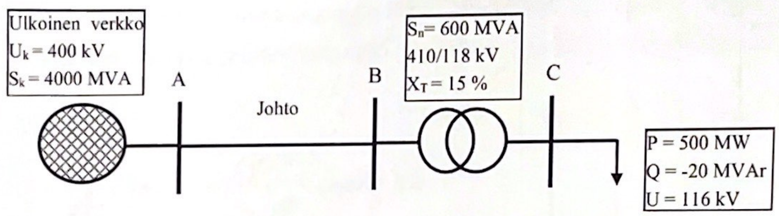
EE.EES.400 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi
Tampereen yliopisto

J. Bastman
Tentti 22.9.2022

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

1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin
   a) Miksi siirtojohdoilla käytetään johtojen vuorottelua?
   b) Miksi siirtoverkon mallinnuksessa käytettävä admittanssimatriisi on aina käytännössä hyvin harva rakenteeltaan?
   c) Mitä tarkoitetaan käsitteellä johdon luonnollinen teho?
   d) Miten 110 kV ja 400 kV verkon maadoitukset on Suomessa toteutettu ja miksi?

2) Muodosta kuvan 1 verkolle suhteellisarvot käyttäen perustehona arvoa S_b = 100 MVA ja perusjännitteenä pisteessä A arvoa U_{bA} = 400 kV. Johdon impedanssi on (2,5 + j30) Ω.
   a) Laske suhteellisarvoilla pisteen A jännite, kun pisteen C jännite on vakio 116 kV
   b) Laske ulkoisesta verkosta syötetyn pätö- ja loistehon suuruus



Kuva 1.

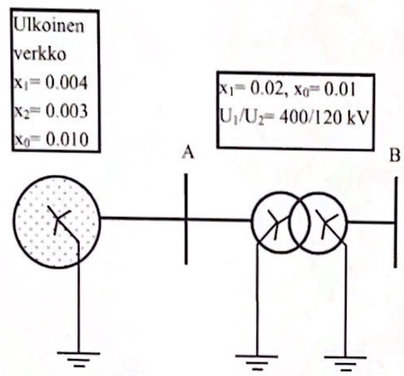
3) 400 kV 3-Finch johdon parametrit ovat: r = 0.017 Ω/km, x = 0.29 Ω/km ja b = 4.0 μS/km. Johdon pituus on 200 km. Johdon loppupäässä on kuormitus, jonka pätöteho on 1000 MW ja loisteho -100 MVAr. Johdon loppupään jännite pysyy vakiona arvossa 400 kV.
   a) Laske johdon alkupään jännite käyttämällä lyhyen johdon sijaiskytkentää
   b) Laske johdon alkupään jännite käyttämällä keskipitkän johdon π-sijaiskytkentää

4) Vastaa silmukoidun verkon tehonjakoa koskeviin kysymyksiin
   a) Miksi tehonjaon ratkaisu edellyttää iterointia?
   b) Mitkä ovat erilaisten solmupistetyyppien ominaisuudet ja miksi niitä tarvitaan?
   c) Mitkä ovat Newton-Raphson menetelmät hyvät ja huonot puolet?

käännä sivua

5) Tarkastellaan kuvan 2 mukaista verkkoa. Lähtötiedot (kaikki reaktansseja) on ilmoitettu valmiiksi suhteellisarvoina. Ulkoinen verkko on maadoitettu. Perusteho on 100 MVA ja perusjännite pisteessä A on 400 kV. Jännite ennen vikoja on 1,02 pu ja vikaimpedanssi on 0,0 pu. Ilmoita myös vikavirtojen todelliset arvot kiloampeereina 120 kV jännitetasolla.

a) Laske 3-vaiheisen oikosulun vikavirta pisteessä B
b) Laske 2-vaiheisen oikosulun vikavirta pisteessä B
c) Laske 1-vaiheisen maasulkuvirran suuruus pisteessä B



Kuva 2.

Keskipitkän johdon π-sijaiskytkennän siirtovakiot

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

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

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

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