

DEE-24000 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi

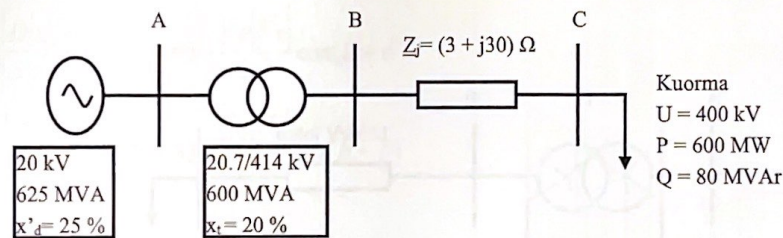
J. Bastman

Tampereen yliopisto

Tentti 4.5.2021

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

- 1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin
- Mitä etua saadaan siirtoverkkojen synkronisesta yhteiskäytöstä?
  - Mitä tarkoitetaan käsitteellä tehollisesti maadoitettu verkko?
  - Oletetaan, että vikapaikasta näkyvät Theveninin myötä- ja vastaimpedanssi ovat yhtä suuria sekä vikaimpedanssi on nolla. Osoita, että 2-vaiheisen oikosulkuvirran itseisarvo on suuruudeltaan  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  kertaa 3-vaiheisen oikosulkuvirran itseisarvo.
  - Vaihejännitteet ovat  $\underline{V}_a = 230\angle 20^\circ \text{ kV}$ ,  $\underline{V}_b = 230\angle -80^\circ \text{ kV}$  ja  $\underline{V}_c = 230\angle 200^\circ \text{ kV}$ . Laske vastajärjestelmän vaihejännite a.
- 2) Muodosta kuvan 1 verkolle suhteellisarvot käyttäen perustehona arvoa  $S_b = 100 \text{ MVA}$  ja perusjännitteenä pisteessä C arvoa  $U_{bc} = 400 \text{ kV}$ .
- Laske suhteellisarvoilla pisteiden A ja B jännite, kun pisteen C jännite on vakio  $400 \text{ kV}$
  - Laske pisteessä B tapahtuvan 3-vaiheisen muutosvilanvikavirran suuruus, kun laskentajännite on a-kohdan mukainen. Vikaimpedanssi on nolla. Ilmoita tulos suhteellisenä ja todellisenä arvona.



Kuva 1.

- 3) Tarkastellaan verkon tehonjaon laskentaa. Alla on esitetty solmupisteiden tehohtälöt, jos yhtälöiden lukumäärä on  $n$ .

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

- Miksi solmupisteet pitää jakaa solmupistetyyppeihin ja mitkä ovat niiden ominaisuudet?
- Miten Newton-Raphson menetelmän mukainen Jacobin matriisi muodostetaan?
- Jos verkossa on 1 vertailupiste, 980 kuormituspistettä ja 19 generaattoripistettä, niin laske ratkaistavien yhtälöiden lukumäärä.

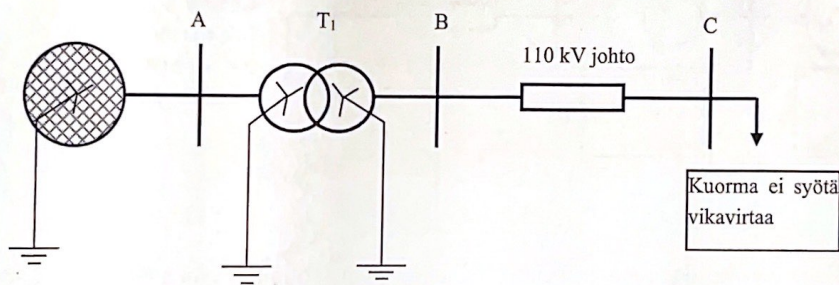
käännä sivua

- 4) 300 km pitkän 400 kV johdon sähköiset arvot ovat:  $r = 0,017 \Omega/\text{km}$ ,  $x = 0,29 \Omega/\text{km}$  ja  $b = 4,0 \mu\text{S}/\text{km}$ . Johdon loppupään jännite on 400 kV. Pitkän johdon yhtälöitä ei käytetä.
- Laske johdon alkupään jännite tyhjäkäynnissä
  - Loppupäähän liitetään kuormitus, jonka pätöteho on 900 MW ja loisteho -90 MVar. Laske alkupään jännite, kun loppupään jännite on edelleen 400 kV.
- 5) Kuvan 2 esittämässä tilanteessa ulkoinen verkko syöttää 5 km pitkää 110 kV johtoa. Pääjännite vikapaikassa C ennen vikaa on 115 kV ja vikaimpedanssi 0. Laske vikavirran suuruus, kun pisteessä C sattuu
- 3-vaiheinen oikosulku
  - 2-vaiheinen oikosulku
  - 1-vaiheinen maasulku
  - Muuntaja  $T_1$  vaihdetaan sellaiseen muuntajaan, jonka ensiö eli 400 kV on kolmiokytkentäinen, mutta toisiossa on maadoitettu tähtikytkentä. Laske pisteessä C tapahtuvan 1-vaiheisen maasulun vikavirta.

Pisteeseen A liitetyn ulkoisen verkon oikosulkuimpedanssit 400 kV tasolla myötä-, vasta- ja nolla-verkossa ovat:  $\underline{Z}_{u1} = 14 \angle 85^\circ \Omega$ ,  $\underline{Z}_{u2} = 10 \angle 85^\circ \Omega$  ja  $\underline{Z}_{u0} = 40 \angle 80^\circ \Omega$

Muuntaja: 400/110 kV, 400 MVA,  $x_1 = 20 \%$ , kytkentä Yyn0

110 kV avojohdon myötäimpedanssi:  $\underline{Z}_l = (0,05 + j0,3) \Omega/\text{km}$  ja nollaimpedanssi:  $\underline{Z}_0 = (0,15 + j0,9) \Omega/\text{km}$ .



Kuva 2.



Keskipitkän johdon  $\pi$ -sijaiskytkennän siirtovakiot

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

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 siten, että  $\underline{V}_S = V_S \angle \delta$  ja  $\underline{V}_R = V_R \angle 0^\circ$ .

Alkupään tehoille

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

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

Loppupään tehoille

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

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

Tähti-kolmiomuunnos (tähten haarat 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 - 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  $abc \Rightarrow 120$  ja  $120 \Rightarrow abc$

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

### 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)

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

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

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

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. maa-oikosulku myötaverkon virta. Alla vaiheiden b ja c virrat sekä vikavirta.

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

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

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