

1. Za trofazni dvopolni turbogenerator nominalne prividne snage $S_n = 555 \text{ MVA}$, poznati su sljedeći podaci:

$$V_n = 24 \text{ kV};$$

$$\cos\varphi_n = 0.9 \text{ ind};$$

$$f = 60 \text{ Hz};$$

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

$$L_{ab} = L_{ba} = -1.6379 - 0.0458\cos 2(\theta + \pi/6) \text{ mH};$$

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

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

$$R = 0.0031 \Omega;$$

$$R_F = 0.0715 \Omega;$$

- Odrediti vrijednost induktiviteta L_d i L_q u H,
- Ako je induktivnost rasipanja statora $l_d = l_q = 0.4129 \text{ mH}$, odrediti induktivitete L_{md} i L_{mq} u H,
- Odrediti sljedeće relativne vrijednosti induktiviteta i otpora mašine, koristeći L_{AD} recipročni sistem relativnih jedinica: $l, L_{AD}, L_{AQ}, L_d, L_q, L_{mF}, l_F, r$ i r_F .

RJEŠENJE:

- Potrebno je izvršiti transformaciju iz abc sistema u Odq sistem (Parkove transformacije)

Ako se zna da je:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

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

$$L_{aF} = M_F \cos \theta$$

$$L_{aD} = M_D \cos \theta$$

$$L_{aQ} = M_Q \sin \theta$$

onda je iz definicije zadatka lako uočiti da je

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

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

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

slijedi da je:

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m = 4.9825 \text{ mH} \quad \text{– uzdužna ili direktna sinhrona induktivnost}$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m = 4.8451 \text{ mH} \quad \text{– poprečna sinhrona induktivnost}$$

Možemo zaključiti da su L_d i L_q konstantne veličine u Odq sistemu što značajno pojednostavljuje modelovanje mašine.

b) L_{md} i L_{mq} su induktivnosti magnećenja po d i q osi respektivno

$$L_{md} = L_d - l_d = 4.5696 \text{ mH}$$

$$L_{mq} = L_q - l_q = 4.432 \text{ mH}$$

c) Bazne vrijednosti promjenljivih i parametara statora su:

$$S_{1B} = \frac{555}{3} = 185 \text{ MVA}$$

$$V_{1B} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.856 \text{ kV}$$

$$I_{1B} = \frac{S_{1B}}{V_{1B}} = 13.352 \text{ kA}$$

$$R_{1B} = Z_{1B} = \frac{V_{1B}}{I_{1B}} = 1.03784 \Omega$$

$$\omega_B = \omega_n = 2\pi f_n = 377 \text{ el.rad/s} \rightarrow t_B = \frac{1}{\omega_B} = 0.0026525 \text{ s/rad}$$

$$L_{1B} = \frac{V_{1B} t_B}{I_{1B}} = \frac{Z_{1B}}{\omega_B} = 2.753 \text{ mH}$$

$$k_F = \frac{kM_F}{L_{md}} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} M_F}{L_{md}} = 10.721 \text{ (faktor za prelazak na rotorove veličine sa baznih statorskih veličina)}$$

$$V_{FB} = k_F V_{1B} = 148.548 \text{ kV}$$

$$I_{FB} = \frac{I_{1B}}{k_F} = 1.2454 \text{ kA}$$

$$R_{FB} = k_F^2 Z_{1B} = 119.29 \Omega$$

$$L_{FB} = k_F^2 L_{1B} = 316.429 \text{ mH}$$

$$M_{FB} = k_F L_{1B} = 29.515 \text{ mH}$$

Nakon formiranja svih baznih veličina potrebno je odrediti relativne vrijednosti svih veličina i parametara od interesa. Obično se prilikom označavanja relativnih vrijednosti dodaje indeks „u“ (eng. *unit*) ili se sve veličine pišu malim pisanim slovima.

$$l_u = l_{du} = l_{qu} = \frac{l_d}{L_{1B}} = 0.15 \rightarrow \text{rasipanje po d (q) osi statora}$$

$$L_{ADu} = \frac{L_{md}}{L_{1B}} = 1.66 \rightarrow \text{induktivnost magnećenja namotaja statora po d-osi}$$

$$L_{AQu} = \frac{L_{mq}}{L_{1B}} = 1.61$$

$$L_{du} = \frac{L_d}{L_{1B}} = L_{ADu} + l_u = 1.81 \rightarrow \text{induktivnost namotaja statora po direktnoj osi}$$

$$L_{qu} = \frac{L_q}{L_{1B}} = L_{AQu} + l_u = 1.76$$

$$L_{mFu} = kM_{Fu} = L_{mdu} = L_{mDu} = kM_{Du} = L_{ADu} = 1.66$$

Namotaj pobude i prigušni D namotaj su po d-osi, pa im je ista vrijednost induktivnosti magnećenja (ista osa = isti magnetni put).

M_F i M_D - međusobna induktivnost namotaja na statoru (a,b ili c) i F ili D namotaja respektivno.

$$L_{Fu} = \frac{L_F}{L_{FB}} = 1.825$$

$$l_{Fu} = L_{Fu} - L_{mFu} = 0.165$$

$$r_u = \frac{R}{Z_{1B}} = 0.03$$

$$r_{Fu} = \frac{R_F}{R_{FB}} = 0.0006$$

2. Na osnovu poznatih relativnih vrijednosti otpora i induktiviteta dvopolnog generatora iz prethodnog zadatka,

a) Kada generator isporučuje nominalnu prividnu snagu pri $\cos\varphi_n = 0.9$ ind i nominalnom naponu na krajevima mašine, proračunati:

- unutrašnji električni ugao generatora δ
- jedinične vrijednosti napona (v_d, v_q), ems e_{FD} , struja (i_d, i_q, i_F, i_D, i_Q) i flukseva ($\lambda_F, \lambda_d, \lambda_q$)
- elektromagnetni momenat M_e u relativnim jedinicama i u Nm.

Pretpostaviti da je efekat zasićenja takav da smanjuje L_{AD} i L_{AQ} na 83.5 % od vrijednosti definisanih za nezasićeno stanje.

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

RJEŠENJE:

Pri izradi zadatka koristeće se jedinične vrijednosti veličina i parametara

$$S_B = \frac{S_n}{3} \quad V_B = \frac{V_n}{\sqrt{3}}$$

$$s = \frac{S_{n1}}{S_B} = 1 \Rightarrow p = s \cdot \cos \varphi_n = 0.9 \quad q = s \cdot \sin \varphi_n = 0.436$$

$$v = 1 \quad i = 1 \quad i = i(\cos \varphi_n - j \sin \varphi_n) = (0.9 - j0.436)$$

Uzimajući u obzir zasićenje:

$$L_{AD}^s = 0.835 L_{AD} = 1.386$$

$$L_{AQ}^s = 1.344$$

$$L_d^s = L_{AD}^s + l_d = 1.536$$

$$L_q^s = L_{AQ}^s + l_q = 1.494$$

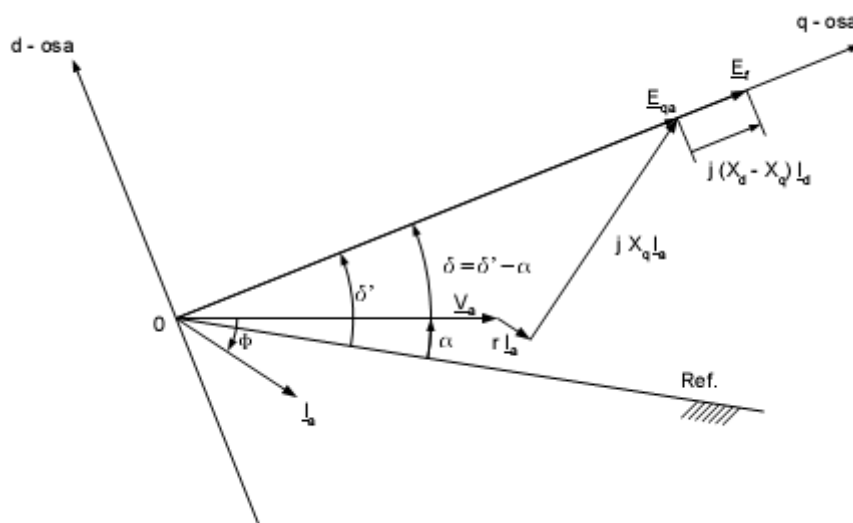
$$L_F^s = L_{AD}^s + l_F = 1.551$$

$$M_F^s = \frac{L_{AD}^s}{k} = \frac{1.386}{\sqrt{3/2}} = 1.1317$$

$$X_d^s = L_d^s$$

$$X_q^s = L_q^s$$

Ako se nacrtaju vektorski dijagrami sinhronog generatora pri poznatim uslovima na krajevima mašine,



može se primjetiti da je traženi ugao:

$$\delta = \arctg \frac{X_q^s I \cos \varphi - r I \sin \varphi}{V + r I \cos \varphi + X_d^s I \sin \varphi} = \arctg 0.812 = 39.1^\circ$$

sada je

$$v_d = -v \cdot \sin \delta = -0.631$$

$$i_d = -i \cdot \sin(\delta + \varphi) = -0.906$$

$$v_q = v \cdot \cos \delta = 0.776$$

$$i_q = i \cdot \cos(\delta + \varphi) = 0.423$$

$$e_f = v_q + r i_q - x_d i_d = 2.1699$$

$$i_f = \frac{e_f}{x_{AD}} = 1.565$$

Kako je u pitanju stacionarno radno stanje generatora, poznato je da kroz prigušne namotaje ne teče struja.

$$i_D = 0 \quad i_Q = 0 \quad \text{tada su fluksevi}$$

$$\Phi_F = L_F i_F + k M_F i_d = 1.172$$

$$\Phi_d = L_d i_d + k M_F i_F = 0.7775$$

$$\Phi_q = L_q i_q = 0.632$$

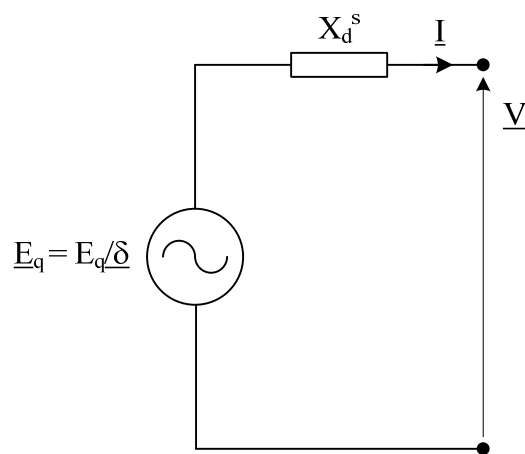
$$m_e = p + r \cdot i^2 = 0.9 + 0.003 \cdot 1^2 = 0.903$$

$$M_e = m_e M_B$$

$$M_B = \frac{3 S_B}{\omega_{mechB}} = \frac{3 \cdot 555 \cdot 10^6}{2\pi f_n} = 1.472 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

$$M_e = 1.329 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

b) Uprošćeni Teveninov ekvivalent sinhronog generatora (zanemarena je aktivna otpornost generatora) je



sada je

$$\underline{E}_q = E_q / \delta = \underline{V} + j X_d^s I = 2.168 / 39.61^\circ$$

$$E_q = L_{AD} \cdot i_f = 2.168$$

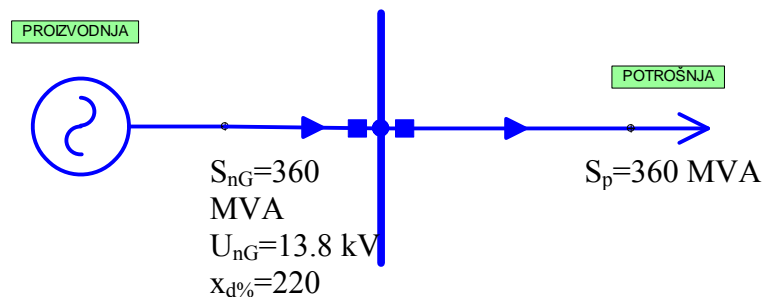
Kao što se može vidjeti, i pored znatno uprošćenijeg modela sinhronne mašine, dobijeno odstupanje za ugao δ je malo (39.61° u odnosu na 39.1°).

$$i_f = \frac{E_q}{L_{AD}} = 1.564 \text{ - ranije dobijena vrijednost je } 1.565 \text{ što je takođe vrlo blisko.}$$

U daljim analizama mreža koristiće se Teveninov ekvivalent sinhronog generatora, jer kako se vidi iz zadatka dobijaju se mala odstupanja u odnosu na potpuni matematički model.

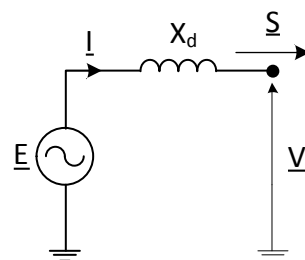
3. Odrediti struju i elektromotornu silu generatora ukoliko generator pri nominalnom naponu na sabirnicama snabdijeva energijom potrošača za sljedeće slučajeve:

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



Riješenje:

Zamjenska šema za dio sistema sa prethodne slike je,



Reaktansa generatora je:

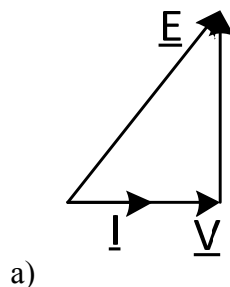
$$X_d = \frac{220}{100} \frac{13.8^2}{360} = 1.164 \Omega.$$

- S obzirom na jedinični faktor snage zaključuje se da je potrošač čisto aktivan i troši samo aktivnu snagu, pa važi $\underline{S} = P = 360 \text{ MW}$. Slijedi da je struja potrošača (generatora):

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}V} = \frac{360}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 15.061 \text{ kA}$$

Napon na sabirnicama generatora je uzet po faznoj osi. Sada je ems generatora:

$$\underline{E} = \underline{V} + j\sqrt{3}X_d\underline{I} = 13.8 + j\sqrt{3} \cdot 1.164 \cdot 15.061 = 13.8 + j30.364 = 33.352 \angle 65.6^\circ \text{ kV}.$$



- Faktor snage je 0.85 induktivno pa je snaga potrošača

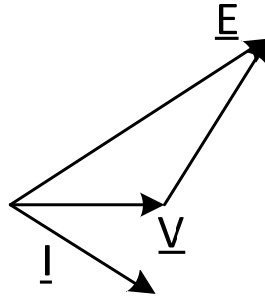
$$\underline{S} = 360(\cos \varphi + j \sin \varphi) = 360(0.85 + j0.53) = (306 + j190.8) \text{ MVA}$$

Sada je struja generatora:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}V} = \frac{306 - j190.8}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = (12.802 - j7.982) = 15.087 \angle -31.9^\circ \text{ kA},$$

a elektromotorna sila

$$\underline{E} = \underline{V} + j\sqrt{3}X_d \underline{I} = 23.092 + j25.811 = 34.633 \angle 48.182^\circ \text{ kV}.$$



b)

c) U slučaju kada je potrošač kapacitivnog karaktera, njegova snaga je

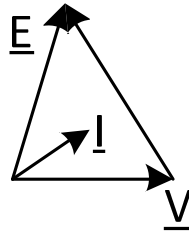
$$\underline{S} = 360(\cos \varphi - j \sin \varphi) = 360(0.85 - j0.53) = (306 - j190.8) \text{ MVA}.$$

Sada je struja generatora:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}V} = \frac{306 + j190.8}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = (12.802 + j7.982) = 15.087 \angle 31.9^\circ \text{ kA},$$

a elektromotorna sila

$$\underline{E} = \underline{V} + j\sqrt{3}X_d \underline{I} = 4.508 + j25.811 = 26.202 \angle 80.1^\circ \text{ kV}.$$



c)