EE.EES.400 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi — J. Bastman

Tampereen yliopisto — Tentti 20.4.2022

Tentissä saa käyttää omaa ohjelmoitavaa laskinta. Opiskelija saa viedä paperin.

1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin

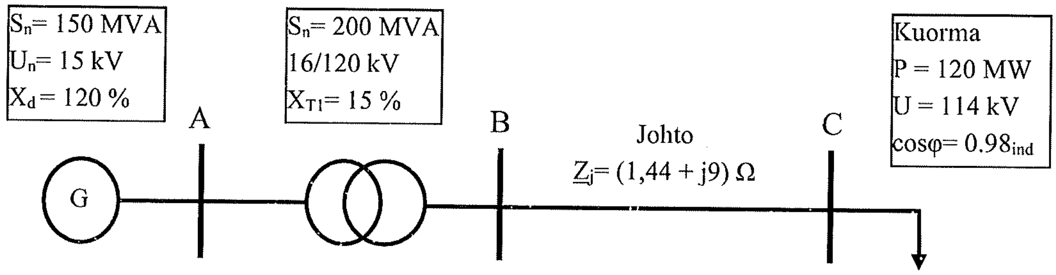
a) Miksi siirtoverkon vikavirtalaskennassa tarvitaan symmetrisiä komponentteja?

b) Kuormituksen pääjännite on $\underline{U} = 410.0\angle 12.1° kV$ ja virta $\underline{I} = 778.0\angle 6.66° A$. Laske kuorman pätö- ja loisteho sekä tehokertoimen arvo.

c) Miten mallintaisit tehonjakolaskentaa varten 50 km tai 200 km pitkän johdon?

d) Miksi avojohtojen nollaimpedanssi on aina selvästi suurempi kuin myötäimpedanssi?

2) Muodosta kuvan 1 verkolle suhteellisarvot käyttäen perustehona arvoa $S_b = 100$ MVA ja perusjännitteenä pisteessä C arvoa $U_{bC} = 120$ kV. Laske tämän jälkeen pisteen A jännite suhteellisarvona, kun pisteen C jännite on vakio 114 kV.



Kuva 1

3) Eräälle 400 kV avojohdolle on muodostettu π-sijaiskytkentä. Johdon siirtovakioiksi saatiin: $\underline{A} = 0.977\angle 0.081°$, $\underline{B} = 58.099\angle 86.645° \Omega$ ja $\underline{C} = 7.985 \cdot 10^{-4}\angle 90.040° S$. Johdon alkupään jännite on $\underline{V}_S = 410\angle 25° kV$ ja loppupään virta $\underline{I}_R = 0.80\angle 5° kA$. Laske johdon

a) Loppupään jännite

b) Loppupään näennäisteho

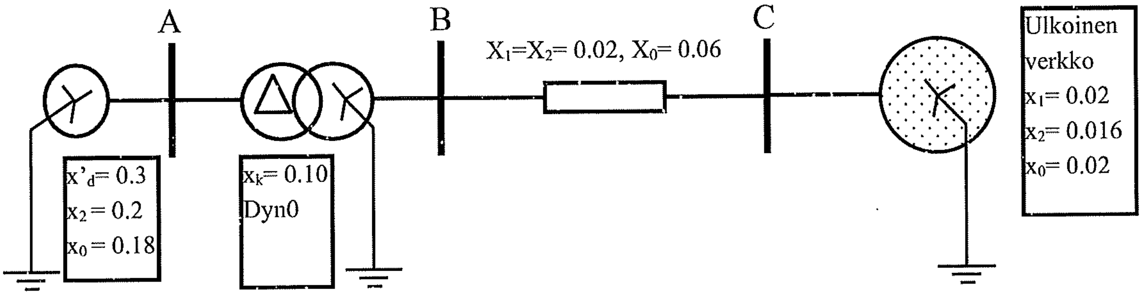
4) Admittanssi- ja impedanssimatriisin ominaisuudet, muodostaminen ja käyttökohteet

käännä sivua

5) Tarkastellaan kuvan 2 mukaista verkkoa. Lähtötiedot (kaikki reaktansseja) on ilmoitettu valmiiksi suhteellisarvoina. Ulkoinen verkko on suoraan maadoitettu. Jännite ennen vikaa on 1 pu ja vikaresistanssi on 0.0 pu.

Laske pisteessä C tapahtuvan muutostilan vikavirta, kun vikana on

a) 2-vaiheinen oikosulku
b) 1-vaiheinen maasulku
c) 1-vaiheinen maasulku, mutta välillä A – B olevan muuntajan tähtipisteen maadoitukseen lisätään 0.05 pu suuruinen reaktanssi.



Kuva 2.

Keskipitkän johdon π-sijaiskytkennän siirtovakiot

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

Tarkan π-sijaiskytkennän korjatut $\underline{Z}$' ja $\underline{Y}$'/2 pitkälle johdolle ovat:

$$\underline{Z}' = \underline{Z} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma} \cdot l)}{\underline{\gamma} \cdot l} \quad \text{ja} \quad \frac{\underline{Y}'}{2} = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{\tanh(\underline{\gamma} \cdot l/2)}{\underline{\gamma} \cdot l/2}$$

jossa $\underline{\gamma}$ on etenemiskerroin ja l johtopituus.

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 eli $\underline{V}_S = V_S \angle\delta$ 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

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

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

Tähti-kolmiomuunnos (tähden haara b – c)

$$\underline{Z}_{bc} = \frac{\underline{Z}_a \cdot \underline{Z}_b + \underline{Z}_b \cdot \underline{Z}_c + \underline{Z}_c \cdot \underline{Z}_a}{\underline{Z}_a} \qquad \underline{Z}_\Delta = 3\underline{Z}_Y, \text{ jos } \quad \underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$$

Kolmio-tähtimuunnos (kolmion sivut ab, bc ja ac)

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ac}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}} \qquad \underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3}, \text{ jos } \quad \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$$

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

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

Vikavirtojen laskentakaavoja

1-v. maasulun osalta vikavirran lauseke ja komponenttiverkkojen kytkennät on osattava ulkoa.

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

1-v. maasulun aikaiset vaihejännitteet (vika a-vaiheessa)

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

$$\underline{V}_b = \frac{3\underline{a}^2\underline{Z}^f + (\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_2 + (\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f}\underline{E}_a$$

$$\underline{V}_c = \frac{3\underline{a}\underline{Z}^f + (\underline{a} - \underline{a}^2)\underline{Z}_2 + (\underline{a} - 1)\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f}\underline{E}_a$$

2-v. oikosulku myötä- ja vastaverkon virta. Vikavirran lauseke

$$\underline{I}_{a1} = -\underline{I}_{a2} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}^f} \qquad \underline{I}_b = -\underline{I}_c = \frac{-j\sqrt{3}\underline{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}^f}$$

2-v. maaoikosulku myötäverkon virta. Alla vaiheiden b ja c virrat sekä vikavirta.

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

$\underline{I}_a^f = 0$ laskematta pääteltävissä Vikavirta

$$\underline{I}_b^f = \underline{I}_{b0} + \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} = \underline{I}_{a0} + \underline{\alpha}^2\underline{I}_{a1} + \underline{\alpha}\underline{I}_{a2}$$
$$\underline{I}_c^f = \underline{I}_{c0} + \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} = \underline{I}_{a0} + \underline{\alpha}\underline{I}_{a1} + \underline{\alpha}^2\underline{I}_{a2}$$

$$\underline{I}^f = \underline{I}_b^f + \underline{I}_c^f$$