

EE.EES.410 Sähkövoimajärjestelmän säätö ja käyttö

J. Bastman

Tampereen yliopisto

Tentti 12.6.2024

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 tarkoittavat käsitteet back-to-back tyyppinen DC-yhteys ja bipolaarinen DC-yhteys?
 - b) Kuinka pitkä voi 50 Hz verkossa olla 400 kV maakaapeli, jonka virtakestoisuus on 600 A. Kaapelin kapasitanssi on $0.24 \mu\text{F}/\text{km}$.
 - c) Minkä takia Pohjoismaisen sähköjärjestelmän inertia (liike-energia) on tiettyinä aikoina liian alhainen? Mitä keinoja tällaisessa tilanteessa voidaan käyttää tilanteen hallitsemiseksi?
 - d) Pohjoismaisesta sähköjärjestelmästä irtosi ydinvoimalan generaattori (teho 1300 MW), jonka seurauksena taajuuden laskunopeus alkuvaiheessa oli -0.26 Hz/s . Laske verkon inertian suuruus ennen yksikön irtoamista. Onko saamasi inertian arvo mielestäsi suuri vai pieni?

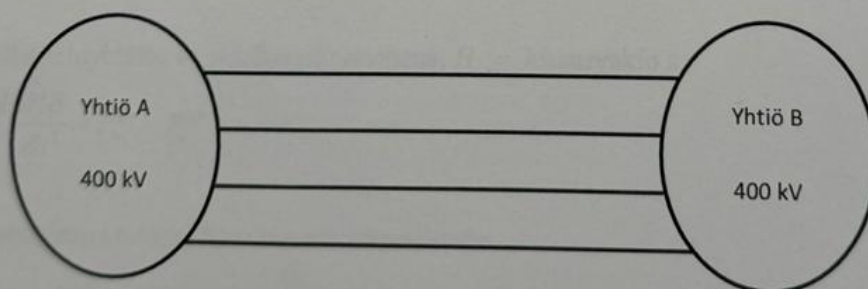
- 2) Kaksi generaattoria toimii rinnakkain 50 Hz verkossa. Generaattoreiden nimellistehot, statiat ja pätötehot ovat:

$S_{n1} = 80 \text{ MVA}$, $R_1 = 4 \%$ ja $P_1 = 50 \text{ MW}$
 $S_{n2} = 50 \text{ MVA}$, $R_2 = 5 \%$ ja $P_2 = 25 \text{ MW}$

Oletetaan, että kuormitus ei ole taajuusriippuvainen ja kuormitus kasvaa äkillisesti 24 MW.

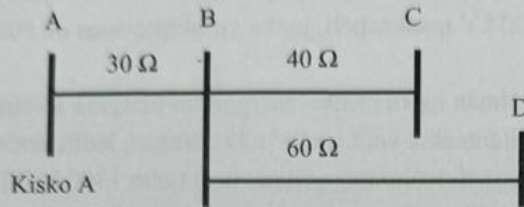
 - a) Laske taajuuden pysyvän tilan arvo kuormitusmuutoksen jälkeen
 - b) Laske generaattoreiden uudet pätötehot

- 3) Tarkastele siirtokykyä sähköyhtiöiden A ja B välillä, jotka sijaitsevat 300 km etäisyydellä toisistaan. Alueiden välillä on 4 johtoa, jotka ovat joko tyyppiä on 2-Finch $x = 0.33 \Omega/\text{km}$ tai 3-Finch $x = 0.29 \Omega/\text{km}$. Alku- ja loppupään jännitteet pysyvät arvossa 400 kV. Laske
 - a) johtojen terminen rajateho. 2-Finch johdin kestää $+30^\circ$ lämpötilassa virtaa 1900 A ja 3-Finch 2850 A
 - b) siirrettävissä oleva teho, kun tehokulma saa olla korkeintaan 40°
 - c) kuinka suuri siirtokyky alueiden välillä on teoriassa, jos noudatetaan $(N - 1)$ -periaatetta ja varmuusmarginaali olisi 100 MW
 - d) Selosta mitkä tekijät muuttaisivat todellisuudessa kohtien a – c vastauksia?



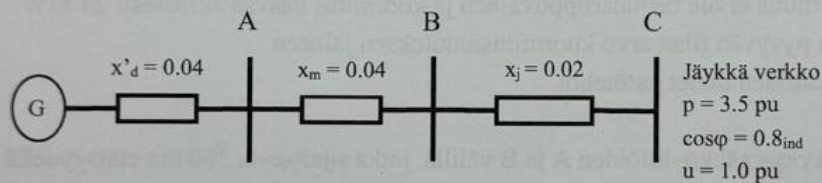
Kuva 1.

- 4) Vastaa Fingridin 400 kV verkon distanssisuojausta koskeviin kysymyksiin
- Millä keinoilla suojaus 3-v. oikosulkuvioissa saadaan periaatteessa yhtä nopeaksi vian paikasta riippumatta esimerkiksi kuvan 2 johdon A – B osalta?
 - Laske kuvan 2 verkossa sopivat suojausten asettelut aseman A releelle suojausvyöhykkeiden 1 ja 2 osalta. Kuvassa on ilmoitettu johtojen reaktanssit.
 - Kuinka suuri voi aseman A releen vyöhykkeen 2 asettelu korkeintaan olla ja miksi?



Kuva 2.

- 5) Generaattori syöttää kuvan 3 mukaisesti muuntajan ja johdon kautta jäykkään verkkoon tehon $p = 3.5$ pu tehokertoimella $\cos\varphi = 0.8_{\text{ind}}$. Generaattorin muutostilan tahtireaktanssi $x'_d = 0.04$ pu, muuntajan reaktanssi 0.04 pu ja johdon reaktanssi 0.02 pu. Johdolla B – C tapahtuu vikavastukseton 3-vaiheinen oikosulku aseman B välittömässä läheisyydessä. Suojaus poistaa vian tehokulmaa $\delta = 105^\circ$ vastaavalla ajanhetkellä. Tarkastele pinta-alakriteerion avulla, onko tilanne stabiili? Häviöitä ei oteta huomioon.



Kuva 3.

Keskipitkän johdon π -sijaiskytkennän siirtovakiot

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

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 $\underline{V}_R = V_R \angle 0^\circ$.

Alkupään tehoille

Loppupään tehoille

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

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

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

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

Symmetristen komponenttien muunnokset $abc \Rightarrow 120$ ja $120 \Rightarrow abc$

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

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.

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

vikavirta

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

Kompensointiaste kuvaa prosentteina, kuinka paljonko johdon induktanssi tai kapasitanssi pieneenee 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

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