

DEE-24000 Sähköverkkujen mallintaminen ja analyysi

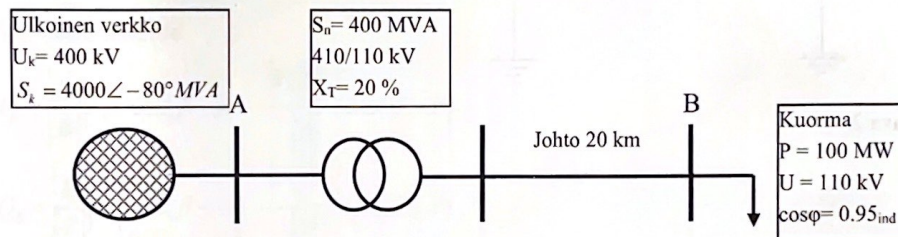
J. Bastman

Tampereen yliopisto

Tentti 4.3.2021

Tentissä saa käyttää omaa ohjelmoitavaa laskinta. Opiskelija saa viedä paperin. Kaikki tehtävät 6 p.

- 1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin
- Mitä tarkoittaa siirtoverkkujen synkroninen yhteiskäyttö? Minkä maiden kanssa Fingridin verkko on synkronisessa yhteiskäytössä?
  - Miksi avojohtojen konduktanssin mallintaminen on vaikeaa?
  - Olet valinnut symmetrisen kolmivaiheisen järjestelmän perustehoksi  $S_b$  ja perusjännitteeksi  $U_b$ . Osoita, että kyseisillä valinnoilla kolmivaiheisen näennäistehon lauseke on suhteellisarvoja käytettäessä  $\underline{s} = \underline{u} \cdot \underline{i}^*$ .
- 2) Tarkastellaan kuvan 1 verkkoa. 110 kV johto on tyypiltään Duck, jonka impedanssi  $\underline{Z} = (0.096 + j0.4) \Omega/\text{km}$ .
- Muodosta kuvan 1 verkolle suhteellisarvot käyttäen perustehona arvoa  $S_b = 100 \text{ MVA}$  ja perusjännitteenä pisteessä B arvoa  $U_{Bb} = 110 \text{ kV}$ .
  - Laske kuorman suhteellinen virta

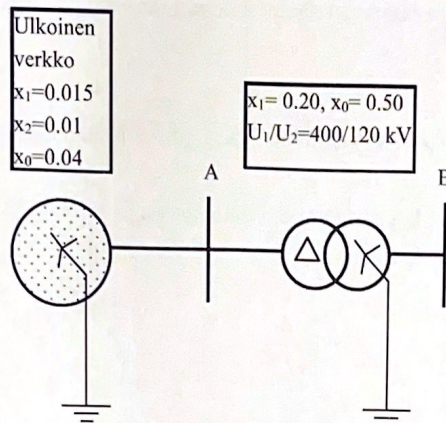


Kuva 1

- 3-Finch johtimen pituus on 300 km (ei käytetä pitkän johdon teoriaa) ja sähköiset arvot:  $r = 0,017 \Omega/\text{km}$ ,  $x = 0,29 \Omega/\text{km}$  ja  $b = 4,0 \mu\text{S}/\text{km}$ .
  - Laske johdon aaltoimpedanssi arvo
  - Laske siirtovakion A arvo, kun johdolle käytetään  $\pi$ -sijaiskytkentää
  - Kuinka suuri on johdon loppupään jännite tyhjäkäynnissä, kun alkupään jännite on 400 kV
- 4) Tarkastellaan lyhyttä siirtojohtoa
  - Johdan yksinkertaistetut siirtoyhtälöt, kun johdon mallina on pelkkä reaktanssi
  - Osoita, että a-kohdan tapauksessa johdon pätöteho on voimakkaasti riippuvainen alku- ja loppupään jännitteiden kulmaerosta, mutta ei niinkään jännitteiden itseisarvoista.

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 1,0 pu ja vikaimpedanssi on 0,0 pu. Ilmoita myös vikavirtojen todelliset arvot kiloampeereina.
- Laske 1-vaiheisen maasulkuvirran suuruus pisteessä B
  - Laske 2-vaiheisen oikosulun vikavirta pisteessä B
  - Muuntaja vaihdetaan sellaiseksi, että ensiökäämityksen kolmio muutetaan tähtikytkentäiseksi ja maadoitetaan. Laske 1-vaiheisen maasulkuvirran suuruus pisteessä B.



Kuva 2.

Keskipitkän johdon  $\pi$ -sijaiskytkennän siirtovakiot

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

Tarkan  $\pi$ -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  $\delta$  on alku- ja loppupään jännitteiden välinen kulma eli  $\underline{V}_S = V_S \angle \delta$  ja  $\underline{V}_R = V_R \angle 0^\circ$ .

Alkupään tehoille

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

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

Loppupään tehoille

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

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

Tähti-kolmiomuunnos (tähten haara b - c)

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

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

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

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

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

### 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)

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

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

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

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

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

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

$$\underline{I}_{a1} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f)}{\underline{Z}_2 + (\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}^f)}} \quad \underline{I}_a^f = 0 \quad \text{laskematta pääteltävissä} \quad \text{Vikavirta}$$

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

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