DEE-24010 Sähkövoimajärjestelmän säätö ja käyttö J. Bastman

Tampereen yliopisto Tentti 10.5.2021

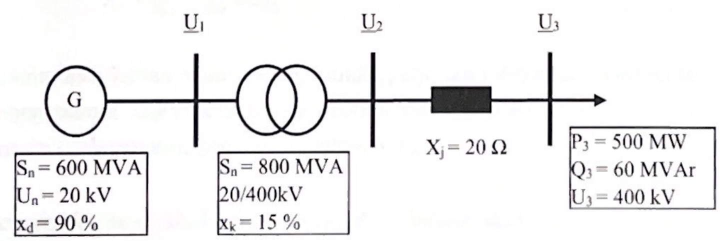
Tentissä saa käyttää omaa ohjelmoitavaa laskinta. Opiskelija saa viedä paperin. Tehtävästä yksi saa 8 pistettä ja muista 6 p kustakin.

1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin
   a) Selosta Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon ominaisuuksia?
   b) Miksi lisääntyvä tuulivoima hankaloittaa sähköjärjestelmän käyttöä?
   c) Selosta mitkä verkon komponentit tuottavat stabiilisuuslaskennassa ratkaistavia differentiaaliyhtälöitä?
   d) Pohjoismaisesta siirtojärjestelmästä irtosi 1000 MW generaattori. Taajuuden laskunopeudeksi välittömästi irtoamisen jälkeen mitattiin 0,25 Hz/s. Kuinka suuri oli verkon liike-energia ennen generaattorin irtoamista?

2) Vastaa 400 kV verkon distanssisuojausta koskeviin kysymyksiin
   a) Minkä takia 400 kV avojohtojen suojaus on yleensä toteutettu distanssireleillä?
   b) Millä keinoilla suojaus saadaan periaatteessa yhtä nopeaksi koko johdon osalta?
   c) Jos suojattavan johdon pituus on 200 km ja johdon resistanssi r = 0.026 Ω/km ja reaktanssi x = 0.33 Ω/km, niin miten suojausvyöhykkeiden 1 ja 2 asettelut voisi valita? Loppupään asemalla ei ole muita lähtöjä.

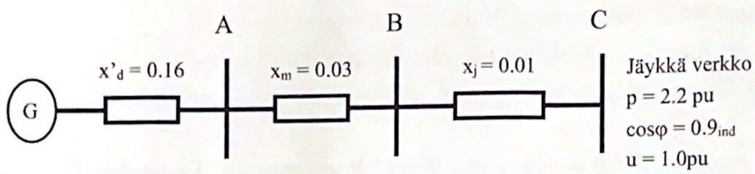
3) Selosta kahden alueen väliseen siirtokapasiteettiin liittyviä asioita.
   a) Mitkä tekijät rajoittavat kapasiteettia?
   b) Miten kapasiteettia voidaan nostaa?

4) Tarkastellaan kuvan verkkoa. Jännite solmussa 3 pysyy vakiona arvossa $\underline{U}_3 = 400\angle 0° kV$. Laske staattisen stabiilisuuden rajateho, kun
   a) Generaattorin magnetointia ei säädetä
   b) Magnetointia säätämällä pidetään generaattorin napajännite siinä arvossa, joka sillä oli edellä mainitussa kuormitustilanteessa.



Kuva 1.

5) Generaattori syöttää kuvan 2 mukaisesti muuntajan ja johdon kautta jäykkään verkkoon tehon $p = 2.2$ pu tehokertoimella $\cos\varphi = 0.9_{ind}$. Generaattorin muutostilan tahtireaktanssi $x'_d = 0.16$, muuntajan reaktanssi 0.03 ja johdon reaktanssi 0.01 pu. Asemalla B tapahtuu vikavastukseton 3-vaiheinen oikosulku, joka poistuu itsestään tehokulmaa $\delta = 95°$ vastaavalla ajanhetkellä. Tarkastele pinta-alakriteerion avulla, onko tilanne stabiili? Häviöitä ei oteta huomioon.



Kuva 2.

Keskipitkän johdon π-sijaiskytkennän siirtovakiot

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_S \\ \underline{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\frac{\underline{ZY}}{2} & \underline{Z} \\ \underline{Y}\left(1+\frac{\underline{ZY}}{4}\right) & 1+\frac{\underline{ZY}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{I}_R \end{bmatrix}$$

Tehonsiirron yhtälöt siirtovakioiden $\underline{A} = A\angle\alpha$, $\underline{B} = B\angle\beta$ ja $\underline{D} = D\angle\alpha$ avulla ilmaistuna. Kulma δ on alku- ja loppupään jännitteiden välinen kulma s.e. $\underline{V}_S = V_S \angle\delta$ ja $\underline{V}_R = V_R \angle 0°$.

Alkupään tehoille

$$P_S = \left|\frac{D}{B}\right| |V_S|^2 \cos(\beta-\alpha) - \frac{|V_S||V_R|}{|B|}\cos(\beta+\delta)$$

$$Q_S = \left|\frac{D}{B}\right| |V_S|^2 \sin(\beta-\alpha) - \frac{|V_S||V_R|}{|B|}\sin(\beta+\delta)$$

Loppupään tehoille

$$P_R = \frac{|V_S||V_R|}{|B|}\cos(\beta-\delta) - \left|\frac{A}{B}\right| |V_R|^2 \cos(\beta-\alpha)$$

$$Q_R = \frac{|V_S||V_R|}{|B|}\sin(\beta-\delta) - \left|\frac{A}{B}\right| |V_R|^2 \sin(\beta-\alpha)$$

Symmetristen komponenttien muunnokset abc => 120 ja 120 => abc

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \\ \underline{V}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 \\ 1 & \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} & 1 \\ \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \\ \underline{V}_{a0} \end{bmatrix}$$

1-vaiheisen vikavirran lauseke on alla. $\underline{E}_a$ on a-vaiheen Thevenin jännite ja $\underline{I}_{a1}$, $\underline{I}_{a2}$ ja $\underline{I}_{a0}$ ovat myötä-, vasta- ja nollaverkon virrat a-vaiheessa. $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_0$ ovat myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssit ja $\underline{Z}^f$ on vikaimpedanssi.

$$\underline{I}_{a1} = \underline{I}_{a2} = \underline{I}_{a0} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f} \qquad \text{vikavirta} \qquad \underline{I}_a = 3\underline{I}_{a1} = \frac{3\underline{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f}$$

Kompensointiaste kuvaa prosentteina, kuinka paljonko johdon induktanssi tai kapasitanssi pienenee kompensoinnin vaikutuksesta. Sarjakompensoinnissa 80 %:in kompensointiaste kertoo johdon induktanssin L olevan kompensoinnin jälkeen 0.2*L.

Heilahteluyhtälö, ω_s = tahtikulmanopeus, H = hitausvakio s

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{\partial^2\delta}{\partial t^2} = P_m^{pu} - P_e^{pu}$$

Kineettinen energia, S_n = koneen nimellisteho

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega^2 \qquad \text{toisaalta } H = \frac{W_k}{S_n}[s]$$