

## Električne mašine

### **Zadaci za rad na časovima računskih vežbi AM + SM**

Tekst sadrži 9 zadataka koji će se rešavati na časovima računskih vežbi u toku druge polovine kursa. Prvih 5 zadataka se odnosi na asinhronne mašine. Preostala 4 zadatka se odnose na sinhronne mašine.

kontakt: [masine.etf.rs](mailto:masine.etf.rs), [ddc@etf.rs](mailto:ddc@etf.rs), [vukosavic.etf.rs](mailto:vukosavic.etf.rs)

# ASINHRONE MAŠINE

## 1. zadatak

Trofazna mašina nazimenične struje poseduje namotaj sa  $N=100$  navojaka po fazi, pri čemu su faze prostorno pomerene za 120 stepeni. Tri faze namotaja su vezane u zvezdu. Efektivna vrednost nominalnog faznog napona iznosi  $U_n=230V$ , efektivna vrednost nominalne struje jedne faze  $I_n=10A$ , dok je nominalna frekvencija statorskog napona  $f_{s,n}=50Hz$ . Trofazna mašina je pretvorena u dvofaznu tako što je statorski namotaj sa tri faze uklonjen, a u iste statorske žlebove je ugrađen namotaj sa dve faze  $\alpha$  i  $\beta$ . Faze  $\alpha$  i  $\beta$  dvofazne mašine prostorno pomerene za 90 stepeni poseduju  $N_\alpha = N_\beta = 100$  navojaka. Materijal i poprečni presek provodnika statorskog namotaja je isti kao kod prvobitne trofazne mašine. Faze dvofaznog namotaja se sada napajaju iz dva nezavisna naponska izvora istih amplituda napona i iste frekvencije, fazno pomerena za  $\pi/2$ . Premotana mašina se posmatra u trajnom radu gde pogoni nominalno opterećenje, nominalnom brzinom, uz nominalni fluks  $\Phi$  u zazoru mašine.

- Skicirati šemu veza opisane dvofazne mašine sa naponskim izvorima koja koristi minimalan broj provodnika.
- Odrediti efektivnu vrednost napona,  $E_{\alpha,rms}=E_{\beta,rms}$ , frekvenciju,  $f_s$ , i efektivnu vrednost struje,  $I_{\alpha\beta,rms}$ , izvora koja se ima u opisanom radnom režimu.

## 2. zadatak

Trofazni dvopolni asinhroni motor povezan u zvezdu, načinjen za fazni napon nominalne efektivne vrednosti  $U_n=220V$ , nominalne frekvencije  $f_{s,n}=50Hz$ , ima parametre:

- otpornost statorskog namotaja (jedne faze)  $R_S=0.25\Omega$ ,
- svedena otpornost rotorskog namotaja (jedne faze)  $R_R=0.2\Omega$ ,
- rasipna induktivnost statorskog namotaja (jedne faze)  $L_{\gamma S}=3$  mH,
- svedena rasipna induktivnost rotorskog namotaja (jedne faze)  $L_{\gamma R}=3$  mH,
- induktivnost magnetizacije  $L_m=100mH$ .

Faze statorskog namotaja su povezane u zvezdu. Gubici u gvožđu i mehaničkom podsistemu ovog motora se mogu zanemariti. Za radni režim u kome je motor napajan naponom nominalne frekvencije,  $f_s=f_{s,n}$ , efektivne vrednosti faznog napona koja je jednaka nominalnom, ( $U_S=U_n$ ), pri čemu se rotor obrće brzinom od  $n_m=2850$  ob/min, izračunati:

- Vrednost relativnog klizanja,  $s$ .
- Razliku brzine obrtnog polja i brzine rotora (brzinu klizanja, u oznaci  $\Omega_k$ ) i kružnu učestanost struje u kratkospojenom rotorskom namotaju (u oznaci  $\omega_k$ ).
- Struju statora,  $I_S$ , i struju rotora,  $I_R$ .
- Fluks statora,  $\underline{\Psi}_S$ , fluks rotora,  $\underline{\Psi}_R$  i fluks magnetizacije,  $\underline{\Psi}_m$ , a zatim ih uporediti po amplitudi i fazi.
- Elektromagnetski moment,  $M_{em}$ .

## 3. zadatak

Trofazni dvopolni asinhroni motor načinjen, za nominalni fazni napon efektivne vrednosti  $U_n=220V$ , nominalne frekvencije  $f_{s,n}=50Hz$ , ima parametre:

- otpornost statorskog namotaja (jedne faze)  $R_S=13.44 \Omega$ ,
- svedena otpornost rotorskog namotaja (jedne faze)  $R_R=12.55 \Omega$ ,
- rasipna induktivnost statorskog namotaja (jedne faze)  $L_{\gamma S}=41.8$  mH,
- svedena rasipna induktivnost rotorskog namotaja (jedne faze)  $L_{\gamma R}=24$  mH,
- induktivnost magnetizacije  $L_m=1.1085$  H.

Ako su faze statora povezane u zvezdu, a motor je nominalno napajan ( $f_s = f_{s,n}$ ,  $U_s = U_n$ ), izračunati:

- Polazni moment  $M_{pol}$ , uz pretpostavku da je  $L_m$  tako veliko da se struja magnetizacije može zanemariti.
- Prevalni moment u motornom režimu rada,  $M_{pr,m}$ . U svim proračunima u ovoj tački smatrati da  $L_m \rightarrow \infty$ , kao i da je  $R_s = 0$ .
- Moment,  $M_{pr,m,T}$ , koji se ima pri relativnom klizanju izračunatom u tački b) ovog zadatka, ali sada uvažavajući postojanje nenulte vrednosti struje magnetizacione grane i nenulte vrednosti otpornosti statora. Uporediti vrednosti dva elektromagnetska momenta, izračunata u tačkama b) i c).

#### 4. zadatak

Trofazni dvopolni asinhroni motor definisan u 3. zadatku ima nominalnu brzinu obrtanja  $n_n = 2580$  ob/min. Izuzev snage gubitaka u statorskom i rotorskom namotaju motora, sva ostala snaga gubitaka se može zanemariti. Faze statorskog namotaja motora su povezane u zvezdu. U izračunavanjima je opravdano zanemariti struju magnetizacije.

- Odrediti nominalnu vrednost snage gubitaka,  $P_{\gamma,n}$ .
- Ako je motor je nominalno napajan, za režim polaska, izračunati:
  - Snagu obrtnog polja,  $P_{ob}(s=1)$ .
  - Snagu gubitaka u rotorskom namotaju,  $P_{cu}^{rot}(s=1)$ .
  - Snagu gubitaka u celoj mašini,  $P_{\gamma}(s=1)$ .
- Pri pokušaju startovanja motora, uz nominalni napon napajanja, došlo je do loma prenosnog mehanizma koji je uzrokovao da osovina rotora ostane zaglavljena i nepokretna. Izračunati koliko dugo opisani radni režim može trajati ( $t_{max}$ ) a da pri tome ne dođe do termičkog oštećenja motora. Smatrati da motor započinje rad u opisanom režimu iz hladnog stanja. Poznata je vremenska konstanta zagrevanja motora  $T = 10$  minuta. Motor se može u termičkom smislu tretirati kao homogeno telo.

#### 5. zadatak

Trofazni dvopolni ( $p=1$ ) asinhroni motor poseduje statorski namotaj čije su faze spregnute u zvezdu (Y). Nominalna efektivna vrednost linijskog napona je  $U_{l,n} = 220\sqrt{3}$  V. Nominalna frekvencija napajanja je  $f_{s,n} = 50$  Hz. Nominalna efektivna vrednost struje motora je  $I_n = 16$  A, nominalna brzina obrtanja rotora je  $n_n = 2850$  o/min. Nominalna efektivna vrednost struje praznog hoda (t.j. struje koja se ima pri nominalnom naponu, nominalnoj frekvenciji, u uslovima kada je klizanje jednako nuli) iznosi  $I_0 = 8$  A dok je nominalna efektivna vrednost polazne struje (t.j. struje koja postoji u namotajima pri nominalnom napajanju i zakočenom rotoru, tj. kada je brzina obrtanja jednaka nuli a klizanje jednako jedan)  $I_{pol} = 80$  A. U proračunima se otpornost statorskog namotaja  $R_s$  može zanemariti, rasipne induktivnosti statora i rotora se mogu smatrati jednakim ( $L_{\gamma S} = L_{\gamma R}$ ) i znatno manjim od međusobne induktivnosti ( $L_{\gamma S} \ll L_m$ ,  $L_{\gamma R} \ll L_m$ ).

- Nacrtati ekvivalentnu šemu za stacionarna stanja i odrediti sve njene parametre (osim  $R_s$ ). Pri izračunavanjima je opravdano usvojiti da je nominalna vrednost struje u grani magnetizacije mnogo manja od nominalne struje ( $I_{m,n} \ll I_n$ ), kao i da je struja magnetizacije pri polasku mnogo manja od polazne struje ( $I_m(s=1) \ll I_{pol}$ ).
- Nacrtati prirodnu karakteristiku u  $M-\Omega$  ravni i odrediti koordinate (t.j. parove  $M$ ,  $\Omega$ ) karakterističnih tačaka (polazak, prevalni moment u motornom radu, nominalni režim rada, prevalni moment u režimu kočenja). Pri izračunavanju ovih vrednosti, zanemariti struju u grani magnetizacije.
- Odrediti faktor snage ( $\cos(\varphi_n)$ ) i stepen korisnog dejstva,  $\eta_n$ , u režimu nominalnog napajanja i opterećenja, oslanjajući se pri tome na zamensku šemu dobijenu u tački a) zanemarujući snagu gubitaka koja se u ovoj šemi ne modeluje.
- Odrediti frekvencije rotorskih struja za karakteristične tačke analizirane u b).

- e) Usvajajući tipičan sistem baznih veličina, odrediti relativne (svedene) vrednosti svih parametara mašine.

## SINHRONE MAŠINE

### 6. zadatak

Dvopolni sinhroni motor sa konstantnom rotorskom pobudom poseduje statorski namotaj zanemarivo male otpornosti, ( $R_S=0$ ), čije su faze vezane u zvezdu. Sinhronne induktivnosti u  $d$  i  $q$  osi su međusobno jednake,  $L_d=L_q=L_S=0.1H$ . Poznata je efektivna vrednost faznog napona statora  $U_S=220V$  i frekvencija  $f_S=50Hz$ , kao i efektivna vrednost elektromotorne sile praznog hoda  $E_0=290V$  izmerena u jednoj fazi. Ukoliko mašina radi sa uglom snage od  $\delta=+30^\circ$  (napon statora prednjači u odnosu na  $E_0$ ), izračunati:

- Efektivnu vrednost statorske struje,  $I_S$ .
- Faktor ulazne snage,  $\cos\varphi$ .
- Aktivnu,  $P_e$  i reaktivnu,  $Q_e$  snagu mašine.

### 7. zadatak

Dvopolni sinhroni generator sa konstantnom rotorskom pobudom poseduje statorski namotaj zanemarivo male otpornosti, ( $R_S=0$ ), čije su faze vezane u zvezdu. Sinhronne reaktanse u  $d$  i  $q$  osi su međusobno jednake,  $X_d=X_q=X_S$ . Poznata je efektivna vrednost faznog napona  $U_S=3470V$  i efektivna vrednost elektromotorne sile praznog hoda u jednoj fazi  $E_0=4200V$ . Ako se zna da je u posmatranom režimu efektivna vrednost statorske struje  $I_S=500A$ , dok je faktor snage  $\cos\varphi=0.8$ , ind., izračunati:

- Vrednost sinhronne reaktanse,  $X_S$ ,
- Vrednost ugla snage,  $\delta$ .

### 8. zadatak

Dvopolna trofazna sinhrona mašina poseduje namotani rotor sa kliznim prstenovima i pobudnim namotajem u  $d$  osi. Rotor se obrće brzinom  $n=4500$  ob/min. Statorski namotaj je povezan u zvezdu i u svakoj od njegovih faza se indukuje elektromotorna sila čija vršna vrednost iznosi  $E_{0,max}=800V$  pri pobudnoj struji od jednog ampera ( $I_{p,0}=1A$ ). Poznato je da je magnetsko kolo linearno kao i da je  $L_d=L_q=50mH$ , dok je otpornost statorskog namotaja svake faze  $R_S=3\Omega$ . U rotorskom namotaju se u posmatranim radnim režimima ima nepromenljiva pobudna struja  $I_{p,1}=0.5A$ .

- Odrediti frekvenciju  $f_S$  [Hz] koju simetrični trofazni naponski izvor treba da ima da bi se mašina na nje mogla sinhronizovati.
- Odrediti efektivnu vrednost statorske struje,  $I_{KS}$ , i elektromagnetski moment,  $M_{KS}$ , koji se opire kretanju rotora mašine za slučaj u kome je  $U_S=0$  (t.j. statorski priključci u kratkom spoju). Napomena: Posmatra se sinhrona mašina koja radi u ustaljenom stanju, dakle, radi se o ustaljenoj vrednosti struje kratkog spoja.
- U slučaju kada je efektivna vrednost linijskog napona izvora kojim se napaja statorski namotaj jednaka  $U_l=300V$ , odrediti ugao snage  $\delta$  [rad] (ugao za koji vektor statorskog napona prednjači u odnosu na indukovanu elektromotornu silu) za koji se ima najveća snaga elektomehaničkog pretvaranja dok mašina radi u generatorskom režimu. Za ovaj ugao, odrediti:
  - Efektivnu vrednost statorske struje,  $I_S$ .
  - Reaktivnu snagu,  $Q_e$ , koju sinhrona mašina predaje izvoru.
  - Aktivnu snagu,  $P_e$ , koju sinhrona mašina predaje izvoru.

## 9. zadatak

Dvopolni trofazni sinhroni generator poseduje statorski namotaj zanemarivo male otpornosti, ( $R_S=0$ ), čije su faze vezane u zvezdu. Sinhrona reaktansa u d i q osi su međusobno jednake,  $X_d = X_q = X_S = 2\Omega$ . Merenjem je utvrđeno da se karakteristika praznog hoda može aproksimirati pravom sve dok efektivna vrednost elektromotorne sile praznog hoda u fazi ne dostigne vrednost od  $E_{0,max}=500V$ , nakon čega nastupa zasićenje. Izlazni napon na statorskim priključcima se u radnim režimima, opisanim u daljem tekstu, nastoji održati konstantnim pri čemu efektivna vrednost faznog napona treba da iznosi  $U_S=220V$ . Brzina obrtanja rotora je konstantna u svim radnim režimima, usled čega se promena elektromotorne sile praznog hoda postiže isključivo promenom pobudne struje rotorskog namotaja.

- Odrediti trofazno otporno opterećenje povezano u zvezdu, sa tri otpornika otpornosti  $R_{opt}$ , kao i vrednost elektromotorne sile praznog hoda, koja će rezultovati razvijanjem maksimalne moguće snage na otpornicima, kao i efektivnom vrednošću faznog napona od  $U_S=220V$ . Odrediti vrednost te snage,  $P_{max}$ .
- Ako se paralelno sa trofaznim otpornim opterećenjem poveže i trofazno kapacitivno opterećenje  $C_{opt}$ , reaktansa  $X_{opt}=-4\Omega$ , odrediti pri kom trofaznom otpornom opterećenju,  $R_{opt}$  i kojoj vrednosti elektromotorne sile praznog hoda,  $E_0$ , se ostvaruje maksimalna aktivna snaga,  $P_{max}$ , ako je i sada cilj održati nepromenjenju efektivnu vrednost faznog napona  $U_S=220V$ . Kolika je vrednost maksimalne snage  $P_{max}$ .

