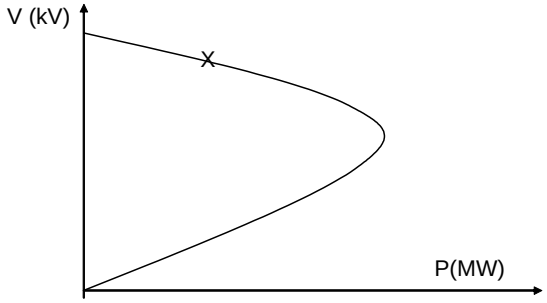
S-18.3200 Sähkönsiirtojärjestelmät 1 Tentti 18.12.2007

Vastaa tehtäviin 1-4 ja valitse toinen tehtävistä 5 ja 6. Vastaat siis enintään viiteen tehtävään.

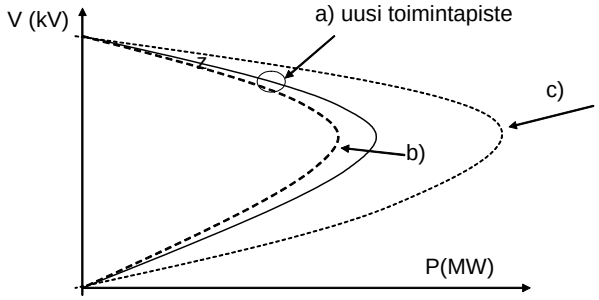
1. Tutkitaan alle piirrettyä PV-käyrää, joka kuvaa sellaista verkkoa, jossa on tuotantoalue ja kuormitusalue ja niiden välissä verkko, jossa on useita rinnakkaisia johtoja. Käyrä kuvaa alueiden välistä siirtoyhteyttä. Kuormitusalueella on muutamia generaattoreita. Toimintapiste ehjälle verkolle on piirretty kuvaan X:llä.

   a) Miten toimintapiste siirtyy, kun kuormitusalueella yksi generaattori irtoaa verkosta ja korvaava teho tulee tuotantoalueen pyörivistä reserveistä? Oletetaan, että PV-käyrä pysyy muuttumattomana. Piirrä joku mahdollinen uusi toimintapiste PV-käyrälle.



   b) Tutkitaan edelleen PV-käyrää. Miten PV-käyrä muuttuu, kun yksi alueiden välisistä johdoista irtoaa? Piirrä uusi käyrä. Miksi käyrä muuttuu erilaiseksi?
   c) Mitä tapahtuu PV-käyrälle, kun kaikki johdot tuotanto- ja kuormitusalueen välillä sarjakompensoidaan? Piirrä uusi PV-käyrä. Miksi käyrä muuttuu?
   d) Mitä tapahtuu tuotantoaluetta kuvaavan ekvivalenttigeneraattorin ja kuormitusaluetta kuvaavan ekvivalenttigeneraattorin väliselle tehokulmalle, kun johto irtoaa? Miksi näin käy?
   e) Miten PV-käyrä muuttuu, jos kuormapuolella kompensoidaan kaikki loisteho?
   f) Mitä PV-käyrä kertoo siirtokapasiteetista?

Vastaukset.

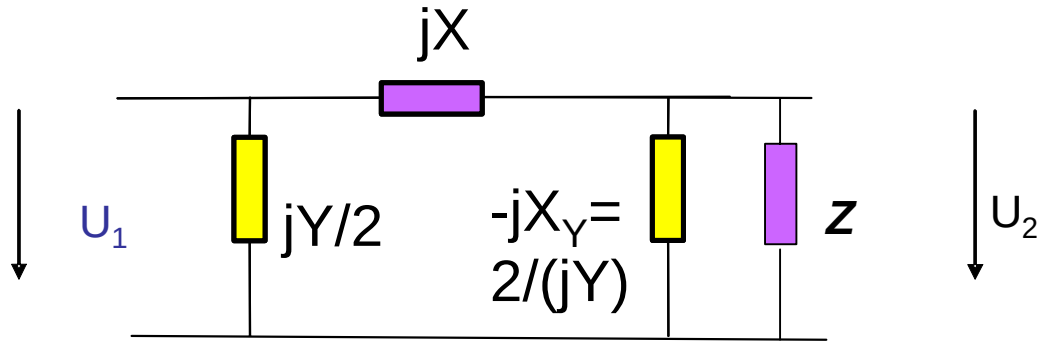


a) Kun kuorma-alueelta irtoaa yksi generaattori, korvaava teho tulee tuotantoalueelta. Toimintapiste siirtyy oikealle PV-käyrällä ja se on merkitty kuvaan ympyrällä.
b) PV-käyrä ”lyhenee”, koska verkon reaktanssi kasvaa yhden johdon irrottua.
c) PV-käyrä ”kasvaa” ja käännepiste siirtyy suuremman tehon kohdalle.
d) Kulma kasvaa, kun sama teho kulkee heikentyneen verkon (suurempi reaktanssi) kautta.
e) Muutos on samantapainen kuin kohdassa c, eli käyrä venyy pidemmäksi.
f) Käyrä kertoo, paljonko voidaan siirtää pätötehoa ilman, että jännite laskee liikaa johdon loppupäässä.

2. Tutkitaan 300 km:n pituista 400 kV johtoa. Johto oletetaan häviöttömäksi ja sitä voidaan laskea käyttämällä nimellis-π-sijaiskytkentää. Johdon induktanssi pituutta kohti L on 0,88 mH/km ja kapasitanssi pituutta kohti C on 12,4nF/km. Johdon alkupää on kiinni jäykässä verkossa ja sen jännite on 420 kV. Laske johdon loppupään jännite seuraavissa tapauksissa.

a)Johdon loppupäässä on kuorma, joka voidaan mallintaa tähteen kytketyillä resistansseilla, joiden arvot ovat R=200Ω / vaihe.
b) Johdon loppupäähän kytketään a)-kohdan kuorman lisäksi tähtikytkentäiset kapasitanssiparistot. Kapasitanssi vaihetta kohti on 1,8 μF.
c) Johto on tyhjäkäynnissä eli kuorma on irronnut eikä johdon loppupää ole kytketty mihinkään.
d) Tyhjäkäyvän johdon loppupäähän on kytketty jännitteen liiallisen nousen estämiseksi tähteen kytketyt reaktorit. Reaktorin induktanssi L= 5,6 H vaihetta kohti.

Ratkaisu:
Lasketaan loppupään jännite jännitteen jaolla. Voi tämän laskea virran avulla myös, mutta silloin pitää ottaa huomioon rinnan kytkentä loppupäässä.



$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\dfrac{2\cdot\overline{Z}}{jY(\frac{2}{jY}+\overline{Z})}}{\dfrac{2\cdot\overline{Z}}{jY(\frac{2}{jY}+\overline{Z})}+jX} = U_1 \cdot \frac{\dfrac{2\cdot\overline{Z}}{(2+jY\overline{Z})}}{\dfrac{2\cdot\overline{Z}}{(2+jY\overline{Z})}+jX} = U_1 \cdot \frac{2\overline{Z}}{2\cdot\overline{Z}+j2X-XY\overline{Z}} \quad (1)$$

Johdon reaktanssi *X* on $j300\cdot 2\pi 50\cdot 0{,}88\cdot 10^{-3}\Omega = j82{,}9\Omega$

Johdon suskeptanssi *Y* on $j300\cdot 2\pi 50\cdot 12{,}4\cdot 10^{-9}S = j1{,}1687mS$

Loppupään jännite on $U_2 = U_1 \cdot \dfrac{2\overline{Z}}{2\cdot\overline{Z}+j2X-XY\overline{Z}} = U_1 \cdot \dfrac{2\overline{Z}}{2\cdot\overline{Z}+j165{,}8\Omega-0{,}0967\cdot\overline{Z}}$

a) Johdon loppupäässä on resistanssi 200 Ω, joten impedanssi ***Z*** on 200 Ω. Tämä resistanssi on Y/2:n rinnalla, ei sarjassa.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{2\overline{Z}}{2\cdot\overline{Z}+j165{,}8\Omega-0{,}0967\cdot\overline{Z})} = U_1 \cdot \frac{400\Omega}{400\Omega+j165{,}8\Omega-0{,}0967\cdot 200)} =$$

$$U_1 \cdot \frac{400\Omega}{380{,}66\Omega+j165{,}8\Omega} = U_1 \cdot \frac{400}{415{,}20\angle 23{,}53°} = U_1 \cdot 0{,}9634 = 404{,}6kV\angle -23{,}53°$$

Loppupään jännite on 405 kV

b)

Johdon päähän kytketään kapasitanssit, joiden impedanssi on $\dfrac{1}{j2\pi 50\cdot 1{,}8\cdot 10^{-6}}\Omega = -j1768\Omega$. Yhtälön (1) Impedanssi ***Z*** on nyt resistanssin ja kapasitanssin rinnankytkentä eli

$$\overline{Z} = \frac{-200\cdot 1768j}{200-j1768}\Omega = \frac{-353600j}{1779\angle -83{,}54}\Omega = 198{,}73\angle -6{,}46° = (197{,}47-j22{,}36)\Omega$$

Johdon pään jännite on nyt:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{2\cdot 198{,}73\angle -6{,}46°}{2\cdot 198{,}73\angle -6{,}46°+j165{,}8\Omega-0{,}0967\cdot 198{,}73\angle -6{,}46°)} = U_1 \cdot \frac{397{,}46\angle -6{,}46°}{375{,}84+123{,}24j} =$$

$$U_1 \cdot \frac{397{,}46\angle -6{,}46°}{395{,}54\angle 18{,}14°} = U_1 \cdot 1{,}0049\angle -24{,}6° = 422kV\angle -24{,}6°$$

Loppupään jännite on 422 kV.

c) Johto on tyhjäkäynnissä. Nyt ei tarvitse käyttää yhtälöä (1), vaan käytetään suoraan jännitteen jakoa π-sijaiskytkennästä.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{2}{jY}}{\frac{2}{jY} + jX} = U_1 \cdot \frac{2}{2 + jXjY} = U_1 \cdot \frac{2}{2 + jXjY} = U_1 \cdot \frac{2}{2 - XY} = U_1 \cdot \frac{2}{2 - 82{,}9\Omega \cdot 1{,}1687mS} =$$

$$U_1 \cdot \frac{2}{2 - 0{,}0969} = U_1 \cdot 1{,}05 = 441kV$$

Johdon loppupään jännite on 441 kV.

d)

Johdon loppupäähän kytketään reaktorit, joiden impedanssi vaihetta kohti on

$$\overline{Z} = j2\pi 50 \cdot 5{,}6\Omega = j1760\Omega$$

Lasketaan loppupään jännite yhtälön (1) avulla.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{2\overline{Z}}{2 \cdot \overline{Z} + j2X - XY\overline{Z})} = U_1 \cdot \frac{2 \cdot j1760\Omega}{2 \cdot j1760\Omega + j165{,}8\Omega - 0{,}0967 \cdot j1760\Omega} =$$

$$U_1 \cdot \frac{j3520}{j3520 + j165{,}8 - j170{,}2} = U_1 \cdot \frac{j3520}{j3515{,}6} =$$

$$U_1 \cdot \frac{3520}{3350 + j165{,}8} = U_1 \cdot \frac{3520}{3354\angle 2{,}8°} = U_1 \cdot 1{,}00125 = 421kV =$$

Johdon loppupään jännite on 421 kV.

3. Tämä tehtävä käsittelee verkon maadoittamista ja maasulkua.

   a) Kerro verkon maadoittamisesta. Käsittele ainakin seuraavia asioita: Miksi Suomessa 400, 220 ja 110 kV verkot on osittain tai kokonaan maadoitettu? Mitä etuja maadoittamisesta saadaan? Miten muuntajien tähtipisteen maadoittaminen tai maadoittamatta jättäminen vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen? Arvostelu: Suomen tilanne kerrottu (0,5 p), edut: isompi virta, helpompi suojaus (0,5 p)., enemmän tähtipisteitä maissa, isompi virta (0,5 p.), yht. 1,5 p.

   b) Sähköasemalle tulee maasulku. Verkon Theveninin impedanssit ovat seuraavat: ***Z0***=j0,25pu, ***Z1***=j0,15pu ja ***Z2***=j0,14pu. Perustehona on 1000 MVA ja perusjännitteenä on 420 kV. Vika sattuu vaiheessa A ja vikaimpedanssi on nolla. Laske vikavirta suhteellisarvoina ja perusarvoina. Vikapaikan jännite ennen vikaa oli 0,95 pu.

Arvostelu. Kaikki oikein: 1,5 p. Muuten oikein, mutta jos puuttuu 3:lla kertominen tai neliöjuuri kolmella jakaminen fys. arvoilla laskettaessa, niin vähennetään 0,5 p.

   c) Sähköasemalle tulee 2-vaiheinen maaoikosulku. Verkon Theveninin impedanssit ovat seuraavat: ***Z0***=j0,25pu, ***Z1***=j0,15pu ja ***Z2***=j0,14pu. Perustehona on 1000 MVA ja perusjännitteenä on 420 kV. Vika sattuu vaiheissa B ja C. Vikaimpedanssi on nolla. Laske komponenttiverkkojen virrat suhteellisarvoina ja perusarvoina. Vikapaikan jännite ennen vikaa oli 0,95 pu.

   d) Piirrä alla olevien muuntajien nollaverkon kytkennät.

   e) Vertaile Yy- ja Dy-kytkentäisten muuntajien nollaverkkoja.

D ja f, arvosteltu yhdessä. Kaikki oikein: 1,5 p.

Ratkaisu:

a) Terveiden vaiheiden jännitteen nousu maasulussa pienenee, kun verkkoa maadoitetaan. Maadoitus lisää maasulkuvirtaa, mikä auttaa maasulkusuojauksen toteuttamista. Mitä enemmän muuntajien tähtipisteitä on maadoitettu, sitä suuremmat maasulkuvirrat.

b) Perusimpedanssi on 176,4Ω ja perusvirta on 1374,64A. Maasulussa komponenttiverkkojen impedanssit ovat sarjassa. Komponenttiverkoissa kulkeva virta on

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{u}{\bar{z}_1 + \bar{z}_2 + \bar{z}_0} = \frac{0{,}95}{j0{,}14 + j0{,}15 + j0{,}25} = -j1{,}76\,pu = -j2419\,A$$

Vikavirta on kolminkertainen komponenttiverkkojen virtaan verrattuna, joten vikavirta on

$$\bar{I}_A = 3\bar{I}_0 = -j3 \cdot 1{,}76\,pu = -j5{,}28\,pu = 7258\,A$$

c) Perusimpedanssi on 176,4Ω ja perusvirta on 1374,64A. 2-vaiheisessa maaoikosulussa myötäverkon impedanssi on sarjassa vasta- ja nollaverkon impedanssien rinnankytkennän kanssa. Komponenttiverkoissa kulkevat virrat ovat

$$\bar{I}_1 = \frac{u_F}{\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}}} = \frac{0{,}95}{j0{,}15 + \frac{j0{,}14 \cdot j0{,}25}{j0{,}14 + j0{,}25}} = -j3{,}96\,pu = j5{,}44kA$$

$$\bar{I}_2 = -\bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2} = j3{,}96 \cdot \frac{j0{,}25}{j0{,}14 + j0{,}25} = j2{,}53\,pu = j3{,}48kA$$

$$\bar{I}_0 = -\bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2} = j3{,}96 \cdot \frac{j0{,}14}{j0{,}14 + j0{,}25} = j1{,}422\,pu = j1{,}96kA$$

d)

e) Muuntajien nollaverkot ovat samanlaiset, kun sijaiskytkentää katsotaan ensiö- ja toisiopuolen liittimistä.

4. Kerro kulmastabiiliudesta.
   a) Mitä on kulmastabiilius? Mukana oltava ”generaattorin kyky pysyä tahdissa”.
   b) Mitkä seikat vaikuttavat johdon ja verkon kulmastabiiliuteen? Toimintapiste (kuorman suuruuus), verkon reaktanssi, jännitteensäätö, vikojen laukaisuaika,
   c) Miten kulmastabiiliutta voidaan parantaa? (lisää johtoja, sarjakompensointi, nopea jännitteensäätö, lisästabilointi, FACTS, nopea vian laukaisu)
   d) Miten generaattorin jännitteensäätö vaikuttaa kulmastabiiliuteen? (nopea jännitteensäätö parantaa transienttistabiiliutta, mutta heikentää vaimennusta. Lisästabilointi jännitteensäädössä parantaa vaimennusta.)
   e) Mikä on pinta-alakriteeri? Kuva ja selitys asiasta. Vian kesto ja poistuminen, sähköisen ja mekaanisen tehon erotusta integroidaan ja vertailllaann pinta-aloja)
   ~~f) Miten kulmastabiiliutta voidaan parantaa?~~

Arvostelu: kukin kohta 1,2 p.

5. Tarkastellaan siirtoreittiä, joka koostuu rinnakkaisista johdoista, joiden reaktanssi on 100 Ω. Millainen jännite kannattaa valita? Montako johtoa tarvitaan rinnakkain, jos reitin pitää siirtää 6000 MW teho ja verkkoa käytetään (n-1) –periaatteen mukaan. Oletetaan, että suurin sallittu kulmaero johdon päiden välillä on kaikissa tapauksissa 30°.

Ratkaisu:
Jos jännite on 400 kV, yhdellä johdolla voidaan siirtää

$$P\frac{(400kV)^2}{100\Omega}\sin 30° = 800MW$$

6000 MW:n siirtämiseen tarvitaan 6000/800 =7,5 johtoa. Siis johtoja on rakennettava kahdeksan, jos mikään johto ei koskaan laukea. Koska aina on varauduttava johdon laukeamiseen, tarvitaan 9 rinnakkaista johtoa.

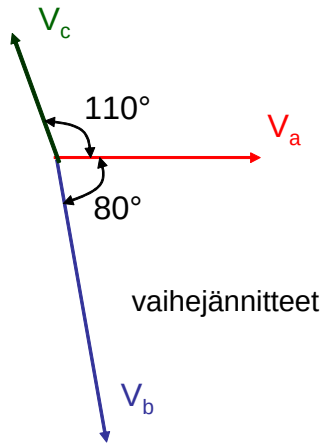
Jos valittaisiin siirtojännitteeksi 110 kV, tarvittaisiin rinnakkaisia johtoja:

$$n = \frac{6000MW \cdot 100\Omega}{(110kV)^2 \sin 30°} + 1 = 99{,}17 + 1 = 100{,}17 = 101 \text{johtoa.}$$

6. Tarkastellaan epäsymmetrisiä jännitteitä, joiden arvot ovat seuraavat. $\overline{U}_A = 0{,}90\angle 0°$, $\overline{U}_B = 1{,}25\angle 280°$, $\overline{U}_C = 0{,}60\angle 110°$. Piirrä jännitteiden osoittimet ja laske myötä- vasta ja nollakomponentit ja piirrä ne. Vastaukset: $\overline{U}_0 = 0{,}38\angle 36°$, $\overline{U}_1 = 0{,}85\angle 16°$, $\overline{U}_2 = 0{,}22\angle -177°$.

Jos osasi sijoittaa kaavaan arvot, laskea oikein ja piirtää kuvan, sain 5 p. Jos osasi vielä piirtää joka komponenttijännitteelle kolme osoitinta, sai 6 p.

Ratkaisu:



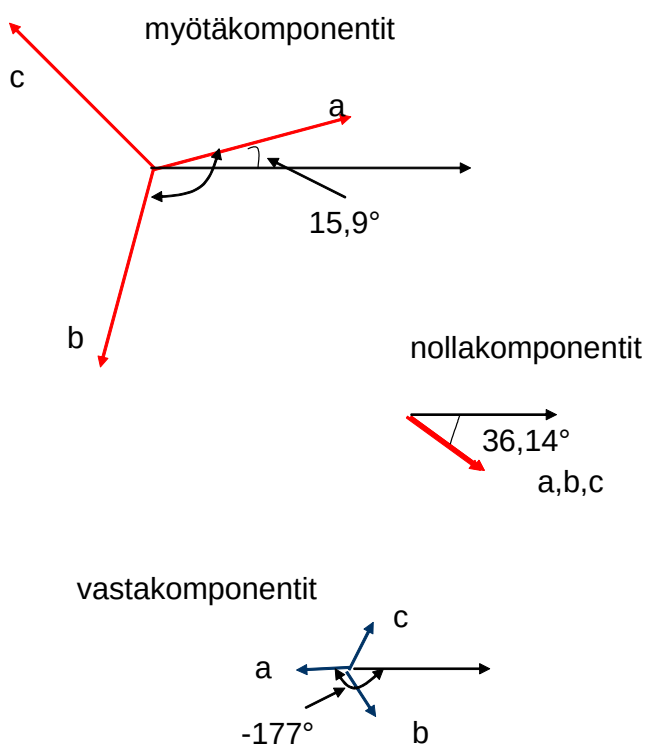
Lasketaan symmetriset komponentit:

$$\begin{bmatrix}\overline{U}_0\\ \overline{U}_1\\ \overline{U}_2\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2\\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{U}_A\\ \overline{U}_B\\ \overline{U}_C\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\overline{U}_0\\ \overline{U}_1\\ \overline{U}_2\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2\\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0{,}9e^{j0°}\\ 1{,}25e^{j280°}\\ 0{,}6e^{j110°}\end{bmatrix}=$$

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0{,}9e^{j0°}+1{,}25e^{j280°}+0{,}6e^{j110°}\\ 0{,}9e^{j0°}+1\cdot e^{j120°}\cdot 1{,}25e^{j280°}+1\cdot e^{j-120°}\cdot 0{,}6e^{j110°}\\ 0{,}9e^{j0°}+1\cdot e^{j-120°}\cdot 1{,}25e^{j280°}+1\cdot e^{j120°}\cdot 0{,}6e^{j110°}\end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0{,}9+0{,}217-j1{,}23-0{,}205+j0{,}564\\ 0{,}9+0{,}958+j0{,}803+0{,}591-j0{,}104\\ 0{,}9-1{,}17+j0{,}428-0{,}386-j0{,}460\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}0{,}304-j0{,}222\\ 0{,}817+j0{,}233\\ -0{,}219-j0{,}0107\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0{,}376e^{j-36°}\\ 0{,}849e^{j15{,}9°}\\ 0{,}219e^{-j177°}\end{bmatrix}$$

Piirretään symmetriset komponentit.