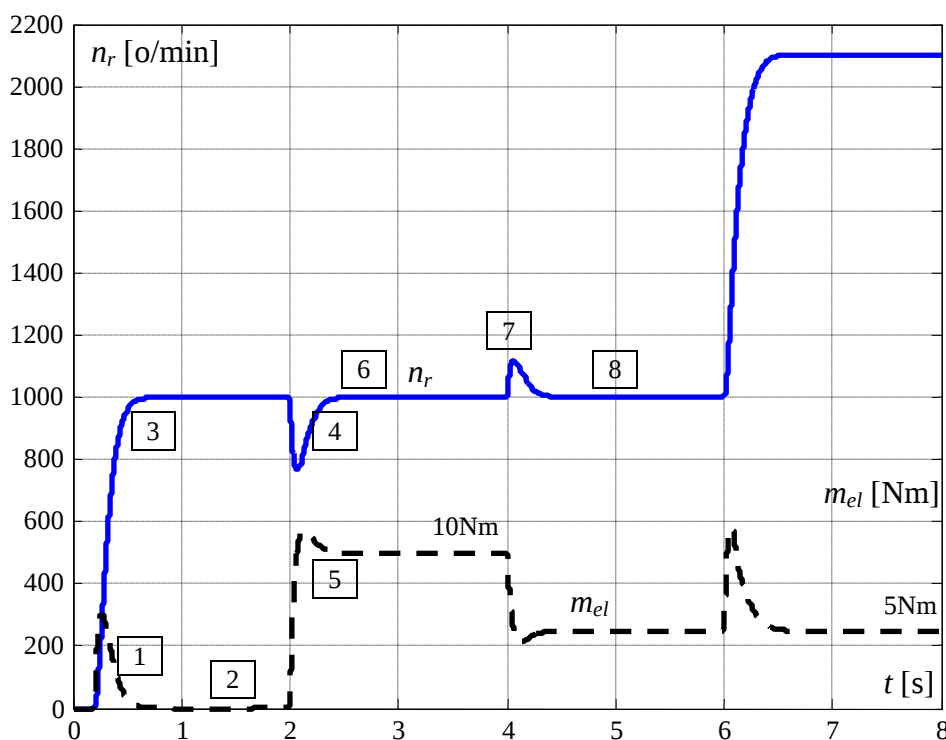
U ovom poglavlju su dati rezultati računarskih simulacija rada pogona sa JM koji je upravljan po brzini. Blok dijagram pogona je dat na slici 9.1.1.



Slika 9.1.1. Model pogona sa JM korišćen tokom računarskih simulacija

JM je predstavljen modelom čiji su ulazi napon armature (u_a) i moment opterećenja (m_m) a izlazi struja armature (i_a) i brzina rotora (n_r). Flux pobude JM (ψ_f) može biti konstantan, JM sa permanentnim magnetima na statoru, ili da se menja linearno sa promenom struje pobude (i_f), JM sa nezavisnom pobudom. Pogon poseduje regulator brzine koji reguliše brzinu tako što upravlja strujom armature JM (momentom) i regulator struje koji ostvaruje tu struju tako što upravlja PWM faktorom ispunje, tj. naponom armature. Zadana brzina obrtanja rotora iznosi prvo 1000 o/min ($t=0$ s), zatim 2100 o/min ($t=6$ s). Pogon je prvo neopterećen, a zatim u $t=2$ s opterećen sa 10Nm i konačno u $t=4$ s opterećenje pada na 5Nm. Parametri odabranog JM su $R_a = 1.97\Omega$, $L_a = 40\text{mH}$, $U_a = 230\text{V}$, $I_a = 7.2\text{A}$, $n_{nom} = 1415$ o/min. JM je sa nezavisnom pobudom koja daje nominalni fluks statora od 1.55Wb za pobudnu struju $i_f = 0.5\text{A}$.

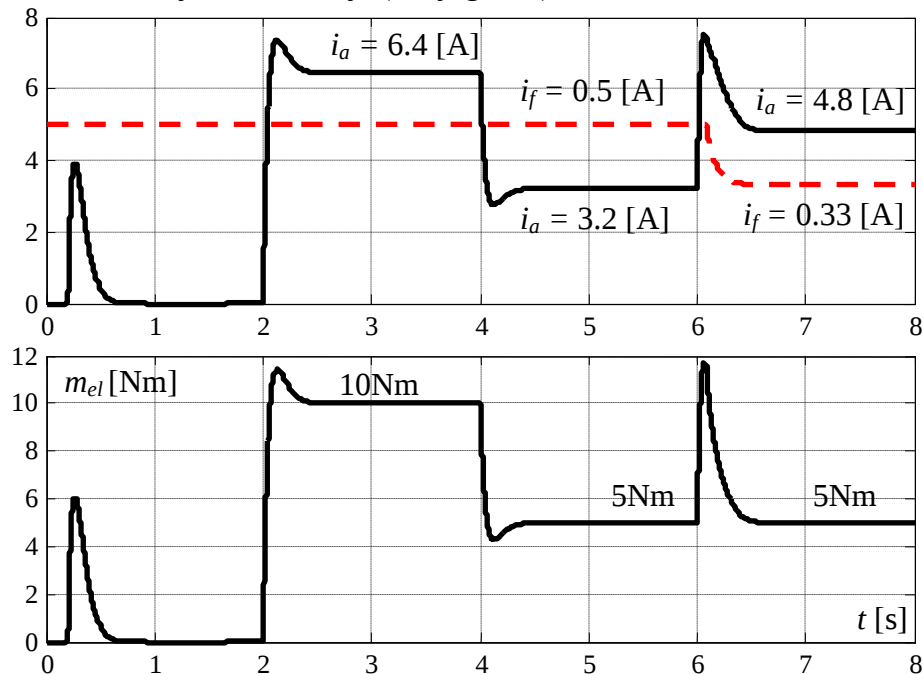
Na slici 9.1.2 su prikazane ostvarena brzina i elektromagnetni moment koji razvija JM.



Slika 9.1.2. Brzina rotora i moment koji razvija JM

Sa slike 9.1.2 je jasno da pogon ostvaruje referentnu brzinu rotora tako što upravlja momentom (m_{el}) koji JM predaje vratilu. Od stanja mirovanja do 1000 o/min JM stiže pozitivnim impulsom momenta [1] koji nastaje akcijom PI regulatora brzine nad pozitivnom greškom brzine na ulazu. Ovaj impuls je veći od momenta opterećenja (u tom trenutku jednakom nuli) i dovodi do pozitivnog priraštaja brzine. Jednom kada je referentna brzina dostignuta, greška brzine pada na nulu. Moment koji neopterećeni JM razvija takođe pada na nulu [2], ostvarena je momentna ravnoteža (4.1) i brzina rotora ostaje nepromenjena na zadatih 1000o/min. U datom primeru su parametri PI regulatora brzine podešeni tako da je prelaz brzine sa 0 na 1000 o/min aperiodičan [3], tj. bez prebačaja ili oscilacija oko zadate brzine. U drugoj sekundi simulacionog vremena na vratilo JM se dovodi opterećenje (10Nm) i pogon počinje da usporava [4] jer je narušena momentna ravnoteža na vratilu. Ovo izaziva novu reakciju regulatora brzine koji usled greške brzine uvećava zadati moment koji JM treba da ostvari [5]. Povratak brzine na 1000 o/min je i dalje aperiodičan, tj. bez prebačaja ili oscilacija [6]. U prelaznom režimu JM je razvijao moment veći od 10Nm, čime je ostvaren pozitivan gradijent brzine i kompenzovan njen pad. U stacionarnom stanju razvijeni moment se ponovo izjednačava sa novim momentom opterećenja (10Nm) i brzina ostaje konstanta. Smanjenje momenta opterećenja na 5Nm ponovo narušava momentnu ravnotežu ali sada je moment koji pogon razvija veći i pogon ubrzava [7]. Regulator brzine reaguje i smanjuje zadati moment i brzina se vraća na 1000 o/min, [8]. Konačno, zadaje se 2100 o/min što je brzina veća od nominalne (1415 o/min). Nominalni fluks rotora bi pri toj brzini obrtanja indukovao EMS veću od nominalnog napona (230V). Zato se brzine veće od nominalne ne mogu ostvariti kod JM sa permanentnim magnetima na statoru. JM sa nezavisnom pobodom ima mogućnost kontrole fluksa, pa može da ostvari brzine veće od nominalne, a da pri tome napon statora ne pređe nominalnu vrednost, što je detaljnije opisano u nastavku.

Na slici 9.1.3 su date ostvarene struje armature (i_a) i pobude (i_f) (gornji grafik), kao i promena momenta koji JM ostvaruje (donji grafik).



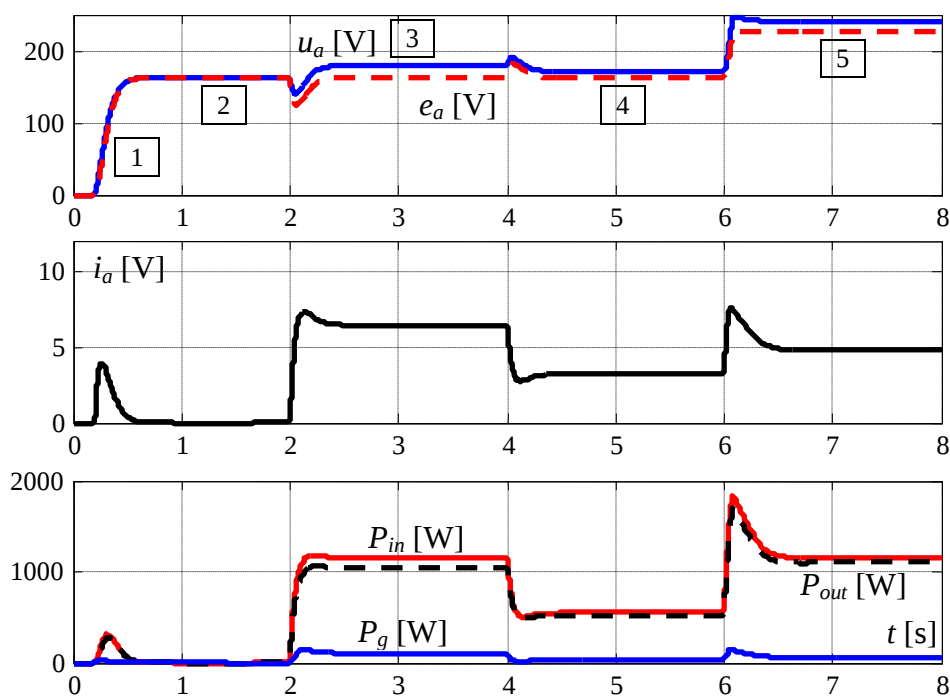
Slika 9.1.3. Struja armature i pobude (gore) i ostvareni elektromagnetni moment (dole)

U datoj regulacionoj strukturi regulator brzine upravlja zadatom strujom armature JM i time grešku između zadate i ostvarene brzine rotora dovodi na nulu. Da bi se zadata vrednost struje armature i ostvarila odgovoran je dodatni podređeni strujni regulator koji upravlja naponom

armature JM i dovodi grešku između zadate i ostvarene struje na nulu. Kao rezultat, regulator brzine kontroliše struju armature. Ova regulaciona struktura je zasnovana na činjenici da je moment koji JM sa konstantnim poljem na statoru ostvaruje proporcionalan struji armature. Kao rezultat, regulator brzine kontrolišući zadatu vrednost struje armature praktično linearno kontroliše i ostvareni moment. Ovo je jasno i sa slike 9.1.3. Sa slike se vidi da postoji direktna linearna veza između vrednosti struje armature i ostvarenog momenta, što je i jasno na osnovu (4.18). Na slici 9.1.3 struja armature $i_a = 6.4A$ čini da JM razvija $10Nm$ dok upola manja struja $i_a = 3.2A$ za isti pobudni fluks dovodi do momenta $5Nm$. Iz tog razloga je i relativno lako regulisati brzinu JM. Dovoljno je da regulator brzine upravlja zadatom strujom armature, koju podređeni strujni regulator kontrolom napona statora može i da ostvari. Time se dobija linearna kontrola momenta potrebna za kvalitetnu regulaciju brzine i položaja pogona.

Linearna veza struje i momenta uvek važi kod JM sa permanentnim magnetima, dok za JM sa nezavisnom pobudom važi samo ako je struja pobude konstantna. Simulirani pogon u $t=6s$ ostvaruje brzine veće od 1415o/min pri kojima pobudna struja mora biti umanjena [1] da bi se napon armature zadržao ispod maksimalne vrednosti. Da to nije urađeno indukovana EMS bi se linearno uvećavala sa brzinom, prešla bi maksimalni napon armature i postalo bi nemoguće utisnuti struju pozitivnog smera u motor. Tada bi nestalo i pozitivnog momenta i zalet bi stao. U datom primeru se struja pobude (fluks) nakon 1415 o/min smanjuje po $1/\omega$ zakonu što čini da indukovana EMS ostaje približno konstantna, na vrednosti nešto nižoj od nominalnog napona JM. Kao primer, pobudna struja na 2100o/min iznosi $0.33A$ što je $2100/1415 \approx 1.5$ manje od njene nominalne $0.5A$ vrednosti. Sa ovim umanjnjem struje pobude napon armature ostaje sličan onom na 1415 o/min, oko 230V. Ali, pošto je fluks umanjen, da bi pogon i dalje ostvario moment od 5Nm struja armature se povećava otprilike 1.5 puta, umesto $i_a = 3.2A$ na slici 9.1.3 se očitava $i_a \approx 4.83A$. Ovo je i očekivano jer razvijeni moment JM jeste proporcionalan proizvodu struje armature i fluksa pobude, tako da smanjenje struje pobude mora biti kompenzivano povećanjem struje armature.

Na slici 9.1.4 je prikazano kako se menjaju napon i EMS (gornji grafik), struja armature (srednji) i snaga (donji) JM tokom promena brzine i momenta datih na slici 9.1.2.



Slika 9.1.4. Rezultati simulacija rada pogona sa JM. a) napon i EMS rotora, b) Zadata i ostvarena struja armature c) Ulazna, izlazna i snaga gubitaka u rotoru

Na gornjem grafiku su prikazani napon i indukovana EMS rotora. Napon armature je kontrolisan strujnim regulatorom čiji je zadatak da ostvari zadatu struju armature, tj. moment $M_{el} = \psi_f I_a$. Na osnovu jednačine naponske ravnoteže rotora u stacionarnom stanju: $U_a = R_a I_a + \Omega_r \Psi_f = R_a I_a + E_a$ je jasno da je istu struju rotora moguće zadržati samo ako sa porastom brzine uvećavamo i napon armature. Regulator struje prilikom ubrzanja pogona upravo i zadaje rast napona armature, koji prati rast EMS [1] i time se održava zadata struja armature. Ovo važi i za slučaj pogona JM bez podređenih strujnih regulatora. Kod ovih pogona regulator brzine direktno upravlja faktorom ispunje, tj. naponom rotora. U tom slučaju porast napona rotora u odnosu na indukovanu EMS izaziva porast struje armature, tj. momenta pa i brzine rotora. JM pogoni u kojima se reguliše samo napon su prostiji za izradu ali imaju lošije dinamičke karakteristike jer promena struje (momenta) kasni za promenom napona sa dinamikom koju određuje vremenska konstanta rotorskog kola AM, $T_a = L_a/R_a$.

Kada se dostigne zadata brzina, uvećanje napona rotora se zaustavlja [2] na vrednosti koja je veća od indukovane EMS za onoliko koliko je potrebno da se održi zadata struja armature tj, potreban moment. Pošto je u datom primeru JM pri zaletu neopterećen, potrebna struja armature za održavanje momenta je jednaka nuli, $I_a = 0$. U tom slučaju važi $U_a \approx E_a \approx (1000/1415) \cdot 230V = 160V$. Nakon nailaska opterećenja, dolazi do pada brzine, regulator brzine zahteva novi moment tj, struju armature. Ovu struju regulator struje ostvaruje tako što dodatno uveća $U_a \approx 180V$ u odnosu na $E_a \approx 160V$, [3]. Stacionarna vrednost napona U_a koja pri nominalnom fluksu Ψ_f i brzini Ω_r daje zadati moment M_{el} glasi:

$$U_a = R_a \frac{M_{el}}{\Psi_f} + \Omega_r \Psi_f = R_a \frac{M_{el}}{\Psi_f} + E_a \quad (9.1)$$

Pad opterećenja u $t = 4s$ na dvostruko manju vrednost rezultuje u padu napona rotora na $\approx 170V$ [4]. Razlog za ovaj pad je manja struja armature koja je potrebna da se parira novi moment opterećenja. Pošto je novi moment opterećenja dvostruko manji, dvostruko manji je i ostvareni moment, i struja armature. Konačno, uz pretpostavku da se otpornost rotora nije promenila, dvostruko manja je i razlika između napona rotora i indukovane EMS rotora (sada je oko 10V a bila je oko 20V).

Konačno, u $t = 6s$ pogon prelazi preko brzine 1415o/min i ulazi u režim slabljenja polja. Time se sprečava porast indukovana EMS iznad za taj motor maksimalno dozvoljenih 230V. U datom primeru struja pobude opada po $1/\omega$ zakonu sa brzinom čime se održava konstanta indukovana EMS. Ovim se zaustavlja i rast ostvarenog napona armature [5] koji prati EMS i varira u odnosu na nju samo usled opterećenja, tj. proticanja struje armature i pada napona na otpornosti rotora (R_a). Sa grafika se može primetiti da je na brzini 2100 o/min razlika između napona i EMS rotora veća nego na 1000 o/min za isti moment opterećenja. Razlog za to je pad pobude koji mora biti kompenzovan većom strujom armature.

Na trećem grafiku su prikazane snage, ulazna, izlazna mehanička i snaga gubitaka na otpornosti armature R_a usled struje I_a . Ukupna ulazna snaga iznosi

$$P_{ul} = U_a I_a = R_a I_a^2 + \Psi_f I_a \Omega_r = R_a I_a^2 + M_{el} \Omega_r \quad (9.2)$$

gde prvi član čine gubitke snage u bakru rotora $P_{cu} = R_a I_a^2$ dok je drugi član izlazna mehanička snaga $P_{meh} = M_{el} \Omega_r$.

Očigledno je da je izlazna snaga manja od ulazne upravo za gubitke u bakru. Ostali gubici u JM su zanemareni u ovoj analizi.