

Kaikkein yleisimmät virhekäsitykset liittyvät 3-vaiheiseen sähköjärjestelmään. Symmetrisen 3-vaihejärjestelmän vaihejärjestyksen täytyy olla a-b-c eli x-akselilla oleva havainnoitsija ”näkee” vaihejännitteet tuossa järjestyksessä, koska järjestelmä pyörii vastapäivään. Jos vaihdatte b- ja c-vaiheen paikkaa saatte niin sanotun vastajärjestelmän, joka on aivan eri asia (mm. oikosulkumoottori pyörisi tällöin väärään suuntaan).

Kolmivaiheisessa sähköverkossa ilmoitetaan **aina 3-vaiheiset tehot ja pääjännite**. Tällöin pääjännite (**Ohmin-laki**) ja **3-v näennäisteho** noudattavat yhtälöitä

Pääjännite $\underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{ZI}$ **3-v. Näennäisteho on** $\underline{S} = \sqrt{3} \cdot \underline{UI}^*$, jossa \underline{I}^* = virran konjugaatti

1) Vastaa seuraaviin kysymyksiin

- c) Jos symmetrisen kolmivaihejärjestelmän vaihejännite $\underline{U}_b = 11,55 \angle -90^\circ kV$, niin laske vaiheiden b- ja c-välisen pääjännitteen \underline{U}_{bc} arvo

Ensin määritetään vaihejännitteen c-arvo, joka on 120 astetta jäljessä vaihejännitettä b eli

$\underline{U}_c = 11,55 \angle -90^\circ - 120^\circ kV = 11,55 \angle -210^\circ kV$. Pääjännitteen laskemisessa on helpointa

käyttää pääjännitteen määritelmää eli se on määritelty kahden vaihejännitteen erotuksena eli

$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = 11,55 \angle -90^\circ kV - 11,55 \angle -210^\circ kV = 20,0 \angle -60^\circ kV$

3) Jännite johdon alussa on 21 kV ja johdon resistanssi on 0,22 Ω/km ja reaktanssi 0,35 Ω/km .

Johdon lopussa on kuormitus, jonka tehokerroin on $\cos \varphi = 0,9_{ind}$.

- a) Paljonko voidaan siirtää tehoa 10 km päähän, jos sallitaan 5 % jännitteenalenema.
 b) Kuorman pätöteho säilyy a-kohdan mukaisena, mutta kuorman tehokerroin pystytään kompensoimalla nostamaan arvoon 0,98_{ind}. Oletetaan loppupään jännitteen pysyvän a-kohdan mukaisena. Kuinka suuri teho pystytään nyt siirtämään?
 c) Laske johdon pätö- ja loistehohäviöt b-kohdassa

a) Jännitteenalenema pääjännitteenä ilmaistuna on $U_h = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$. Ratkaistaan

tästä virta I , jolloin saadaan $I = \frac{U_h}{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}$. Kysymyksen perusteella

tiedetään U_h :n olevan $0,05 \cdot 21000V = 1050V$, joten virta on

$$I = \frac{0,05 \cdot 21000V}{\sqrt{3} \cdot (10km \cdot 0,22\Omega / km \cdot 0,9 + 10km \cdot 0,35\Omega / km \cdot \sin(\cos^{-1} 0,9))} = 172,93A$$

Kuorman suuruus tulee olemaan (pääjännite kulmaan nolla)

$$\underline{S} = \sqrt{3} \cdot \underline{UI}^* = \sqrt{3} \cdot (1 - 0,05) \cdot 21kV \cdot 172,93 \angle 25,84^\circ A = (5,378 + j2,604) MVA$$

$$P = 5,378MW \text{ ja } Q = 2,604MVA_r$$

b) Lasketaan virran uusi arvo, kun tehokerroin on 0,98 eli

$$I = \frac{0,05 \cdot 21000V}{\sqrt{3} \cdot (10km \cdot 0,22\Omega / km \cdot 0,98 + 10km \cdot 0,35\Omega / km \cdot \sin(\cos^{-1} 0,98))} = 212,52A$$

Kuorman suuruus tulee olemaan

$$\underline{S} = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot (1 - 0,05) \cdot 21kV \cdot 212,52 \angle 11,48^\circ A = (7,196 + j1,461)MVA$$

$$P = 7,196MW \text{ ja } Q = 1,461MVar$$

Kysymyksessä on valitettavasti sellainen virhe, että sanotaan pätötehon pysyvän vakiona, mutta sitten kuitenkin halutaan laskettavan uusi suurempi pätöteho eli kysymys ei ole yksikäsitteinen (tämä on huomioitu arvostelussa). Yllä on ratkaistu paljonko suurempi pätöteho pystytään kompensoinnin ansiosta siirtämään.

Lisäksi kannattaa huomata kuinka epärealistinen on oletus loppupään jännitteen vakiona pysyminen. Heti kun kuormituksen rinnalle sijoitetaan kompensointia, muuttuu loppupään jännite.

c) Pätö- ja loistehohäviöt johdolla ovat b-kohdassa

$$P_h = 3RI^2 = 3 \cdot 10 \cdot 0,22 \cdot (212,52)^2 = 298,0kW$$

$$Q_h = 3XI^2 = 3 \cdot 10 \cdot 0,35 \cdot (212,52)^2 = 474,2kVar$$

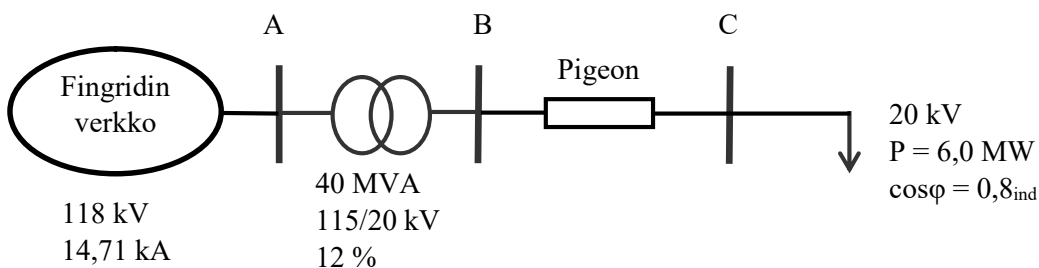
4) Kuvan 1 verkossa Pigeon-johtimen impedanssi on $\underline{Z}_{Pig} = (0,34 + j0,35)\Omega / km$ ja pituus 5 km.

Pisteen C kuormitus on $P = 6$ MW, tehokerroin $0,8_{ind}$ ja jännite 20 kV.

a) Laske kiskon B jännite käyttäen jännitteenalenemaa

b) Selvitä onko Pigeon johdin oikosulkukestoinen, kun se kestää 8 kA oikosulkuvirtaa 1 sekunnin.

c) Jos Pigeon ei ole oikosulkukestoinen, niin kuinka nopeasti relesuojauksen tulisi toimia?



Kuva 1.

a) Lasketaan kuormituksen virta ja edelleen jännitteenalenema

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos \varphi} = \frac{6MW}{\sqrt{3} \cdot 20kV \cdot 0,9} = 216,51A$$

$$U_h = \sqrt{3} \cdot 216,5A \cdot (5km \cdot 0,34\Omega / km \cdot 0,8 + 5km \cdot 0,35\Omega / km \cdot \sin(\cos^{-1} 0,8)) = 903,72V$$

Pisteen B jännite on siis

$$U_B = 20kV + 0,903kV = 20,90kV$$

- b) Oikosulkukestoisuus selviää laskemalla suurin virta, joka voi mennä Pigeon-johtimen läpi. Tässä tilanteessa suurin 3-v. vikavirta syntyy (vikaimpedanssi nolla) vian tapahtuessa kiskossa B. Jos vika siirtyy kiskosta B esim. 10 m kohti pistettä C on vikavirta käytännössä yhtä suuri kuin kiskossa B ja tämän 10 m matkan johtoa on kestävä vikavirta. Kiskossa C tapahtuva vika ei täten määrää Pigeonin oikosulkukestoisuutta.

Ratkaistaan tehtävä redusoimalla suureet 20 kV jännitetasoon. Lasketaan Theveninin impedanssi pisteestä B katsoen.

Ulkoinen verkko redusoituna 20 kV tasolle

$$X_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{118kV}{\sqrt{3} \cdot 14,71kA} = 4,631\Omega \quad \text{redusoituna } X_k = 4,631\Omega \cdot \left(\frac{20kV}{115kV}\right)^2 = 0,14\Omega$$

Muuntaja

$$X_m = z_k \cdot \frac{(U_n)^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{(20)^2}{50MVA} = 1,20\Omega$$

Theveninin impedanssi pisteestä B katsottuna

$$\underline{Z}_{th} = jX_k + jX_m = j0,14 + j1,2 = j1,34\Omega$$

Lasketaan vikavirran suuruus pisteessä B.

$$I_k = \frac{U_{th}}{\underline{Z}_{th} + \underline{Z}_f} = \frac{20,90 \angle 0^\circ kV}{\sqrt{3} \cdot j1,34\Omega} = -j9,00kA$$

Pigeon kestää 1 sekunnin ajan 8 kA virran, joten suojaus on toimittava nopeammin kuin 1 sekunti, jotta Pigeon olisi oikosulkukestoinen. Lasketaan, kuinka nopeasti suojaus on toimittava.

Aika saadaan ratkaistua vikakestoisuuden yhtälöstä $I_{kt} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}}$ eli saadaan

$$I_{kt} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}} \Leftrightarrow t = \left(\frac{I_{kt}}{I_{k1s}}\right)^2 = \left(\frac{8kA}{9kA}\right)^2 = 0,79s$$

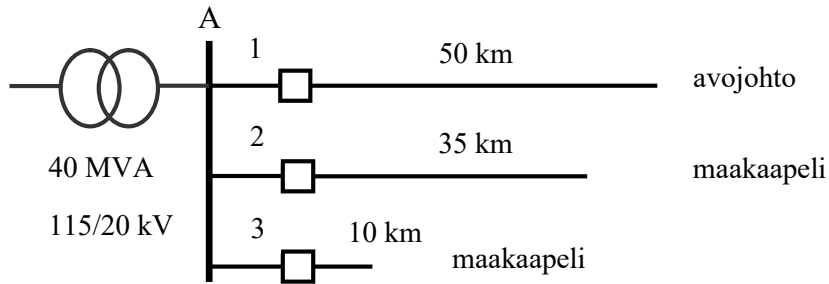
Pigeon on siis oikosulkukestoinen, jos vika poistuu nopeammin kuin 0,79 sekuntia. Käytännössä olisi syytä laskea vikavirta vielä suuremmalla jännitteellä eli esim. laskentajännite 22 kV antaisi virraksi 9,47 kA ja suojaus toiminta-ajaksi korkeintaan 0,71s.

- 5) Tarkastellaan kuvan 2 mukaista maasta erotettua kolmen keskijännitelähdön muodostamaa verkkoa. Verkkoa syöttävän sähköaseman kiskon A pääjännite on 21 kV. Lähdön 3 alussa sattuu 1-vaiheinen vikavastukseton maasulku.

Johtotyyppi	Pituus km	r Ω /km	x Ω /km	Maakapasitanssi/nF/km
avojohto	50	0,22	0,35	6
maakaapeli	35	0,18	0,085	260
maakaapeli	10	0,18	0,085	260

- a) Laske maasulkuvirran suuruus
b) Laske lähtöjen 1 ja 2 läpi menevien virtojen suuruus

c) Miksi laskennassa ei tarvitse ottaa huomioon johtolähtöjen sarjaimpedansseja?



Kuva 2.

a) Lasketaan verkon kokonaismaakapasitanssi ja maasulkuvirta.

$$C_{tot} = C_{avo} + C_{kaa} = 50 \text{ km} \cdot 6 \text{ nF/km} + (35 + 10) \text{ km} \cdot 260 \text{ nF/km} = 12 \mu\text{F}$$

Maasulkuvirta

$$I_f = 2\pi \cdot f \cdot 3CU_v = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 3 \cdot 12 \text{ nF} \cdot \frac{21000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 137,12 \text{ A}$$

Maasulkuvirta jakaantuu lähdöille 1 ja 2 seuraavasti:

$$I_{f1} = \frac{(C_{tot} - C_{23})}{C_{tot}} \cdot I_f = \frac{(12 \mu\text{F} - 11,7 \mu\text{F})}{12 \mu\text{F}} \cdot 137,12 \text{ A} = 3,43 \text{ A}$$

b) C_{23} = lähtöjen 2 ja 3 maakapasitanssien summa

$$I_{f2} = \frac{(C_{tot} - C_{13})}{C_{tot}} \cdot I_f = \frac{(12 \mu\text{F} - 2,9 \mu\text{F})}{12 \mu\text{F}} \cdot 137,12 \text{ A} = 103,98 \text{ A}$$

C_{13} = lähtöjen 1 ja 3 maakapasitanssien summa