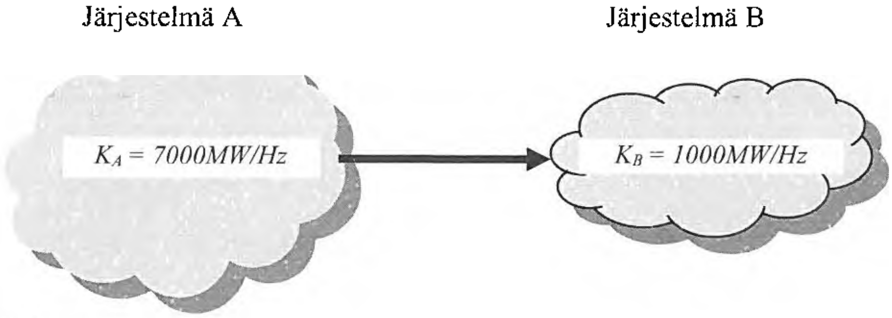
EE.EES.410 Sähkövoimajärjestelmän säätö ja käyttö J. Bastman
Tampereen yliopisto Tentti 3.5.2023

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

1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin
   a) Mitä tarkoittaa siirtoverkon käytössä usein noudatettava (N-1) - kriteeri?
   b) Selosta syitä miksi Fingridin 400 kV verkossa on nykyään usein ongelmana liika loisteho?
   c) Pohjoismaisen siirtojärjestelmän inertia oli 160 GWs, kun siitä irtosi tahtigeneraattori. Taajuuden laskunopeudeksi alkuhetkillä mitattiin -0.25 Hz/s. Kuinka suuri oli irronneen generaattorin teho?
   d) Mitä malleja mielestäsi tarvitaan heilahteluyhtälön lisäksi tahtigeneraattorin toiminnan mallintamiseen stabiilisuuslaskennassa, kun käytössä on simulointiohjelmisto? Jos verkossa on 4000 solmupistettä ja 500 avonapaista tahtigeneraattoria, niin kuinka monta tehonjakoyhtälöä ja differentiaaliyhtälöä suunnilleen joudutaan samanaikaisesti ratkaisemaan stabiilisuuslaskennassa?

2) Kuvan 1 sähkövoimajärjestelmät A ja B on yhdistetty yhdysjohdoilla toisiinsa. Alkutilanteessa verkosta A siirtyy verkkoon B pätötehoa 450 MW teholla. Verkon A säätövoimaksi on arvioitu 7000 MW/Hz ja verkon B 1000 MW/Hz. Verkosta B irtoaa 400 MW teholla toimiva generaattori.
   a) Selosta aikajärjestyksessä mitä taajuudelle ja yhdysjohdon teholle tapahtuu ja miksi?
   b) Kuinka suuri on pysyvän tilan taajuuspoikkeama ja yhdysjohdon tehon muutos?
   c) Kuinka suuri on yhdysjohtojen teho muutoksen jälkeen?



Kuva 1.

3) Sähkönsiirtoon käytetään vaihtosähkön ohella myös tasajännitettä.
   a) Selosta mitä hyötyjä on tasajännitteen käytöstä?
   b) Mitä komponentteja suuntausasemalla tarvitaan?
   c) Mitä tarkoittaa back-to-back ja bipolaarinen HVDC-yhteys?
   d) Miten voidaan verkkokommutoidun HVDC-yhteyden osalta arvioida, onko liitäntäpisteen verkko riittävän vahva?

Käännä

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

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