

Zadatak 1.

Za trofazni dvopolni turbogenerator nominalne snage $S_n = 555 \text{ MVA}$, napona $U_n = 24 \text{ kV}$, učestanosti $f_n = 60 \text{ Hz}$ i faktora snage $\cos\varphi_n = 0.9$ induktivno, poznati su sljedeći podaci:

$$L_{aa} = 3.2758 + 0.0458\cos 2\theta \text{ mH},$$

$$L_{ab} = -1.6379 - 0.0458\cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \text{ mH},$$

$$L_{aF} = 40\cos\theta \text{ mH},$$

$$L_F = 576.92 \text{ mH},$$

$$R = 0.0031 \Omega,$$

$$R_F = 0.0715 \Omega.$$

- Odrediti vrijednosti induktivnosti L_d i L_q .
- Ako je induktivnosti rasipanja statora $L_{\sigma a} = 0.4219 \text{ mH}$, odrediti vrijednosti induktivnosti L_{ad} i L_{aq} .
- Koristeći sistem jediničnih vrijednosti, odrediti relativne vrijednosti parametara: L_d , L_q , $L_{\sigma a}$, L_{ad} , L_{aq} , M_F , L_F , $L_{\sigma F}$, R i R_F .

Rješenje:

- Na osnovu analitičkih izraza za sopstvene i međusobne induktivnosti faznih namotaja statora:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$
$$L_{ab} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)$$

Iako je odrediti parametre:

$$L_s = 3.2758 \text{ mH}$$

$$L_m = 0.0458 \text{ mH}$$

$$M_s = 1.6379 \text{ mH}$$

Tada se direktna i poprečna sinhrona induktivnost određuju kao:

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m = 4.9824 \text{ mH}$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m = 4.845 \text{ mH}$$

- Uz poznate vrijednosti sinhronih induktivnosti, induktivnosti reakcije statora po direktnoj i poprečnoj osi se određuju kao:

$$L_{ad} = L_d - L_{\sigma a} = 4.5695 \text{ mH}$$

$$L_{aq} = L_q - L_{\sigma a} = 4.4312 \text{ mH}$$

c) Prije prelaska na sistem jediničnih vrijednosti, neophodno je odrediti bazne vrijednosti parametara statora i parametara rotora. Za parametre statora važi:

$$S_B = \frac{S_n}{3} = 185 \text{ MVA}$$

$$V_B = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 13.8564 \text{ kV}$$

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} = 13.3512 \text{ kA}$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = 1.0378 \text{ } \Omega$$

$$\omega_B = 2\pi f_n = 376.9911 \frac{\text{el. rad}}{\text{s}}$$

$$L_B = \frac{Z_B}{\omega_B} = 2.7529 \text{ mH}$$

Za određivanje baznih vrijednosti parametara rotora neophodno je proračunati faktor proporcionalnosti između statora i rotora kao:

$$k_F = \frac{kM_F}{L_{ad}} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}M_F}{L_{ad}} = 10.721$$

gdje je M_F moguće identifikovati na osnovu analitičkog izraza za međusobnu induktivnosti između faznih namotaja statora i pobudnog namotaja.

Tada je:

$$V_{FB} = k_F V_B = 148.5545 \text{ kV}$$

$$I_{FB} = \frac{I_B}{k_F} = 1.2453 \text{ kA}$$

$$Z_{FB} = k_F^2 Z_B = 119.2846 \text{ } \Omega$$

$$L_{FB} = k_F^2 L_B = 316.4179 \text{ mH}$$

$$M_{FB} = k_F L_B = 29.5138 \text{ mH}$$

Nakon određivanja baznih vrijednosti parametara sinhronog generatora, relativne vrijednosti se određuju kao:

$$l_d = \frac{L_d}{L_B} = 1.81$$

$$l_q = \frac{L_q}{L_B} = 1.76$$

$$l_{\sigma a} = \frac{L_{\sigma a}}{L_B} = 0.15$$

$$l_{ad} = \frac{L_{ad}}{L_B} = l_d - l_{\sigma a} = 1.66$$

$$l_{aq} = \frac{L_{aq}}{L_B} = l_q - l_{\sigma a} = 1.61$$

$$m_F = \frac{M_F}{M_{FB}} = 1.3552$$

$$l_F = \frac{L_F}{L_{FB}} = 1.8233$$

$$l_{\sigma F} = l_F - l_{ad} = 0.1633$$

$$r = \frac{R}{Z_B} = 0.003$$

$$r_F = \frac{R_F}{Z_{FB}} = 0.0006$$

Zadatak 2.

Na osnovu poznatih relativnih vrijednosti parametara sinhronog generatora iz prethodnog zadatka:

- a) Kada generator isporučuje nominalnu prividnu snagu pri nominalnom faktoru snage i nominalnom naponu na krajevima, proračunati:
- unutrašnji električni ugao generatora δ ,
 - jedinične vrijednosti napona (v_d, v_q), struja (i_d, i_q, i_F, i_D, i_Q), magnetskih obuhvatanja (ψ_d, ψ_q, ψ_F) i unutrašnje elektromotorne sile generatora e_f ,
 - relativnu i apsolutnu vrijednost elektromagnetnog momenta.

Pretpostaviti da je efekat zasićenja takav da smanjuje vrijednost reaktanse reakcije statora na 83.5% njihovih vrijednosti u nezasićenom stanju.

- b) Proračunati ugao rotora δ i pobudnu struju i_F koristeći uprošćeni Teveninov ekvivalent uz zanemarenje otpora namotaja statora.

Rješenje:

- a) Na osnovu poznate prividne snage i faktora snage, kompleksna snaga na krajevima generatora se određuje kao:

$$\underline{s} = p + jq = s(\cos\varphi + j\sin\varphi) = 0.9 + j0.4359 = 1|25.8419^\circ$$

Uz poznatu kompleksnu snagu i napon na krajevima generatora, struja generatora se određuje kao:

$$\underline{i} = \left(\frac{\underline{s}}{\underline{v}} \right)^* = \frac{p - jq}{v} = 0.9 - j0.4359 = 1 \angle -25.8419^\circ$$

Prilikom proračuna parametara sinhronog generatora, neophodno je uzeti u obzir efekat zasićenja na induktivnost reakcije statora:

$$\begin{aligned} l_{ad}^s &= 0.835l_{ad} = 1.3861 \\ l_{aq}^s &= 0.835l_{aq} = 1.3443 \\ l_d^s &= x_d^s = l_{ad}^s + l_{\sigma a} = 1.5361 \\ l_q^s &= x_q^s = l_{aq}^s + l_{\sigma a} = 1.4943 \\ l_F^s &= l_{ad}^s + l_{\sigma F} = 1.5494 \\ m_F^s &= 0.835m_F = 1.1316 \end{aligned}$$

Za poznate uslove na kraju sinhronog generatora, vrijednost unutrašnjeg električnog ugla generatora je moguće odrediti na osnovu fazora fiktivne elektromotorne sile generatora \underline{e}_q koji je definisan relacijom:

$$\underline{e}_q = \underline{v} + r\underline{i} + jx_q^s\underline{i} = v + ri(\cos\varphi - j\sin\varphi) + jx_q^si(\cos\varphi - j\sin\varphi)$$

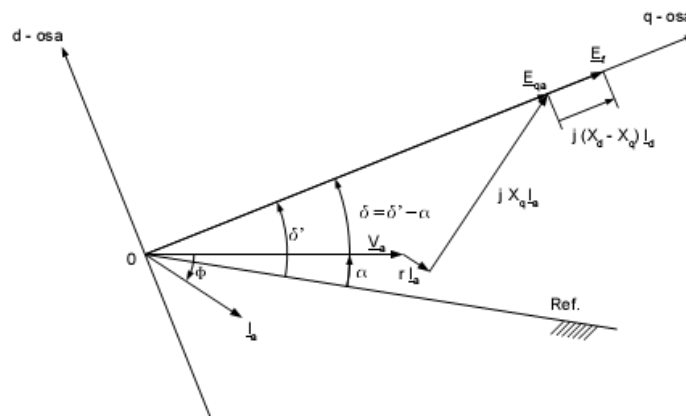
Razdvajanjem na realni i imaginarni dio:

$$\underline{e}_q = (v + r\cos\varphi + x_q^s i \sin\varphi) + j(x_q^s i \cos\varphi - r\sin\varphi)$$

vrijednost ugla δ se određuje kao:

$$\delta = \arctg \frac{x_q^s i \cos\varphi - r\sin\varphi}{v + r\cos\varphi + x_q^s i \sin\varphi} = \arctg 0.8123 = 39.0862^\circ$$

Veza između fiktivne elektromotorne sile generatora, položaja q – ose i drugih parametara režima generatora prikazana je na fazorskom dijagramu sinhronog generatora.



Na osnovu fazorskog dijagrama sinhronog generatora, moguće je odrediti relativne vrijednosti komponenti napona po d i q – osi:

$$v_d = -v \sin \delta = -0.6305$$

$$v_q = v \cos \delta = 0.7762$$

kao i komponente struje po d i q – osi:

$$i_d = -i \sin(\delta + \varphi) = -0.9058$$

$$i_q = i \cos(\delta + \varphi) = 0.4238$$

Tada se vrijednosti unutrašnje elektromotorne sile i pobudne struje generatora određuje kao:

$$e_f = v_q + r i_q - x_d^s i_d = 2.1689$$

$$i_F = \frac{e_f}{x_{ad}^s} = 1.5648$$

Kako je u pitanju stacionarno radno stanje generatora, kroz prigušne namotaje ne protiče struja, tako da važi $i_D = i_Q = 0$.

U stacionarnom stanju, fluksevi se određuju kao:

$$\psi_d = l_d^s i_d + k m_F^s i_F = 0.7773$$

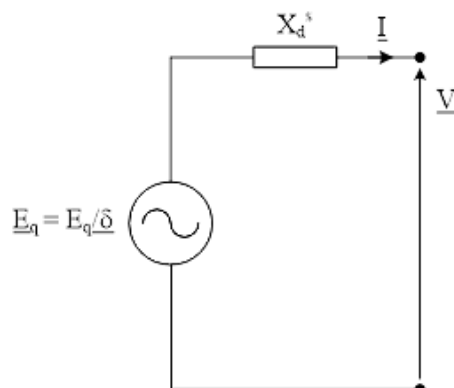
$$\psi_q = l_q^s i_q = 0.6333$$

Elektromagnetni moment se određuje kao:

$$m_e = p + r i^2 = 0.903$$

$$M_e = m_e M_B = m_e \frac{3 S_B}{\omega_{mB}} = 0.903 \frac{3 \frac{555}{3} 10^6}{120\pi} = 1.329 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

b) Uprošćeni Teveninov ekvivalent sinhronog generatora sa zanemarenom aktivnom otpornošću generatora je:



Naponska jednačina Teveninovog ekvivalenta sinhronog generatora je:

$$\underline{e}_f = e_f \angle \delta = \underline{v} + jx_{ad}^s \underline{i} = 1 + j1.5361 \cdot (0.9 - j0.4359) = 2.1677 \angle 39.6262^\circ$$

Pobudna struja generatora je tada:

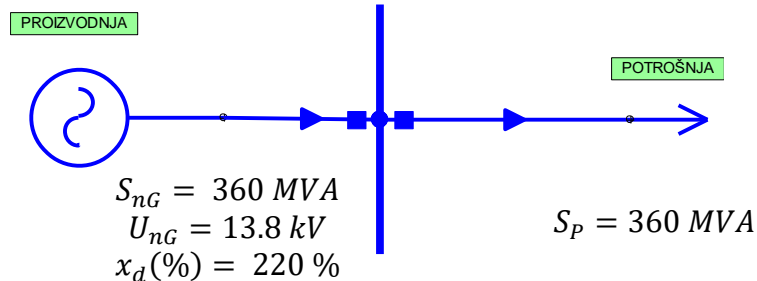
$$i_F = \frac{e_f}{x_{ad}^s} = 1.5639$$

U daljim analizama mreža će se koristiti Teveninov ekvivalent sinhronog generatora, jer se njegovom primjenom dobijaju neznatna odstupanja od potpunog matematičkog modela sinhronog generatora.

Zadatak 3.

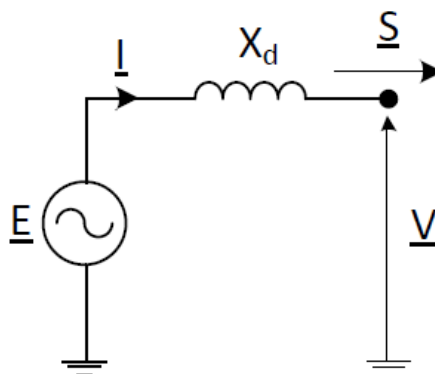
Odrediti struju i elektromotornu silu generatora ukoliko generator pri nominalnom naponu na sabirnicama snabdijeva energijom potrošača za sljedeće slučajeve:

- Faktor snage potrošača je 1,
- Faktor snage potrošača je 0.85 induktivno i
- Faktor snage potrošača je 0.85 kapacitivno.



Rješenje:

Zamjenska šema sistema je:



Reaktansa sinhronog generatora se određuje kao:

$$X_d = \frac{x_d(\%) U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{220 \cdot 13.8^2}{100 \cdot 360} = 1.1638 \Omega$$

a) S obzirom na jedinični faktor snage, potrošač je čisto aktivnog karaktera, tako da se kompleksna snaga i kompleksna struja generatora određuju kao:

$$\underline{S} = P = 360 \text{ MW}$$

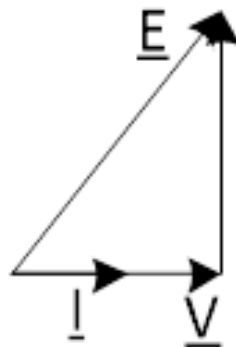
$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}U} = \frac{360}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 15.0613 \text{ kA}$$

pa je unutrašnja elektromotorna sila generatora:

$$\underline{E} = \underline{U} + j\sqrt{3}X_d\underline{I} = 13.8 + j\sqrt{3} \cdot 1.164 \cdot 15.0613 = 13.8 + j30.3652$$

$$= 33.3539 \angle 65.5597^\circ$$

Fazorski dijagram sinhronog generatora za date uslove rada je:



b) Faktor snage je 0.85 induktivno, pa su kompleksna snaga i struja generatora:

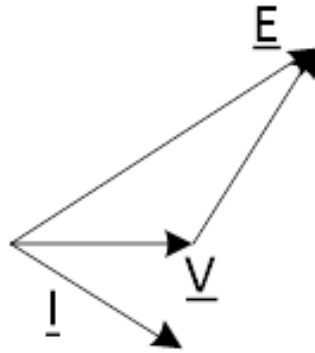
$$\underline{S} = S(\cos\varphi + j\sin\varphi) = 360(0.85 + j0.5268) = (306 + j189.65) \text{ MVA}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}U} = \frac{306 - j189.65}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 15.0613 \angle -31.7883^\circ \text{ kA}$$

pa je unutrašnja elektromotorna sila generatora:

$$\underline{E} = \underline{U} + j\sqrt{3}X_d\underline{I} = 39.4159 \angle 40.8977^\circ \text{ kV}$$

Fazorski dijagram sinhronog generatora za date uslove rada je:



c) Faktor snage je 0.85 kapacitivno, pa su kompleksna snaga i struja generatora:

$$\underline{S} = S(\cos\varphi + j\sin\varphi) = 360(0.85 - j0.5268) = (306 - j189.65) \text{ MVA}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}U} = \frac{306 + j189.65}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 15.0613[31.7883^\circ] \text{ kA}$$

pa je unutrašnja elektromotorna sila generatora:

$$\underline{E} = \underline{U} + j\sqrt{3}X_d\underline{I} = 25.8990[94.8576^\circ] \text{ kV}$$

Fazorski dijagram sinhronog generatora za date uslove rada je:

