



SINHRONE MAŠINE (13E013SIM) – prvi kolokvijum –

1. Poznati su sledeći podaci o trofaznom sinhronom turbogeneratoru:

- Nominalne vrednosti: $S_n = 37.6$ MVA, $U_n = 20$ kV, $f = 50$ Hz;
- Podaci o namotaju statora: $Q = 60$, $p = 1$, dvoslojni, sprega zvezda;
- Broj navojaka pobudnog namotaja: $N_f = 63$;
- Osnovne dimenzije mašine: $D = 1295$ mm, $l = 2590$ mm, $\delta = 55$ mm.

Amplituda osnovnog harmonika magnetske indukcije u međugvožđu mašine pri nominalnom naponu treba da iznosi $B_1 = 0.9$ T (smatrati da je napon jednak osnovnom harmoniku indukovane ems namotaja).

Potrebno je odrediti:

- (a) vrednost navojnog koraka y koja rezultuje minimalnom vrednošću petog prostornog harmonika mps namotaja statora (7)
- (b) ugao koji treba da zahvata pobudni namotaj pod jednim polom rotora kako bi sedmi harmonik mps pobudnog namotaja bio jednak nuli (7)
- (c) broj navojaka po fazi statorskog namotaja (9)
- (d) vrednost pobudne struje pri kojoj se ima nominalni napon na krajevima statora u praznom hodu pri nominalnoj brzini obrtanja rotora (9)

NAPOMENE: Rešenje pod a) treba izabrati tako da navojni sačinilac za osnovni harmonik ne bude manji od 0.9. Rešenje pod b) treba izabrati tako da maksimalna vrednost ukupnog talasa indukcije bude što približnija amplitudi osnovnog harmonika indukcije. Broj navojaka po fazi treba odrediti kao celobrojni umnožak broja žlebova po fazi pri kom su što približnije zadovoljeni dati uslovi. Svi navojci jedne faze su vezani na red. Gde god je to potrebno, smatrati da je fazni napon generatora jednak osnovnom harmoniku indukovane ems po fazi. Zanemariti otpornosti i induktivnosti rasipanja namotaja i zasićenje magnetskog kola.

2. Prikazati talasni oblik indukcije koji stvara namotaj indukta sinhronne mašine sa isturenim polovima u q osi. Izvesti izraz za osnovni prostorni harmonik indukcije. Na slikama jasno naznačiti sve vrednosti korišćene u izvođenju. Pretpostaviti da je raspodela mps indukta prostoperiodična. (11)



SINHRONE MAŠINE (13E013SIM) – drugi kolokvijum –

1. (a) Blondelov vektorski dijagram i modifikovani Blondelov dijagram natpobuđenog sinhronog motora. (8)
(b) Trofazni četvoropolni sinhroni motor sa stalnim magnetima i $X_d = X_q$, sprege zvezda, priključen je na krutu mrežu napona 380 V, 50 Hz. U posmatranom režimu, motor je natpobuđen, opterećen, i uzima iz mreže struju od 25 A, uz $\cos \varphi = 0.9$. Kada se napon na krajevima motora smanji za 10%, pri konstantnom opterećenju, motor iz mreže uzima struju od 29 A. Odrediti sinhronu reaktansu i pobudnu ems motora. Odrediti i maksimalnu vrednost momenta koji ovaj motor može da razvije pri nominalnom naponu, kao i odgovarajuću vrednost struje. (12)
2. Izvesti izraze za efektivne vrednosti faznih struja sinhronog generatora ako je između faze A i zvezdišta priključen potrošač otpornosti R_p . Reaktanse generatora za direktni, inverzni i nulti redosled su X_d , X_i i X_0 , a međufazni napon na krajevima neopterećenog generatora jednak je E (12)
3. Izvesti izraze za ugaone karakteristike aktivne i reaktivne snage ($P(\delta)$, $Q(\delta)$) sinhrona mašine sa isturenim polovima. Skicirati ugaonu karakteristiku aktivne snage za slučajeve kada je $X_d > X_q$ i $X_d < X_q$ (12)
4. (a) Skicirati ekvivalentna kola i napisati izraze za određivanje suptranzijentne reaktanse u d -osi i aperiodične vremenske konstante statora. Sve parametre koji figurišu u izrazima jasno definisati. (8)
(b) Sinhroni motor sa pobudnim namotajem je sinhronizovan na krutu mrežu nominalnog napona i učestanosti. Pobudna struja se ne menja, a moment opterećenja se povećava do vrednosti pri kojoj je struja motora jednaka polovini nominalne vrednosti. Ukoliko je sinhrona reaktansa motora $x_s = 1.6$ r.j, a tranzijentna reaktansa $x'_d = 0.4$ r.j, utvrditi koliki je najveći moment kojim se motor sme kratkotrajno opteretiti tako da ostane u stabilnom radu. Smatrati da je trajanje prelazne pojave značajno kraće od tranzijentne vremenske konstante. (12)

SINHRONE MAŠINE (13E013SIM)

Septembar 2020.

– rešenja zadataka –

Prvi kolokvijum

1. a) U cilju minimizacije petog harmonika, potrebno je da odgovarajući tetivni navojni sačinilac ima minimalnu vrednost (pojasni navojni sačinilac je već definisan izborom broja žlebova i polova):

$$k_{t5} = \sin\left(5\frac{y}{z}\frac{\pi}{2}\right) = \min, \quad (\text{K1.1})$$

gde je $z = Q/2p = 30$ broj žlebova po polu. Utvrđeno je da je uslov $k_1 \geq 0.9$ ispunjen za $y \geq 24$. Od vrednosti navojnog koraka koje se uzimaju u obzir, najmanja (apsolutna) vrednost tetivnog navojnog sačinioaca za peti harmonik ostvaruje se pri $y = 24$ i iznosi $k_{t5} = 0$. Dakle, usvaja se vrednost navojnog koraka:

$$\boxed{y = 24}$$

- b) Na osnovu postupka prikazanog u zadacima sa računskih vežbi, može se utvrditi da će sedmi harmonik biti jednak nuli kada namotaj pod polom zahvata ugao (pogledati sliku K1.1):

$$2\rho = 54.4^\circ \quad \text{ili} \quad 2\rho = 102.8^\circ \quad \text{ili} \quad 2\rho = 154.3^\circ. \quad (\text{K1.2})$$

Vrednost osnovnog harmonika indukcije približnija je maksimalnoj vrednosti ukupne indukcije za treću vrednost, tako da se usvaja vrednost ugla koji zahvata namotaj pod jednim polom od

$$\boxed{2\rho = 154.3^\circ}$$

- c) Vrednost resultantnog navojnog sačinioaca statorskog namotaja za osnovni harmonik iznosi:

$$k_1 = k_{p1}k_{t1} = \frac{\sin\left(\frac{m}{z}\frac{\pi}{2}\right)}{m \sin\left(\frac{1}{z}\frac{\pi}{2}\right)} \sin\left(\frac{y}{z}\frac{\pi}{2}\right) = 0.9086. \quad (\text{K1.3})$$

Broj navojaka po fazi statorskog namotaja može se odrediti na osnovu izraza za osnovni harmonik indukovane ems po fazi i datog uslova da je ta vrednost jednaka *nominalnom faznom naponu*:

$$E_{1f} = 4.44fN_s k_1 \cdot \Phi_1 = 4.44fN_s k_1 \cdot \left(B_1 \frac{Dl}{p}\right) = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \implies N_s = 19.48 \quad (\text{K1.4})$$

Broj navojaka po sekciji dvoslojnog namotaja iznosi $N_{z1} = N_s/N_{sec} = N_s/(Q/q) = 0.95$. Usvaja se najpribližnija celobrojna vrednost: $N_{z1} = 1$. S obzirom na to, najpovoljnija praktično ostvariva vrednost broj navojaka po fazi statora iznosi:

$$\boxed{N_s = N_z \cdot Q/q = 20} \quad (\text{K1.5})$$

Za usvojen broj navojaka po fazi i datu vrednost nominalnog napona, stvarna vrednost indukcije u međugvožđu iznosiće:

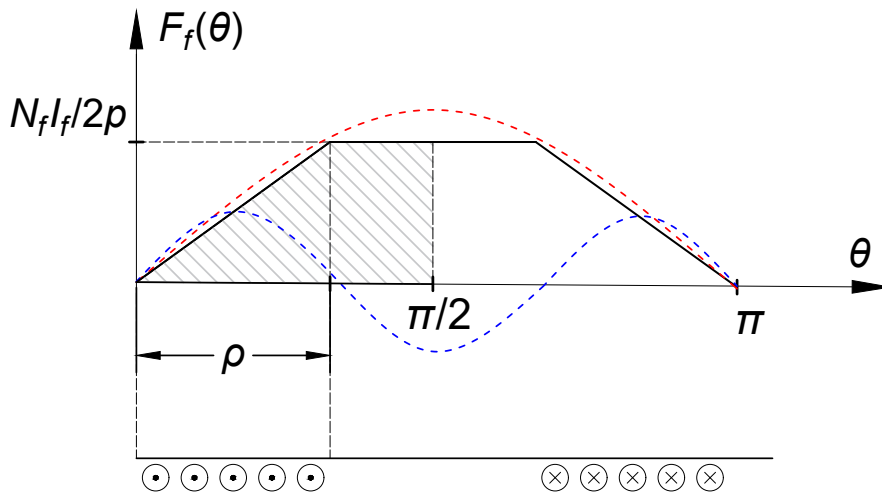
$$B_1 = \frac{U_n / \sqrt{3}}{4.44 k_1 f N_s D l} = 0.8534 \text{ T.} \quad (\text{K1.6})$$

Raspodela mps pobudnog namotaja turbogenerators data je na slici K1.1, pri čemu je $\rho = 77.14^\circ$. Pobudna struja pri kojoj se ima nominalan napon u praznom hodu dobija se na osnovu uslova:

$$B_{f1} = k_{f1} \frac{N_f I_{f0}}{2p} \cdot \frac{\mu_0}{\delta} = \frac{4 \sin \rho}{\pi} \frac{N_f I_{f0}}{2p} \cdot \frac{\mu_0}{\delta} = B_1, \quad (\text{K1.7})$$

tj. iz uslova da pobudna struja stvara osnovni harmonik indukcije koji odgovara nominalnom naponu (ems) statora. Na osnovu ovog uslova, dobija se tražena vrednost pobudne struje:

$$\boxed{I_{f0} = 1286 \text{ A}} \quad (\text{K1.8})$$



Slika K1.1: Raspodela mps pobudnog namotaja turbogenerators

2. Predavanja, vežbe.

Drugi kolokvijum

1. (a) Predavanja.

- (b) Kako je u posmatranom režimu motor natpobuđen, struja mora biti kapacitivnog karaktera, te je vrednost pobudne ems veća od vrednosti napona napajanja, i data je izrazom:

$$\underline{E}_{f1} = U_1 - j X_s I_1 (\cos \varphi_1 - j \sin \varphi_1), \quad (\text{K2.1})$$

gde je sa U_1 označena efektivna vrednost faznog napona u prvom režimu. Kada se napon napajanja smanji za 10%, s obzirom na to da moment opterećenja, a samim tim i aktivna snaga motora, moraju ostati konstantni, to mora važiti:

$$\begin{aligned} U_1 I_1 \cos \varphi_1 &= U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 0.9 U_1 I_2 \cos \varphi_2 \implies \\ I_2 \cos \varphi_2 &= \frac{I_1 \cos \varphi_1}{0.9} \implies \cos \varphi_2 = 0.8621 \end{aligned} \quad (\text{K2.2})$$

Pretpostavimo da motor posle smanjenja napona i dalje radi u natpobuđenom režimu. Ovo je razumna pretpostavka, ako se ima u vidu da promena napona nije velika. Vrednosti ugla φ u analiziranim režimima sada iznose:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -25.84^\circ \\ \varphi_2 &= -30.45^\circ \end{aligned} \quad (\text{K2.3})$$

Dakle, struja je u oba slučaja kapacitivna, jer je u pitanju natpobuđen režim.

Kako je u pitanju motor sa stalnim magnetima, efektivna vrednost pobudne ems je konstantna. Stoga, važi sledeća jednakost:

$$\begin{aligned} E_{f1} &= E_{f2} = E_f \implies \\ (U_1 - X_s I_1 \sin \varphi_1)^2 + (X_s I_1 \cos \varphi_1)^2 &= (U_2 - X_s I_2 \sin \varphi_2)^2 + (X_s I_2 \cos \varphi_2)^2, \end{aligned} \quad (\text{K2.4})$$

ili, nakon sređivanja:

$$(I_2^2 - I_1^2) X_s^2 + 2(U_1 I_1 \sin \varphi_1 - U_2 I_2 \sin \varphi_2) X_s + (U_2^2 - U_1^2) = 0 \quad (\text{K2.5})$$

Rešavanjem ove kvadratne jednačine dobija se sinhrona reaktansa mašine:

$$X_s = 4.557 \, \Omega \quad (\text{K2.6})$$

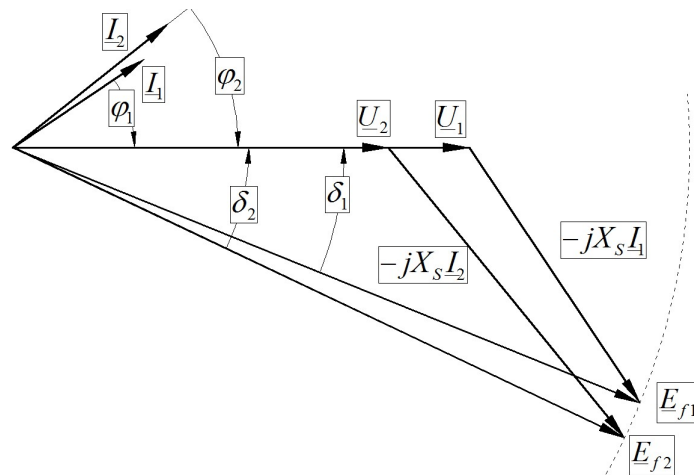
Pobudna ems može se odrediti na osnovu izraza za bilo koji od dva analizirana režima i iznosi:

$$E_f = 287.9 \, \text{V} \quad (\text{K2.7})$$

Maksimalni moment koji motor može da razvije pri nominalnom naponu iznosi:

$$M_{\max} = \frac{3 E_f U_1}{\Omega_s X_s} = 264.7 \, \text{Nm} \quad (\text{K2.8})$$

Vektorski dijagrami motora u oba radna režima prikazani su na slici K2.1.



Slika K2.1: Vektorski dijagrami napona motora u prvom i drugom režimu

2. Predavanja, vežbe.

3. Predavanja.

4. (a) Predavanja, vežbe.

(b) Najpre treba odrediti struju koja odgovara početnom radnom režimu. U tom režimu važi:

$$\underline{e}_f = u - jx_s \underline{i}^{(0)} \quad (\text{K2.9})$$

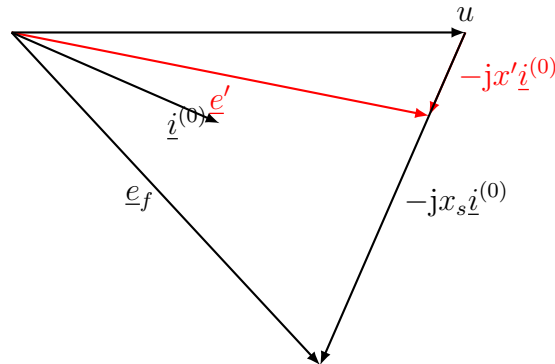
gde je $|\underline{e}_f| = 1$, jer se pobudna struja ne menja nakon sinhronizacije. Na osnovu toga i uslova $|\underline{i}^{(0)}| = 0.5$ r.j, može se odrediti fazni stav struje iz izraza za modul ems:

$$|\underline{e}_f|^2 = (u - x_s i^{(0)} \sin \varphi)^2 + (x_s i^{(0)} \cos \varphi)^2 \implies \varphi = 23.6^\circ \quad (\text{K2.10})$$

Kako je ugao φ pozitivan, struja kasni za naponom, tj. motor je potpobuđen (pogledati dijagram na slici K2.2). Tranzijentna ems se sada može odrediti kao:

$$\underline{e}' = u - jx_d' \underline{i}^{(0)} = 0.9381 \angle -11.27^\circ \text{ r.j.} \quad (\text{K2.11})$$

Vektorski dijagram za tranzijentni režim prikazan je zajedno sa dijagramom za ustaljeno stanje na slici K2.2.



Slika K2.2: Vektorski dijagram za ustaljeno stanje i tranzijentni režim

Tranzijentna ugaona karakteristika data je izrazom:

$$m'(\delta) = \frac{e' u}{x_d'} \sin \delta = \hat{m} \sin \delta = 2.34 \sin \delta \quad (\text{K2.12})$$

Uslov stabilnosti glasi:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{gr}} (m_{\max} - \hat{m} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{gr}}^{\pi - \delta_{gr}} (\hat{m} \sin \delta - m_{\max}) d\delta \quad (\text{K2.13})$$

gde je $\delta_0 = 11.27^\circ$. Prethodni uslov se, nakon smene $m_{\max} = \hat{m} \sin \delta_{gr}$, svodi na:

$$\sin \delta_{gr} (\pi - \delta_{gr} - \delta_0) = \cos \delta_0 + \cos \delta_{gr} \implies \delta_{gr} = 41.43^\circ \quad (\text{K2.14})$$

Maksimalni dozvoljeni udarni moment iznosi:

$$m_{\max} = \hat{m} \sin \delta_{gr} = 1.548 \text{ r.j.} \quad (\text{K2.15})$$