

Zadatak 1

Za pojednostavljeni (1) i stvarni (2) oblik jednadžbe njihjanja potrebno je:

- izvesti izraz za kutnu brzinu vrtnje stroja ω kao funkciju vremena t , poremećaja δp i konstante tromosti H . Početna brzina je ω_0 , a početni vremenski trenutak je t_0 ;
- odrediti relativnu grešku u izračunatoj brzini ω nakon $t = 1$ s preko pojednostavljenog modela u odnosu na stvarni model za poremećaj $\delta p = 0.3$ p.u., $H = 3$ s, $\omega_0 = 1.0$ p.u. i $t_0 = 0$ s.

$$2H \frac{d\omega}{dt} = \delta p \quad (1)$$

$$2H\omega \frac{d\omega}{dt} = \delta p \quad (2)$$

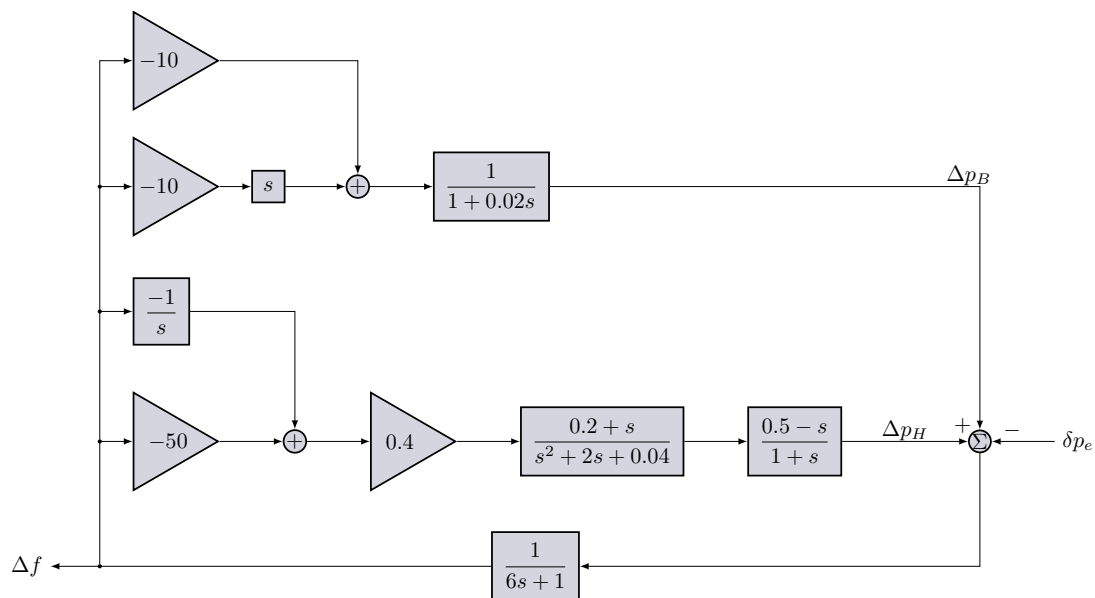
(8 bodova)

Zadatak 2

Za dinamički sustav hidroelektrane i baterije sa slike 1 potrebno je odrediti:

- odstupanje frekvencije u stacionarnom stanju za skokovit porast potrošnje od 0.2 p.u.;
- početnu brzinu promjene frekvenciju za isti poremećaj kao i pod a);
- ukupnu regulacijsku energiju sustava i ukupnu statičnost proizvodnih jedinica.

(6 bodova)



Slika 1: Dinamički sustav hidroelektrane i baterije

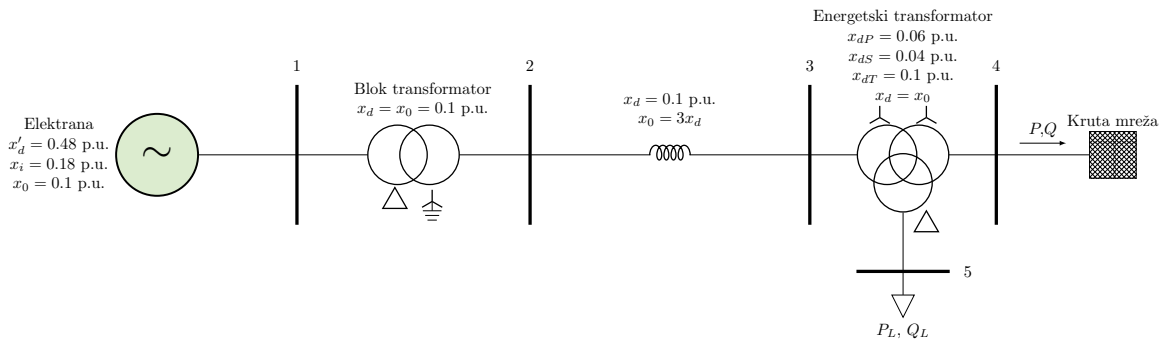
Zadatak 3

Neka elektrana spojena je na krutu mrežu preko blok-transformatora, dalekovoda i tronamotnog energetskog transformatora prema slici 2. Tercijar (T) tronamotnog transformatora napaja lokalnu potrošnju $P_L = 0.1$ p.u., $\cos \varphi_L = 1.00$. Potrošnju modelirajte kao konstantnu impedanciju koja bi trošila zadanu snagu pri naponu $|v_L| = |v_5| = 1.0$ p.u. Sekundarom (S) tronamotnog transformatora smatrajte namot priključen na sabirnicu 4.

Elektrana u poduzbuđenom režimu rada u krutu mrežu predaje snagu $P = 0.7$ p.u. pri $\cos \varphi = 0.95$. Napon krute mreže iznosi $1 \angle 0^\circ$ p.u. Na polovici dalekovoda nastaje dvopolni kratki spoj sa zemljom. Potrebno je 1) odrediti kritični kut uklanjanja kvara i 2) nacrtati nadomjesnu shemu sustava sa slike 2 te odrediti izraz i skicirati krivulje za prijenos električne snage između elektrane i krute mreže za slučajeve:

- prije nastanka kratkog spoja;
- tijekom kratkog spoja;
- nakon prolaska kratkog spoja (bez isključenja voda).

(12 bodova)

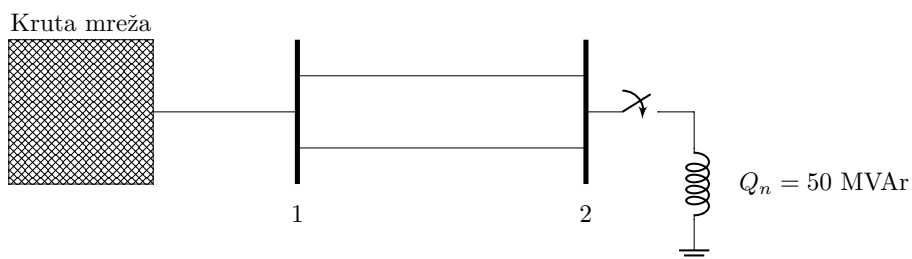


Slika 2: Spoj elektrane s krutom mrežom

Zadatak 4

Na slici 3 prikazan je dvostruki dalekovod u praznom hodu. Za koliko se promjeni napon sabirnice 2 ako se uključi prigušnica u spoju trokut nazivne snage $S_n = 50$ MVA (nazivna snaga odnosi se na nazivni napon prigušnice 220 kV)? Napon krute mreže iznosi 220 kV. Parametri voda su sljedeći: $R = 0.05 \Omega/\text{km}$, $L = 1.553 \text{ mH}/\text{km}$, $C = 10.73 \text{ nF}/\text{km}$. Parametri su izraženi po fazi za jedan dalekovod. Duljina dalekovoda je 200 km. Frekvencija sustava je 50 Hz.

(8 bodova)



Slika 3: Dalekovod u praznom hodu

Zadatak 5

Nacrtajte blok-dijagram dijela dinamičkog modela sinkronog motora opisanog jednačbama (3)–(6). H , T_m , ω_b , r_s , v_{qs} , v_{ds} su konstante, a i_{qs} i i_{ds} varijable iz vanjskog dijela modela koji ovdje nije prikazan. Koliko varijabli stanja ima prikazani model i koje su to varijable?

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \frac{\Psi_{qs}}{\omega_b} \quad (3)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \frac{\Psi_{ds}}{\omega_b} \quad (4)$$

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_m \quad (5)$$

$$T_e = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds} \quad (6)$$

(6 bodova)

Zadatak 6

Sinkroni turbogenerator sa sinkronom reaktancijom $x_s = 1$ p.u. radi u PV režimu rada: injektira djelatnu snagu $p = 0.8$ p.u. a regulator napona održava napon na generatorskim sabirnicama konstantnim $|u_t| = 1.0$ p.u. Jalova snaga koju generator injektira u ovoj radnoj točki iznosi $q = 0.6$ p.u. Generator je na krutu mrežu vezan dalekovodom koji ima impedanciju $z = jx_l = j0.3$ p.u. Potrebno je odrediti za koliko će se promijeniti uzbudna struja ako se napon mreže poveća za 10% u odnosu na početni. Skicirati strujni krug i označiti sve veličine.

(8 bodova)

Zadatak 7

Objasniti i skicirati utjecaj statičnosti turbinskog regulatora na dinamičke značajke frekvencije: RoCoF, maksimalni početni RoCoF, maksimalno odstupanje frekvencije i odstupanje frekvencije u stacionarnom stanju. (2 boda)

1. ZADATAK

a) Pojednostavljeni izraz

$$2H \frac{dw}{dt} = \delta p$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\delta p}{2H} \cdot dt$$

$$dw = \frac{\delta p}{2H} dt / \int$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} dw = \int_{t_0}^t \frac{\delta p}{2H} dt$$

$$\omega - \omega_0 = \frac{\delta p}{2H} (t - t_0)$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{\delta p}{2H} (t - t_0)$$

Stvarni izraz

$$2H \omega \frac{d\omega}{dt} = \delta p$$

$$\omega d\omega = \frac{\delta p}{2H} dt / \int$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \omega d\omega = \int_{t_0}^t \frac{\delta p}{2H} dt$$

$$\frac{\omega^2}{2} \Big|_{\omega_0}^{\omega} = \frac{\delta p}{2H} t \Big|_{t_0}^t$$

$$\frac{\omega^2}{2} - \frac{\omega_0^2}{2} = \frac{\delta p}{2H} (t - t_0) / \cdot 2$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 = \frac{2\delta p}{2H} (t - t_0)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{\delta p}{H} (t - t_0)$$

b) $t = 1s$, $t_0 = 0s$

$$\delta p = 0,3 \text{ p.u.}$$

$$H = 3s$$

$$\omega_0 = 1,0 \text{ p.u.}$$

POJEDNOSTAVLJENI

$$\omega = \omega_0 + \frac{\delta p}{2H} (t - t_0) = 1 + \frac{0,3}{2 \cdot 3} \cdot 1 = 1,05 \text{ p.u.}$$

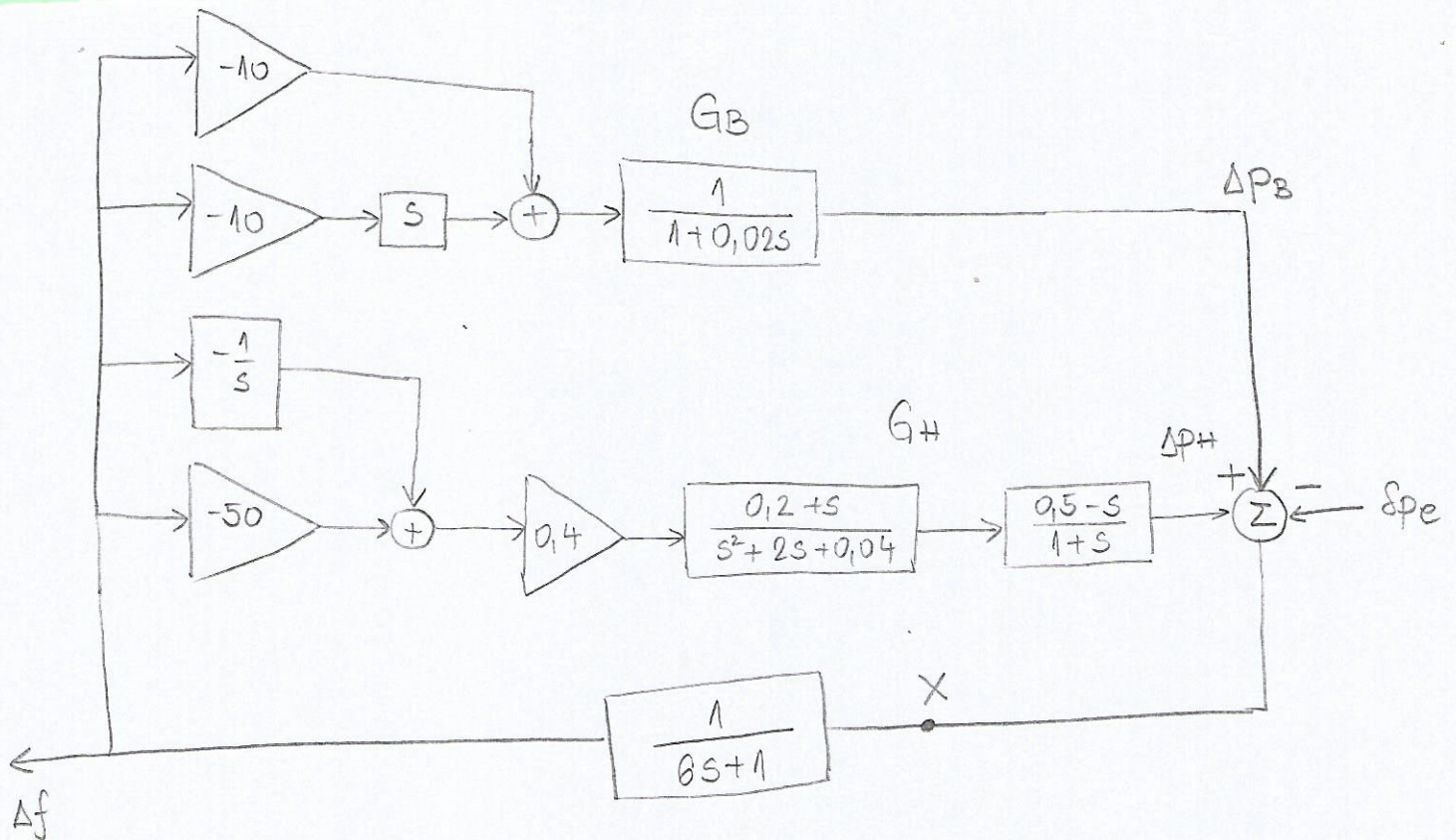
STVARNI

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{\delta p}{H} (t - t_0) = 1 + \frac{0,3}{3} \cdot 1 = 1,1 \text{ p.u.}$$

$$\omega' = 1,048$$

$$r = \frac{\omega - \omega'}{\omega'} = \frac{1,05 - 1,048}{1,048} = 0,0019$$

2. ZADATAK



a) $\delta p = +0.2 \text{ p.u.}$

$$X = \Delta f (6s+1)$$

$$X = \Delta P_B + \Delta P_H - \delta p_e = \Delta f (-10 - 10s) G_B(s) + \Delta f \left(-\frac{1}{s} - 50\right) 0.4 G_H(s) - \delta p_e$$

$$X = X$$

$$\Delta f (6s+1) = \Delta f \left[-10(s+1) G_B(s) - \left(\frac{1}{s} + 50\right) 0.4 G_H(s) \right] - \delta p_e$$

$$\Delta f \left[6s+1 + 10(s+1) G_B(s) + \left(\frac{1}{s} + 50\right) \cdot 0.4 G_H(s) \right] = -\delta p_e$$

$$\Delta f = \frac{-\delta p_e}{6s+1 + 10(s+1) G_B(s) + \left(\frac{1}{s} + 50\right) \cdot 0.4 G_H(s)}$$

$$\Delta f_{\infty} (t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{-\frac{\delta p_e}{s}}{6 \cdot 0 + 1 + 10(0+1) G_B(0) + \left(\frac{1}{0} + 50\right) \cdot 0.4 G_H(0)} = \frac{-\delta p_e}{\infty} = 0$$

b)

$$\Delta f = \frac{-\delta p_e(s)}{6s+1+10(s+1) \cdot \frac{1}{1+0,02s} + \left(\frac{1}{s}+50\right) \cdot 0,4 \cdot \frac{0,2+s}{s^2+2s+0,04} \cdot \frac{0,5-s}{1+s}}$$

$$\frac{df}{dt} = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 \frac{\frac{-0,2}{s}}{6s+1+10(s+1) \cdot \frac{1}{1+0,02s} + \left(\frac{1}{s}+50\right) \cdot 0,4 \cdot \frac{0,2+s}{s^2+2s+0,04} \cdot \frac{0,5-s}{1+s}}$$

u nazivnik

= 0

$$\frac{df}{dt} = \frac{-0,2}{6} = -0,03 \frac{\text{pu}}{\text{s}}$$

c) $K_{uk} = 10+10+50 = 70$

$$\sigma = \frac{1}{K_{uk}} = \frac{1}{70}$$

DIR 2019. / 2020.

3. ZADATAK = KIR 3. ZADATAK

4. ZADATAK

prigušnica Δ

$$S_n = 50 \text{ MVA}$$

$$U = 220 \text{ kV}$$

$$R = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} \rightarrow R = 10 \Omega$$

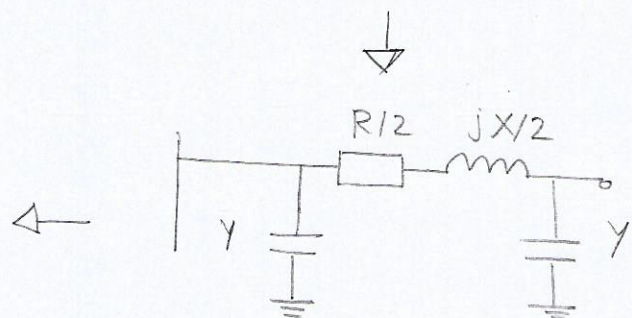
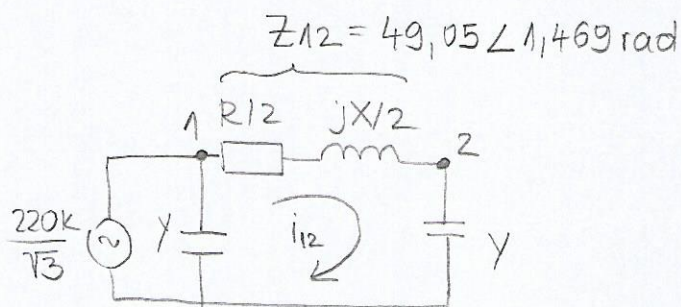
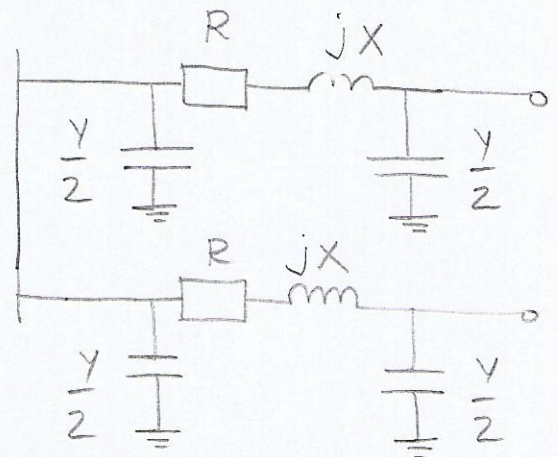
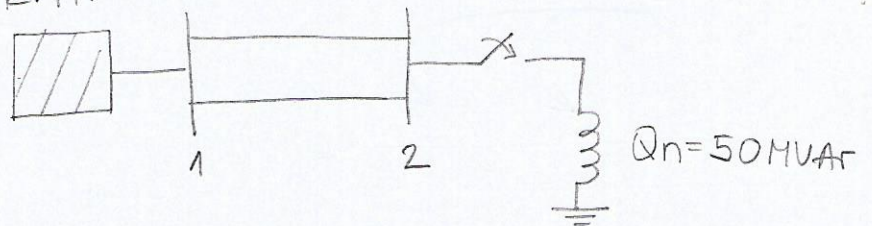
$$L = 1,553 \frac{\text{mH}}{\text{km}} \rightarrow X = 97,6 \Omega$$

$$C = 10,73 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \rightarrow B = 0,674 \text{ mS}$$

$$l = 200 \text{ km}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

K. M.



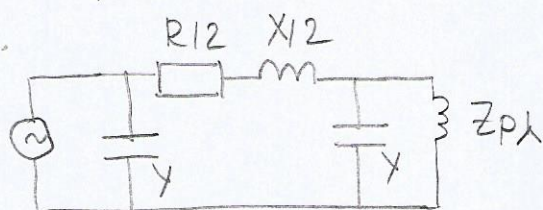
$$V_2 = V_1 - i_{12} \cdot Z_{12} = V_1 - \frac{V_1 \cdot Z_{12}}{\frac{R}{2} + j\frac{X}{2} + \frac{1}{Y}} = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} - \frac{\frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} \cdot 49,05 \angle 1,469}{5 + j48,8 - j1483,7}$$

$$= \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} - \frac{220 \text{ k} / \sqrt{3} \cdot 49,05 \angle 1,469}{1434,9 \angle -1,567} = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} + 4317,7 - j457,6 =$$

$$= 131,335 \text{ k} \angle -3,48 \Rightarrow \underline{U_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 = 227,5 \text{ kV}}$$

S pingušnicom

$\Delta \rightarrow \lambda$



TROKUT

$$U_L = U_f$$

$$S = 3U_f I_f^* = 3U \frac{U}{X} = 3 \frac{U^2}{X}$$

$$Q = 50 \text{ M} = \frac{3U^2}{X_p}$$

$$X_p = \frac{3U^2}{Q} = \frac{3(220 \text{ k})^2}{50 \text{ M}} = 2904 \Omega$$

$$\Delta \rightarrow \lambda \quad X_{p\lambda} = \frac{X_{12} X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}} = \frac{2904^2}{3 \cdot 2904} = j968$$

$$i_{12} = \frac{V_1}{Z_{12} + \left(\frac{1}{Y} \parallel X_p \right)}$$

$$\frac{1}{Y} \parallel X_p = \frac{1}{j0,674 \text{ m}} \parallel j968 = \frac{j0,674 \text{ m} \cdot j968}{j0,674 \text{ m} + j968} = j2785,07$$

$$i_{12} = \frac{220 \text{ k} / \sqrt{3}}{5 + j48,79 + j2785,07} = \frac{220 \text{ k} / \sqrt{3}}{2833,9 \angle 1,569} = 44,82 \angle -1,569 \text{ rad} = 0,08 - j44,82$$

$$V_2^2 = V_1^2 - i_{12}^2 Z_{12} = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} - 44 \angle -1,569 \cdot 49,04 \angle 1,469 = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} - 2146,98 + j215 = 124,8 \text{ k}$$

$$U_2^2 = V_2^2 \cdot \sqrt{3} = 216,3 \text{ kV}$$

PROVERITI 1)

DIR 19/20

ZAD 5.

$$① \quad V_{gs} = r_s i_{gs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{d}{dt} \frac{\psi_{gs}}{\omega_b}$$

$$① \quad \frac{d}{dt} \frac{\psi_{gs}}{\omega_b} = V_{gs} - r_s i_{gs} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \cdot \omega_b$$

$$① \quad \boxed{\frac{d\psi_{gs}}{dt} = -\omega_r \psi_{ds} + (V_{gs} - r_s i_{gs}) \cdot \omega_b}$$

$$② \quad V_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{gs} + \frac{d}{dt} \frac{\psi_{ds}}{\omega_b}$$

$$② \quad \frac{d}{dt} \frac{\psi_{ds}}{\omega_b} = V_{ds} - r_s i_{ds} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{gs} \cdot \omega_b$$

$$② \quad \boxed{\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_r \psi_{gs} + (V_{ds} - r_s i_{ds}) \omega_b}$$

$$③ \quad 2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_m$$

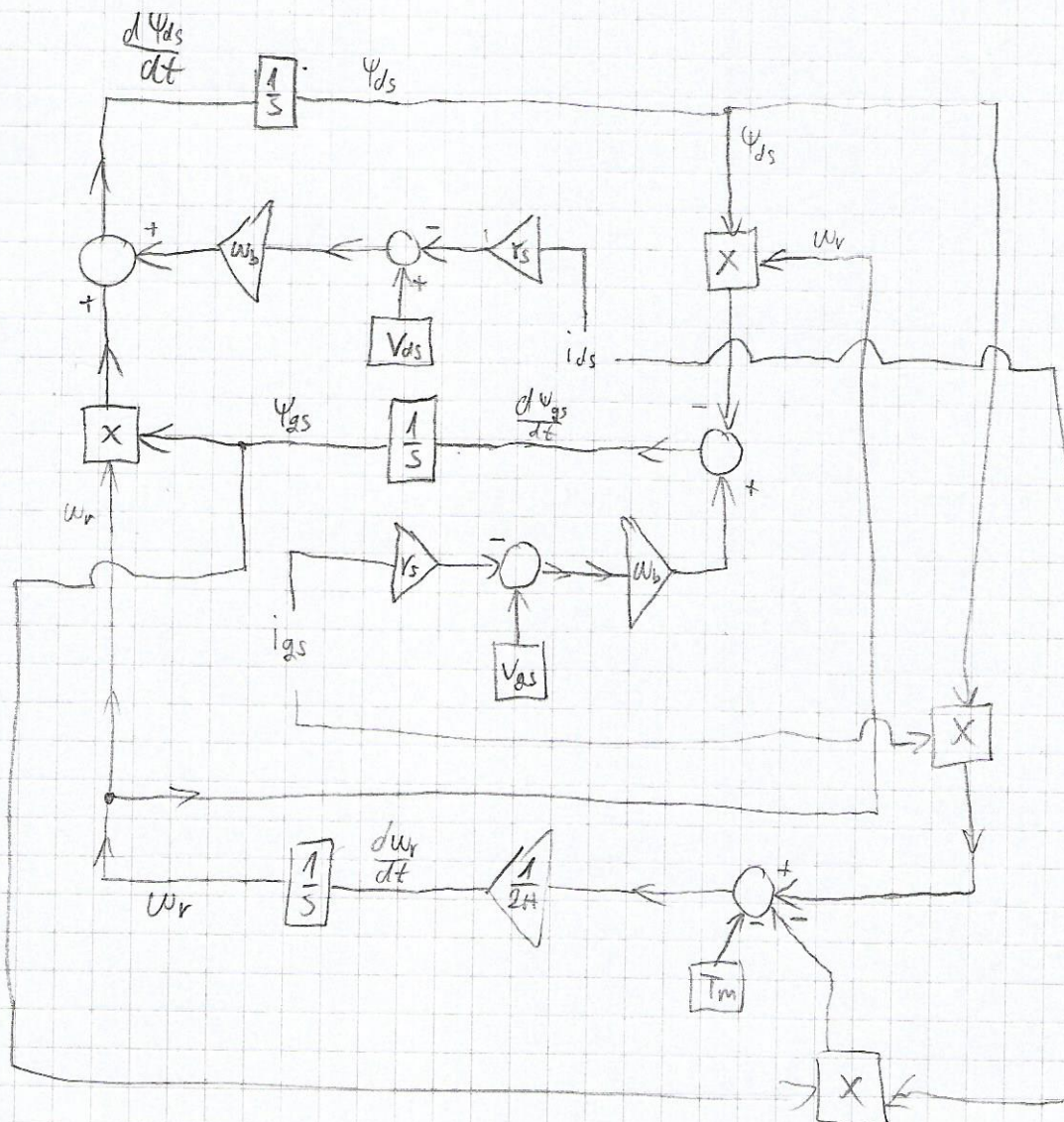
$$④ \quad T_e = \psi_{ds} i_{gs} - \psi_{gs} i_{ds}$$

$$③ \quad 2H \frac{d\omega_r}{dt} = \psi_{ds} i_{gs} - \psi_{gs} i_{ds} - T_m \quad / : 2H$$

$$③ \quad \boxed{\frac{d\omega_r}{dt} = (\psi_{ds} i_{gs} - \psi_{gs} i_{ds} - T_m) \cdot \frac{1}{2H}}$$

model ima 3 varijable stanja:

$\psi_{gs}, \psi_{ds}, \omega_r$



6. ZADATAK

$$X_s = 1 \text{ p.u.}$$

$$p = 0,8 \text{ p.u.}$$

$$|U_t| = 1,0 \text{ p.u.}$$

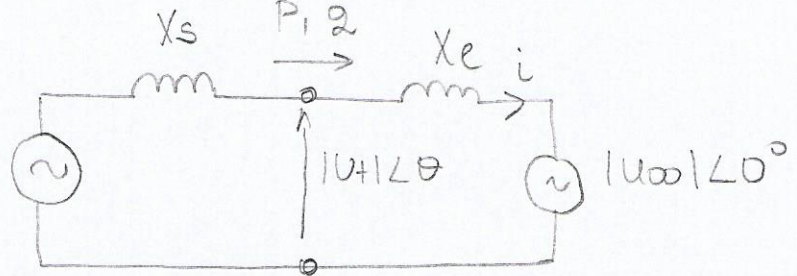
$$g = 0,6 \text{ p.u.}$$

$$Z = jX_e = j0,3 \text{ p.u.}$$

$$|U_\infty| = 1,1 |U_\infty|$$

$$I_f' = X I_f$$

$$|e'| \angle \delta$$



$$\frac{|e'|_1}{|e'|_2} = \frac{i \# d_1}{i \# d_2}$$

$$|U_\infty| = ?$$

$$\theta = ?$$

$$|e'| \angle \delta = ?$$

$$S = P + jQ = U_t \cdot i^* = |U_t| \angle \theta \cdot \left[\frac{|U_t| \angle \theta - |U_\infty| \angle 0^\circ}{jX_e} \right]^* =$$

$$= [|U_t| \cos \theta + j |U_t| \sin \theta] \left[\frac{|U_t| \cos \theta}{jX_e} + j \frac{|U_t| \sin \theta}{jX_e} - \frac{|U_\infty| \cos 0^\circ}{jX_e} - \underbrace{j \frac{|U_\infty| \sin 0^\circ}{jX_e}}_{=0} \right]^* =$$

$$= [|U_t| \cos \theta + j |U_t| \sin \theta] \left[-j \frac{|U_t| \cos \theta}{X_e} + \frac{|U_t| \sin \theta}{X_e} + j \frac{|U_\infty|}{X_e} \right]^* =$$

$$= [|U_t| \cos \theta + j |U_t| \sin \theta] \left[\frac{|U_t| \sin \theta}{X_e} + j \frac{|U_t| \cos \theta}{X_e} - j \frac{|U_\infty|}{X_e} \right] =$$

$$= \frac{|U_t|^2}{X_e} \cos \theta \sin \theta + j \frac{|U_t|^2}{X_e} \cos^2 \theta - j \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \cos \theta + j \frac{|U_t|^2}{X_e} \sin^2 \theta -$$

$$- \frac{|U_t|^2}{X_e} \cos \theta \sin \theta + \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \sin \theta =$$

$$= \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \sin \theta + j \left[\frac{|U_t|^2}{X_e} - \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \cos \theta \right] = P + jQ$$

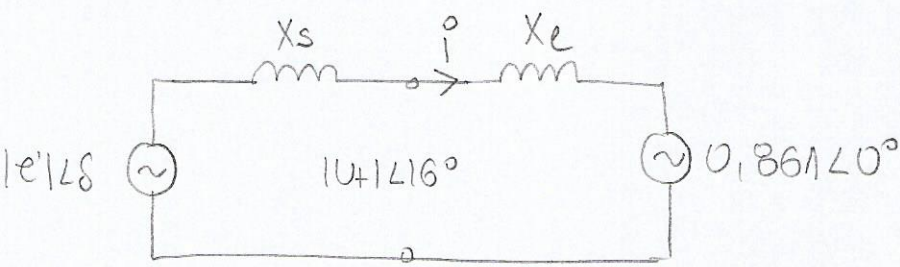
$$Re = Re, Im = Im$$

$$P = \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \sin \theta \rightarrow |U_\infty| = \frac{P \cdot X_e}{|U_t| \sin \theta}$$

$$Q = \frac{|U_t|^2}{X_e} - \frac{|U_t| |U_\infty|}{X_e} \cos \theta = \frac{|U_t|^2}{X_e} - \frac{|U_t|}{X_e} \cdot \frac{P \cdot X_e}{|U_t| \sin \theta} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta}$$

$$Q = \frac{|U_t|^2}{X_e} - P \cot \theta \rightarrow \cot \theta = \frac{\frac{|U_t|^2}{X_e} - Q}{P} = \frac{\frac{1}{0,3} - 0,6}{0,8} = 3,417 \rightarrow \theta = 0,282 \text{ rad} = 16,19^\circ$$

$$|U_{\infty}| = \frac{p \cdot x_e}{|U_t| \sin \theta} = \frac{0,8 \cdot 0,3}{1 \cdot \sin(16,19)} = 0,861 \text{ p.u.}$$



$$|e'| \angle \delta = |U_t| \angle 16^\circ + jX_s \cdot i =$$

$$= |U_t| \angle 16^\circ + j \cdot 1 \cdot \frac{|U_t| \angle 16^\circ - 0,861 \angle 0^\circ}{j0,3} =$$

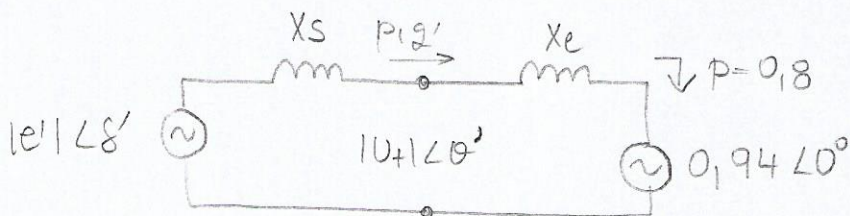
$$= 1 \angle 16^\circ + \frac{1 \angle 16^\circ - 0,861 \angle 0^\circ}{0,3} = 0,961 + j0,276 + 3,2 + j0,919 - 2,87 =$$

$$= 1,291 + j1,195 = 1,76 \angle 42,8^\circ$$

$$\underline{|e'| = 1,76}$$

- Napon krute mreže se poveća 10%

$$|U_{\infty}|' = 1,1 |U_{\infty}| = 1,1 \cdot 0,861 = 0,9471 \text{ p.u.}$$



- mijenja se θ

$$\frac{|U_t| |U_{\infty}|'}{x_e} \sin \theta' = p = 0,8 \rightarrow \frac{1 \cdot 0,94}{0,3} \sin \theta' = 0,8 \rightarrow \theta' = \arcsin\left(\frac{0,8 \cdot 0,3}{0,94}\right)$$

$$\theta' = 14,79^\circ$$

$$|e'| \angle \delta' = |U_t| \angle \theta' + jX_s \frac{|U_t| \angle \theta' - |U_{\infty}|' \angle 0^\circ}{jX_e} =$$

$$= 1 \angle 14,79^\circ + \frac{1 \angle 14,79^\circ - 0,94 \angle 0^\circ}{0,3} = 0,967 + j0,255 + 3,22 + j0,851 - 3,13 =$$

$$= 1,057 + j1,106 = 1,53 \angle 46,3^\circ$$

$$\frac{I_f'}{I_f} = \frac{|e'|'}{|e'|} = \frac{1,53}{1,76} = 0,87 \rightarrow \text{Uzbudna se struja smanji 13\%}$$