

**TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**SYMMETRISTEN KOMPONENTTIEN MALLINNUS**

**Työn tekijä: Miika Kukkonen  
Työn valvoja: Sampsa Kupari  
Työn ohjaaja: Ilkka Kinosmaa**

**Työ hyväksytty: \_\_. \_\_. 2007**

**Sampsa Kupari  
lehtori**

## INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Ilkka Inssi	
Työn nimi: Symmetristen komponenttien mallinnus	
Päivämäärä: 16.1.2007	Sivumäärä: 35 s.
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja: lehtori Sampsa Kupari	
Työn ohjaaja: Lab. ins. Ilkka Kinosmaa	
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin Helsingin ammattikorkeakoululle jakeluverkoissa tapahtuvien oikosulkujen symmetristen komponenttien laskutavan havainnollistamiseen so-piva sijaiskytkentä. Sijaiskytkennässä tärkeitä huomioitavia asioita olivat mm. jännitetaso, havainnollistavien muuntajien oikosulkukestoisuus, jatkokäyttö laboratoriotyönä ja yleinen havainnollistavuus.</p> <p>Työssä on aluksi perehdytty symmetristen komponenttien ja jakeluverkoissa tapahtuvien oikosulkujen teoriaan. Tämän jälkeen mitoitettiin tarvittavan kytkennän komponenttien jännite- ja virtakestoisuudet mahdolliset lisäkäytöt huomioiden. Näiden rajoitusten mukaan perusteella työtä ruvettiin toteuttamaan.</p> <p>Työssä tilattiin sähkön 40 V:n pääjännitetasolle alentava muuntaja syöttämään oikosulun kestävää muuntajaa, jolla simuloitiin jakeluverkon yleisimpiä vikatyyppejä. Jälkimmäiselle muuntajalle mitoitettiin ja hankittiin sisäistä impedanssia vastaava induktanssi. Tämän avulla rakennettiin kokonaisuus, jonka avulla voidaan simuloida kaikkia tapahtuvia oi-kosulkuja vastaavat sijaiskytkennät. Työhön jätettiin kehittämisvaraa ja muita laboratorio-työn rakentamismahdollisuuksia tulevien insinööritöiden tekijöille.</p>	
Avainsanat: Symmetriset komponentit	

## ABSTRACT

Name: Miika Kukkonen	
Title: Demonstration of Method of Symmetrical Components	
Date: 16.1.2007	Number of pages: 35
Department: Electrical Engineering	Study Programme: Electrical Power Engineering
Instructor: Sampsa Kupari, senior lecturer	
Supervisor: Ilkka Kinosmaa, laboratory engineer	
<p>This final year project was done for Helsinki School of Polytechnic to design and engineer a switching for demonstration of short-circuits in distribution networks and their counterparts in the calculation method of symmetrical components.</p> <p>The project is started by presenting the theory of method of symmetrical components and short circuits happening in electrical distribution networks. After this the current and voltage durabilities of the components necessary to the switching are calculated, keeping attention for possible future expansion and other uses in laboratory. The switching was begun to engineer within these limits.</p> <p>In the project there was ordered a transformer reducing the mains voltage to level of 40 V to power a short circuit –resistant transformer, which is used to simulate most common types of short circuits happening in distribution networks. For the latter transformer an inductance corresponding the internal impedance of the transformer was calculated and acquired. With these components is possible to simulate all the short circuits and their corresponding couplings with the method of symmetrical components. Room for development and other possibilities for other final year projects were left on the switching.</p>	
Keywords: Symmetrical Components	

## SISÄLLYS

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SÄHKÖNJAKELUVERKKOJEN OIKOSULKUTILANTEITA</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Kolmivaiheinen oikosulku</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Kaksivaiheinen oikosulku</b>	<b>3</b>
<b>2.3</b>	<b>Yksivaiheinen oikosulku</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>OIKOSULKUTILANTEIDEN LASKEMINEN</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Yleisiä laskemisperiaatteita</b>	<b>5</b>
<b>3.2</b>	<b>Kolmivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen</b>	<b>8</b>
<b>3.3</b>	<b>Kaksivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen</b>	<b>9</b>
<b>3.4</b>	<b>Yksivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>KYTKENNÄLLE ESITETYT VAATIMUKSET</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>KOMPONENTIT</b>	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Muuntajat</b>	<b>14</b>
<b>5.2</b>	<b>Induktanssit</b>	<b>15</b>
<b>5.3</b>	<b>Kytkenän kapasitanssit</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>X<sub>T</sub> LASKENTAA VARTEN SUORITETUT MITTAUKSET</b>	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>Kolmivaiheisten oikosulkujen mittaukset</b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b>Kaksivaiheisten oikosulkujen mittaukset</b>	<b>17</b>
<b>6.3</b>	<b>Yksivaiheisten oikosulkujen mittaukset</b>	<b>17</b>

<b>7 MUUNTAJAN SIJAISKYTKENNÄN LASKEMINEN</b>	18
<b>7.1 Sijaiskytkennän oikosulkuarvojen laskeminen</b>	18
<i>7.1.1 Kolmivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	19
<i>7.1.2 Kolmivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	19
<i>7.1.3 Kaksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	20
<i>7.1.4 Kaksivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	20
<i>7.1.5 Yksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	20
<i>7.1.6 Yksivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen</i>	21
<b>7.2 Sisäisen impedanssin laskeminen ja arvon tarkastelu</b>	21
<i>7.2.1 <math>X_T'</math> Kolmivaiheisissa sijaiskytkennöissä</i>	22
<i>7.2.2 <math>X_T'</math> Kaksivaiheisissa sijaiskytkennöissä</i>	23
<i>7.2.3 <math>X_T</math> Yksivaiheisissa sijaiskytkennöissä</i>	24
<b>8 SIJAISKYTKENTÄ</b>	27
<b>8.1 Kolmivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät</b>	28
<b>8.2 Kaksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät</b>	29
<b>8.3 Yksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät</b>	30
<b>9 EROAVAISUUDET ARVOJEN VÄLILLÄ</b>	32
<b>9.1 Kolmivaiheiset oikosulut</b>	32
<b>9.2 Kaksivaiheiset oikosulut</b>	33
<b>9.3 Yksivaiheiset oikosulut</b>	34
<b>10 LOPPUPÄÄTELMÄT</b>	34
<b>11 LÄHTEET</b>	35

## 1 JOHDANTO

Helsingin ammattikorkeakoulun teorialuokan opetuksessa on mahdollista perehtyä sähköverkkojen oikosulkuihin ja näihin liittyvien ilmiöiden laskemiseen useiden kurssien verran. Kuitenkaan näistä ei ole mahdollista esittää opiskelijoille simulaatiota, edes tietokoneella. Myöskään laboratorioopetuksessa ei ole aiheeseen liittyvää työtä, vaikka melkein kaikki muu teoriaopetukseen liittyvä onkin voitu laboratorio-olosuhteissa ja -kursseilla toteuttaa. Tämä on johtanut tarpeeseen tehdä molempiin tarkoituksiin soveltuva kytkentä.

Tässä insinööriössä suunnitellaan ja toteutetaan Helsingin ammattikorkeakoululle kytkentä, jolla havainnollistaa sähköverkon erilaisia oikosulkutilanteita, oikosulkujen ominaispiirteitä, ilmiöitä ja näiden symmetristen komponenttien sijaiskytkentöjen toimivuutta käytännönkin tasolla. Työssä esitellään myös näiden oikosulkujen ja sijaiskytkentöjen teoriaa, laskemista ja ilmiöiden luonteiden teoriaa perustasolla.

Kytkentää on aloitettu toteuttaa oppilaitoksen puolelta aikaisemminkin, mutta vastaan on tullut erilaisia ongelmia. Eräänä ongelmana on ollut tekijän löytäminen, sillä laboratorioinsinööreillä on paljon muitakin tehtäviä ja aiheesta kiinnostunutta opiskelijaa ei ole löytynyt. Sähköisesti ongelmalliseksi kytkennän toteuttamisen ovat tehneet oikosulkujen suuret virrat ja muuntajien oikosulkukestoisuus. Näiden syiden takia ei jo käytössä olevia muuntajia voida käyttää, vaan tarvitaan erikoismuuntaja.

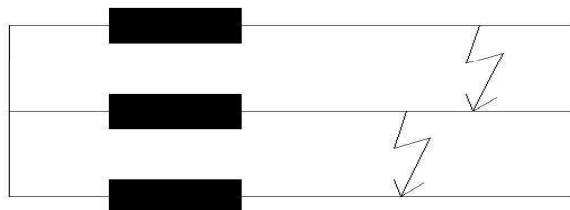
Työ voidaan jakaa rakenteeltaan vaatimus-, suunnittelu- ja toteutusosaan. Vaatimusosiossa selvitetään kytkennän kestävyysvaatimuksia ja muita tarvittavia ominaisuuksia. Suunnitteluvaiheessa kytkentää kehitetään vaatimusten mukaiseksi ja mitoitetaan kytkennän komponentteja. Toteutusosassa kytkentä rakennutetaan ja arvioidaan tavoitteiden saavuttaminen.

## 2 SÄHKÖNJAKELUVERKKOJEN OIKOSULKUTILANTEITA

Oikosulut voidaan sähkönjakeluverkossa jakaa kolmi-, kaksi-, ja yksivaiheisiin oikosulkutilanteisiin. Näiden oikosulkujen syntymisen syyt ja erityiset piirteet vaihtelevat riippuen oikosulun tyypistä. Kaikki oikosulkutyypit aiheuttavat kuitenkin jännitteen alenemista rinnakkaisjohdoilla ja vaarantavat sekä laitteistoja, ihmisiä ja/tai eläimiä. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään näiden ominaispiirteitä oikosulkutyypeittäin.

### 2.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheisessa oikosulussa ovat kaikki kolmivaiheisen sähköjärjestelmän johtimet kosketuksissa toisiinsa.



Kuva 1. Kolmivaiheinen oikosulku

Vikaresistanssittomassa tapauksessaan tämä on vaikein oikosulkutyyppeistä. Vaikeaksi tämän tekee virran suuruus, joka on tyypillisesti 10 - 40 -kertainen järjestelmän nimelliseen kuormitusvirtaan nähden. Tämä saa aikaan järjestelmässä huomattavia termisiä ja mekaanisia rasitteita. Yleisimmät syyt kolmivaiheisten oikosulkujen syntymiseen avojohdoilla ovat ilmastosta johtuvia. Esimerkiksi avojohtimille kaatuvat puut, putoavat oksat, salamaniskut ja myrskytuulet. Myös ihmisten toiminta, kuten ilkivalta, liikenneturmat, huoltotoimenpiteiden yhteydessä paikalleen unohtuneet maadoitukset ja työkalut, virheelliset käyttötoimenpiteet ja linjojen läheisyydessä tehtävät työt aiheuttavat saman lopputuloksen. /1, s. 74 - 87; 2; 3./

## 2.2 Kaksivaiheinen oikosulku

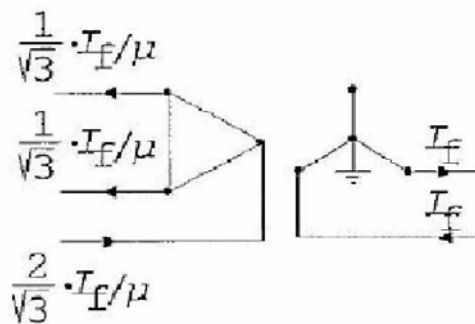
Kaksivaiheisessa oikosulussa (kuva 2) kaksi erivaiheista johdinta ovat kosketuksissa toisiinsa, joko vikaresistanssilla tai ilman.



Kuva 2. Kaksivaiheinen vikaresistanssiton oikosulku

Kaksivaiheisen oikosulun vikavirrat ovat noin 85 % vastaavasta kolmivaiheisestä. Syyt kaksivaiheisen oikosulun tapahtumiseen ovat suurelta osin samoja, kuin kolmivaiheisessäkin oikosulussa. Näiden lisäksi voivat esimerkiksi oravat ja isot linnut aiheuttaa vian syntymisen muuntajissa ja avojohdoilla. /2; 4./

Luonteeltaan kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen, eli eri vaiheiden virrat ja jännitteet eroavat toisistaan normaalioloja enemmän. Tämä aiheuttaa myös virtojen ja jännitteiden jakaantumisen eri tavoin muuntajan ensiö- ja toisiopuolilla. Kuvassa 3 esitetään kaksivaiheisen oikosulun aikainen virtojen jakautuminen Dyn-kytketyn muuntajan ensiössä ja toisiossa. /3; 4./



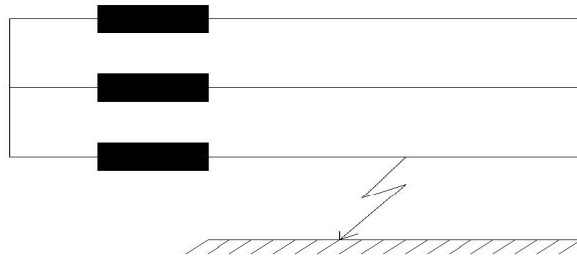
Kuva 3. Muuntajavirtojen jakautuminen 2-vaiheisessa oikosulussa /3/



Kuvassa  $I_f$  merkitsee vikavirtaa,  $\mu$  muuntajan muuntosuhdetta ja nuolet osoittavat virtojen suunnat.

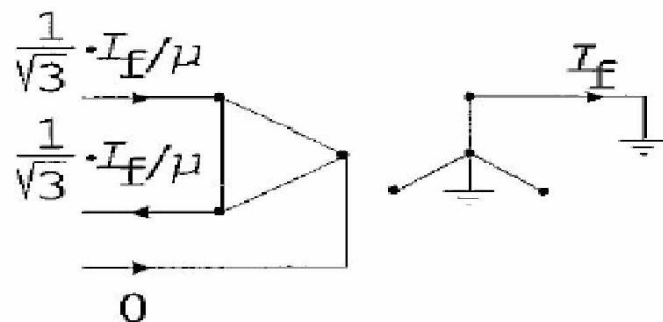
### 2.3 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheisessa oikosulussa (kuva 4) on vain yksi kolmivaiheisen järjestelmän johtimista kosketuksissa maahan, joko suoraan tai vikaresistanssin kautta (kuva 4).



Kuva 4. Yksivaiheinen oikosulku

Kuten kaksivaiheisenkin oikosulku, tämäkin vikatyyppi on luonteeltaan epäsymmetrinen. Voidaan havaita (kuva 5), miten virrat jakautuvat oikosulun aikana Dyn-kytketyssä muuntajassa.



Kuva 5. Muuntajavirrat yksivaiheisessa oikosulussa /3/

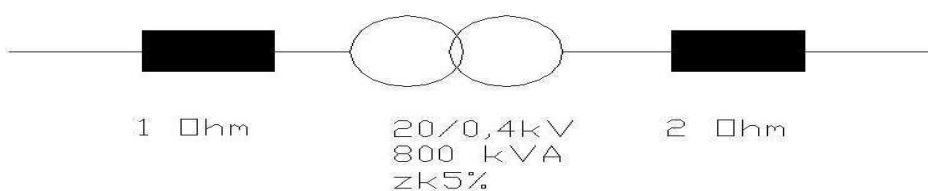
Yksivaiheisen oikosulun voi aiheuttaa avojohdoilla puun kaatuminen johtimille, tai johdin voi pudota maahan. Maakaapeleilla syynä maasulkuun voi olla eläimien tai ihmisten tekemän kaivamisen aiheuttama kaapelivika, tai maan routiminen huonosti asennetuilla kaapeleilla. /2; 5./

### 3 OIKOSULKUTILANTEIDEN LASKEMINEN

Oikosulkujen eri sähköisten arvojen laskemiseen voidaan käyttää useita menetelmiä. Tässä käsitellään kuitenkin ainoastaan symmetristen komponenttien laskentatapaa, sillä tämä olennaisin tapa työn kannalta

#### 3.1 Yleisiä oikosulun laskemisperiaatteita

Kaikissa oikosuluissa on yleisiä piirteitä, jotka otetaan huomioon laskemisperiaatteissa. Laskettavasta järjestelmästä on tiedettävä kaikkien verkon komponenttien tehot, jännitetasot, impedanssit ja kytkentätavat toisiinsa nähden, jotta oikosulun arvot voitaisiin laskea. Riippumatta oikosulun tyypistä, tulee kaikki impedanssit ja jännitteet redusoida yhdelle yhteiselle jännitetasolle ja muuntajat korvata näitä vastaavilla impedansseilla.



Kuva 6. KytKentä ennen redusointia

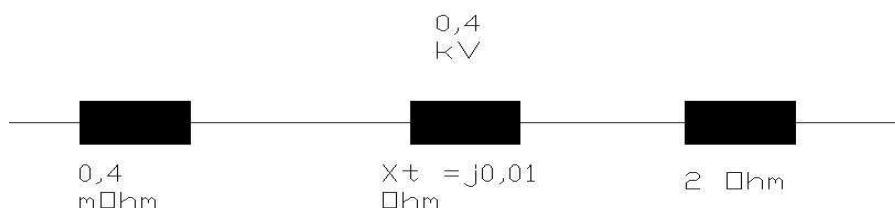
Redusoinnissa yleensä valitaan jännitetaso, jossa vika tapahtuu. Jännitteet redusoidaan kaavalla 1, muuntajat korvataan laskennallisilla impedansseilla kaavan 2 avulla ja impedanssit redusoidaan alemmalle jännitetasolle kaavalla 3.

$$U' = \frac{N_2}{N_1} * U = \frac{1}{\mu} * U \quad (1)$$

$$X_T = \frac{U^2}{S_n} * z_k \quad (2)$$

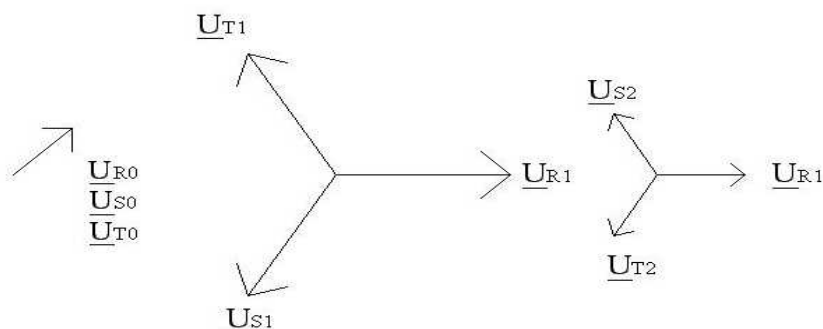
$$Z' = \left(\frac{1}{\mu}\right)^2 * Z \quad (3)$$

Tässä  $U'$  on redusoitu jännite,  $X_T$  muuntajan oikosulkuimpedanssi,  $z_k$  muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi ja  $Z'$  redusoitu impedanssi. Muuntajien suhteen voidaan yleensä riittävällä tarkkuudella olettaa näiden impedanssien muodostuvan melkein yksinomaan reaktanssista, sillä resistanssin osuus suhteessa reaktanssiin on hyvin pieni.



Kuva 7. Redusoitu kytkentä

Laskettaessa symmetrisillä komponenteilla sähköjärjestelmän suureita, erotellaan normaali kolmivaiheinen järjestelmä myötä-, vasta- ja nollaverkkoon. Nollajärjestelmässä kaikki jännite- ja virtakomponentit ovat samansuuntaiset, myötäjärjestelmä vastaa normaalia verkkoa vaihejärjestyksellä R-S-T ja vastajärjestelmässä vaihejärjestys on tälle päinvastainen, eli R-T-S. R-vaihe on määritetty perusvaiheeksi. (Kuva 8).



Kuva 8. Nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä

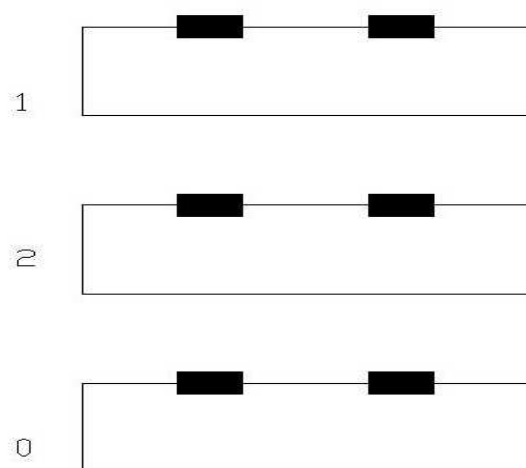
Kolmivaihejärjestelmä koostuu näistä komponenteista ja siten vaihejännitteet voidaan esittää kaavan 4 matriisiyhtälön avulla.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Missä  $a$  on kierto-osoitin  $1 \angle 120^\circ$ .  $U_0$ ,  $U_1$  ja  $U_2$  ovat nolla-, myötä- ja vastajärjestelmän jännitekomponentit. Vastaavasti järjestelmien jännitteet voidaan muuttaa symmetristen komponenttien muotoon kaavan 5 avulla.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kaavat 4 ja 5 pätevät myös virtoihin. Tällöin vain jännitteen symboli  $U$  korvataan virran symbolilla  $I$ . Virtojen saamiseksi selville tulee kuitenkin vielä tehdä vikatilanteen tyypistä erillinen sijaiskytkentä eri verkoille. Koska verkot ovat erillisiä toisistaan, näiden kytkentä toisiinsa nähden riippuu vian tyypistä. (Ks. 3.2 - 3.4.)



Kuva 9. Myötä-, vasta- ja nollaverkkojen mallit kytkemättöminä

Myös verkkojen impedanssit eroavat toisistaan. Mikäli vastaverkossa ei ole pyöriviä koneita, vastaavat sen komponentit impedansseiltaan täysin myötaverkon vastaavia. Nollaverkon johtimen impedanssille pätee kaava 6, mutta muuntajien impedanssi riippuu muuntajien kytkennästä. (Ks. 3.4.)

/6, s. 275 - 287./

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_V + 3 * \underline{Z}_N \quad (6)$$

$Z_0$  on nollaverkon impedanssi,  $Z_V$  vaihejohtimien impedanssi ja  $Z_N$  nollajoh-  
timen impedanssi.

### 3.2 Kolmivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen

Täysin symmetrisessä kolmivaiheisessa oikosulussa kumoutuvat järjestelmästä nolla- ja vastakomponentit. Tästä syystä ainoastaan myötäkomponentti esiintyy. Tämä johtaa kaavaan 7.

$$I_0 = I_2 = 0 \quad (7)$$

Kun tämän kaavan arvo sijoitetaan kaavoihin 4 ja 5, jossa jännitteet on korvattu vastaavilla virtakomponenteilla, voidaan matriisi kirjoittaa kaavassa 8 esitettyyn muotoon.

$$I_R = I_S = I_T = I_1 = I_K \quad (8)$$

Varsinaisten vikavirran  $I_K$  laskemiseksi tehdään sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Kolmivaiheisen oikosulun sijaiskytkentä

Sijaiskytkennälle pätee kaava 9:

$$I_K = \frac{E_{TH}}{\Sigma Z'} = \frac{U / \sqrt{3}}{\Sigma Z'} \quad (9)$$

Kaavassa  $E_{TH}$  on Theveninin jännitelähde ja  $\Sigma Z'$  kaikkien redusoitujen impedanssien summa.

### 3.3 Kaksivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen

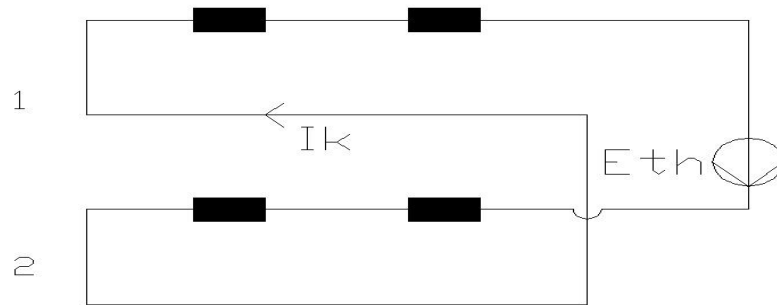
Laskettaessa kaksivaiheisen oikosulun vikavirtaa, määritetään oikosulku tapahtumaan S- ja T-vaiheiden välissä, joten R-vaihetta ei huomioida. Tässä oikosulussa nollaverkko kumoutuu, kuten kolmivaiheisessakin tapauksessa. Kuitenkin myötä- ja vastaverkko esiintyvät. Tämä johtaa kaavaan 10.

$$I_0 = I_R = 0 \quad (10)$$

Sijoitettaessa arvot kaavaan 5, voidaan tämä kirjoittaa kaavan 11 esittämällä tavalla.

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2 \quad (11)$$

Nollaverkon puuttumisen johdosta sijaiskytkentä muodostuu pelkästään myötä- ja vastaverkkojen rinnankytkennästä, kuten kuvassa 11 on esitetty /4/.



Kuva 11. Kaksivaiheisen oikosulun sijaiskytkentä

Oikosulkuvirran arvo lasketaan kaavalla 9. Sijoitettaessa kaavasta saatava arvo kaavoihin 5 ja 4, havaitaan S- ja T-vaiheiden vikavirrat yhtä suuriksi. Tämä voidaan esittää kaavan 12 muodossa.

$$|I_S| = |I_T| = |I_K| = \left| 1\angle 240^\circ * \underline{I}_1 + 1\angle 120^\circ * \underline{I}_2 \right| \quad (12)$$

### 3.4 Yksivaiheisen oikosulun vikavirran laskeminen

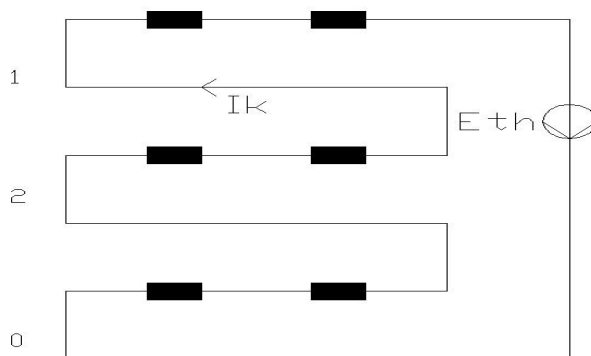
Yksivaiheisessa oikosulussa esiintyvät kaikki symmetristen komponenttien verkkotyypit. Tämän johdosta voidaan kirjoittaa kaava 5 muotoon, joka esitetään kaavassa 13.

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_K = \frac{1}{3} I_T \quad (13)$$

Yksivaiheisessa tapauksessa oletetaan T-vaiheen menevän oikosulkuun. Tämän takia myös ainoastaan tässä vaiheessa esiintyy oikosulkuvirta. Tätä havainnollistaa kaava 14.

$$I_R = I_S = 0 \quad (14)$$

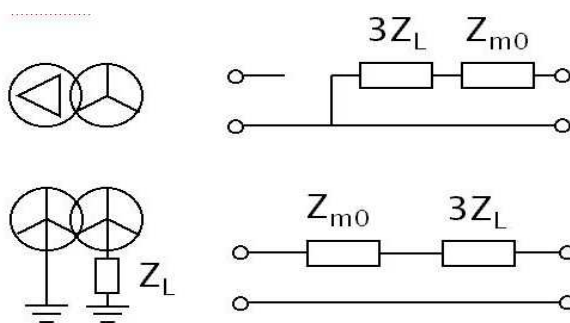
Sijaiskytkentä tehdään kytkemällä kaikki komponenttiverkot sarjaan.



Kuva 12. 1-vaiheisen oikosulun sijaiskytkentä

Oikosulkuvirran laskemiseksi käytetään kaavaa 9.

Verkossa esiintyvät muuntajat voivat rakenteestaan riippuen katkaista kohdaltaan nollaverkon ja tätä edeltäneet impedanssit. Tässä tapauksessa on jätettävä esimerkiksi Dyn-kytketyssä muuntajassa kaikki muuntajaa edeltäneet impedanssit huomioimatta laskussa nollaverkon osalta. /4; 6, s. 275 - 287./



Kuva 13. Muuntajien käämitysten kuvautuminen nollaverkossa /7/



#### 4 KYTKENNÄLLE ESITETYT VAATIMUKSET

Kytkenälle on monia vaatimuksia. Osa vaatimuksista liittyy kytkennän käyttötarkoitukseen, laajennettavuuteen ja käyttöturvallisuuteen. Kytkennällä on myös fyysisiä vaatimuksia, jotka koskevat mm. jännitteiden ja virtojen arvoja, kapasitansseja, kuorman suuruutta ja muuntajalle esitettyjä vaatimuksia.

Kytkentää saatetaan käyttää laboratoriotyönä. Tästä syystä kytkennän on oltava riittävän yksinkertainen tehdä, jotta tarvittavat mittaukset voidaan suorittaa laboratoriotunneille varatussa ajassa. Virhekytkentöjen välttämiseksi kytkennän on myös oltava yksiselitteinen. Lisäksi kytkennällä on voitava suorittaa kaikki esitetyt oikosulkutilanteet.

Muuntajan on pystyttävä kestämään jatkuva kolmivaiheinen oikosulku navoissaan ylikuumenematta tai muuten vahingoittumatta. Tämä tarkoittaa, että muuntajan on itsessään rajoitettava oikosulkuvirtaa. Muuntajan tulee kyetä myös syöttämään pientä kuormaa, joka esittää muuntajan takaisia johtimia verkossa. Havainnollisuuden tähden muuntajan tulee olla kytkentätyypiltään yleisimmin verkossa esiintyvä. Tämä tarkoittaa Dyn11-tyyppiä. Kytkennässä ei toivota tehtävän jännitetasojen redusointia. Tämän valmiiksi simuloitun redusoinnin tähden muuntajan muuntosuhteeksi määritellään 1:1, eli muuntajan ensiöjännite on yhtä suuri kuin toisiojännitekin.

Maksimioikosulkuvirraksi määrätään 5 A. Jotta kytkentä säilyisi pienitehoisena, pienennetään jännitettä. Sopiva jännitetaso on 40 V. Tämän ansiosta muuntaja pysyy myös pienjännitestandardi Safety Extra Low Voltage -määritelmän alaisena. Tämä kuitenkin edellyttää toisen muuntajan jännitteen alentamiseksi. Tämän muuntajan tulee kyetä syöttämään jokaisessa simuloitavassa tilanteessa oikosulkuun joutuvaa muuntajaa vahingoittumatta tai ylikuormittumatta itse.

Mikäli muuntajaan kytketään liian suuri kuorma, alenee muuntajan tarjoama jännite suuresti. Lisäksi suuri kuorma pienentää mitattava virtaa. Virran pienentyessä liian paljon, eivät mittarit ole enää tarkkoja. Toisaalta liian pieni

kuorma ei aikaansaa riittävää eroa muuntajan oman impedanssin  $Z_T$  suhteen, jolloin syntyy liian pieni muutos virran arvoon, joka jää mittarivirheen takia havaitsematta. Johtimia esittävien impedanssien on sovittava tähän haarukkaan. On muistettava myös nollajohtimen impedanssi. Nollajohdin on yleisesti sähköverkoissa poikkipinta-alaltaan puolet vaihejohtimen vastaavasta alasta. Tämän johdosta nollajohtimilla on kaksinkertainen impedanssi verrattuna vaihejohtimiin ja siten myös nollajohtoa mallintavan impedanssin arvo tulee suhteuttaa tämän mukaisesti.

Todellisilla johtimilla on myös kapasitanssia toisiinsa ja maahan nähden. Johdinkapasitanssit esiintyvät johtimien välillä, maakapasitanssit johtimien ja maan välillä. Nämä vaikuttavat virtoihin etenkin yksivaiheisessa oikosulussa. Siis myös kytkennässä tulee olla maa- ja johdinkapasitansseja mallintavat kondensaattorit. Tähti-kolmio -muunnoksella voidaan johdinkapasitanssit määrittää esiintyväksi maan ja johtimien välillä. Näin johdinkapasitanssit ovat rinnankytkettyjä maakapasitanssien kanssa ja siten voidaan summata yhdeksi maakapasitanssiksi. Tämän takia kytkennässä tulee esiintyä jokaisen kolmen johtimen ja nollan välille kytketyt kondensaattorit. Nämä kondensaattorit kytketään oikosulkuun kytkettävän muuntajan ensiöpuolen johtimien ja nollan välille. Koska maakapasitanssi on hyvin suuri suhteessa verkossa esiintyviin impedansseihin, tulee myös kytkennän kapasitanssien vastusarvojen olla suuria suhteessa kytkennässä esiintyviin impedansseihin.

Kytkennässä esiintyy sekä kapasitanssia, että induktanssia. Mikäli näiden arvoja ei mitoiteta sopiviksi toisiinsa nähden, saattaa kytkentä joutua resonanssiin. Resonanssi-ilmiö voi vahvistaa virtaa yli kytkennän mitoitusvirran ja siten aiheuttaa pahimmillaan kytkennän tuhoutumisen. Tämän johdosta tulee kapasitanssin ja induktanssin suhde toisiinsa mitoittaa siten, ettei verkon 50 Hz:n taajuus synnyttäisi resonanssia.

## 5 KOMPONENTIT

Kytkenän vaatimusten määrittelyn jälkeen tehtävänä oli hankkia sopivat komponentit. Seuraavissa alaluvuissa kuvataan eri komponenttien hankintaprosessi ja tekniset arvot.

### 5.1 Muuntajat

Hankalimmat komponentit työn toteuttamisen kannalta olivat muuntajat. Muuntajien erikoinen rakenne vaati toimittavalta yritykseltä tutkimusta ja resursseja. Koska kyseessä oli yksittäiskappaleiden tilaus, suurimmat muuntaja- ja kuristinvalmistajat eivät olleet kiinnostuneita yhteistyöstä. Tämän takia muuntajat hankittiin Trafomic Oy:ltä. Muuntajien sähköiset arvot on esitetty taulukossa 1. Muuntaja 1 on jännitteen alentamiseksi hankittu verkkoa simuloiva muuntaja. Muuntaja 2 on oikosulun kestävä erikoismuuntaja.

Taulukko 1. Muuntajien sähköiset arvot

	U1 / V	U2 / V	$\mu$	kytkentä
Muuntaja 1	400	40	1/10	Dyn11
Muuntaja 2	40	40	1/1	Dyn11

Oikosulkukestoisuudestaan huolimatta muuntaja 2 voi ylikuumeta. Tämän vuoksi muuntajaa ei tule pitää oikosulussa 5 minuuttia kauempaa. Muuntajan on myös annettava jäähtyä jännitteettömänä oikosulun jälkeen vähintään kaksinkertainen ajanjakso kuin oikosulun kesto. Lisäksi muuntajan 2 vaihevirratt eivät ole symmetriset. Tämä johtuu muuntajan oikosulkuvirtaa rajoittavasta epäsymmetrisestä rakenteesta. Toimittajayrityksen mukaan symmetrisellä rakenteella tehty muuntaja ei kestäisi napaoikosulkua kuumenematta liikaa. Tämä ei kuitenkaan vaikuta kytkennän havainnollisuuteen.

## 5.2 Induktanssit

Muuntajan lisäksi tuli kytkentää varten hankkia myös induktanssit. Hyvän asiakaspalvelun ja jo valmiiden tilauskanavien takia myös tarvittu induktanssit hankittiin Trafomic Oy:ltä. Induktanssit muodostuvat kahdesta kolmen käämin kokonaisuudesta. Molemmissa kokonaisuuksissa on kolme erillistä käämiä, joiden induktanssit ovat yhtä suuret. Käämit ovat erilliset, jotta näissä tapahtuvat magneettiset ilmiöt eivät häiritsisi toisien käämien ilmiöitä. Induktanssi 1 kuvastaa kytkennässä vaihejohdininduktanssia ja induktanssi 2 nollajohtimen induktanssia. Induktanssi 2 on, kuten todelliset nollajohtimetkin, impedanssiltaan vaihejohtimen impedanssia suurempi.

Taulukko 2. Induktanssien arvot

	Induktanssi / mH	Reaktanssi / $\Omega$	Un / V
Induktanssi 1	21,23	6,67	400
Induktanssi 2	31,83	10,00	400

## 5.3 Kytkennän kapasitanssit

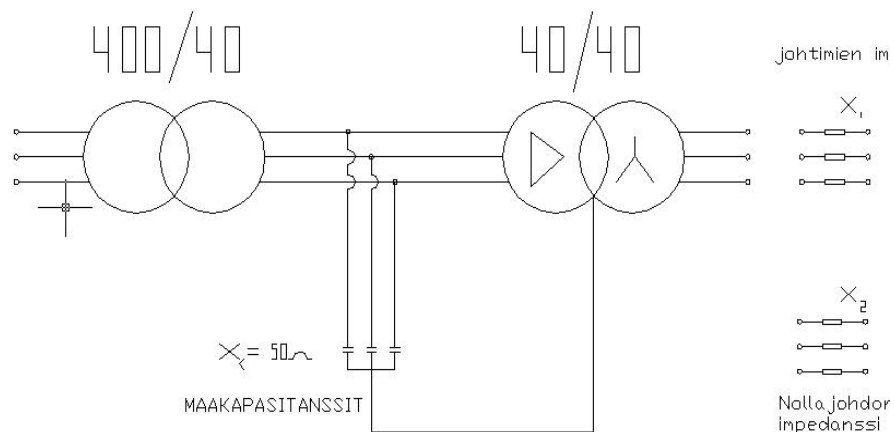
Kytkenän vaatimat kapasitanssit tilattiin Lohjan sähkö- ja automaatio Oy:ltä. Kapasitanssien arvoksi valittiin 50  $\Omega$ . Tämä impedanssi ei vielä kuormita muuntaja 1:stä liikaa, mutta on selkeästi valittuja johdinimpedansseja suurempi. Kuitenkin valmistuksen helpottamiseksi päädyttiin taulukossa 3 esitettyihin arvoihin. Kondensaattoreita on kolme kappaletta, jokainen erillisessä metallissa kotelossaan. Metallikotelot on varustettu maadoitusliittimillä.

Taulukko 3. kondensaattorien arvot

Reaktanssi / $\Omega$	Kapasitanssi / $\mu\text{F}$	Un / V
49	64	400

## 6 $X_T$ LASKENTAA VARTEN SUORITETUT MITTAUKSET

Sopivien sijaiskytkentää vastaavien impedanssien hankkimiseksi tuli mitata kaikki mahdolliset muuntajalla simuloitavat oikosulkutilanteet. Seuraavissa alaluvuissa kuvataan mittaukset ja ilmoitetaan näiden tulokset. Kaikissa kytkennöissä on aluksi kytketty jännitteenalennusmuuntajan jälkeen oikosulun kestävä muuntaja, jonka yläjännitepuolen ja nollapisteen rinnalle on kytketty maakapasitanssit. Jokaisesta tilanteesta tehtiin johtimellista oikosulkua ja napaoikosulkua mallintava kytkentä.



Kuva 14. Kytkenän yleismalli

### 6.1 Kolmivaiheisten oikosulkujen mittaukset

Kolmivaiheisissa johtimellisissa oikosuluissa kytkettiin muuntaja 2:n alajännitepuolelle tähden kytketty induktanssipaketti 1. Vastaavasti kolmivaiheisessa napaoikosulussa kytkettiin muuntajan 1 alajännitepuolen kaikki navat tähden. Tuloksista (taulukko 4) voidaan havaita voimakas epäsymmetria vaihevirtojen välillä muuntajan virtaa rajoittavan rakenteen takia.

Taulukko 4. Kolmivaiheisten oikosulkujen virta-arvot

	Ir / A	Is / A	It / A
Induktansseilla	2,052	1,803	2,021
napaoikosulkuna	5,565	3,978	5,184

## 6.2 Kaksivaiheisten oikosulkujen mittaukset

Kaksivaiheisten oikosulkujen mittauksissa kytkettiin alennusmuuntajan alajännitepuolelle induktanssipaketti 1:stä kaksi induktanssia S- ja T-vaiheisiin. R-vaihe jätettiin kytkemättä, eli tyhjäkäynnille. S- ja T-vaiheiden induktanssit tämän kytkettiin yhteen, oikosulun muodostamiseksi. Vastaavasti napaoikosulkua mallinnettaessa R-vaihe jätettiin tyhjäkäynnille. Vaiheet S ja T oikosuljettiin keskenään. Tulokset esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. kaksivaiheisten oikosulkujen virta-arvot

	Ir / A	Is / A	It / A
Induktansseilla	0,00	1,541	1,541
napaoikosulkuna	0,00	3,30	3,30

## 6.3 Yksivaiheisten oikosulkujen mittaukset

Yksivaiheisten johtimellisten oikosulun mittauksissa induktanssipaketti 1:stä kytkettiin T-vaiheeseen yksi induktanssi jättäen muut vaiheet tyhjäkäynnille. Kyseisen induktanssin perään kytkettiin yksi induktanssi induktanssipaketti 2:sta mallintamaan nollajohtoa. Tämän induktanssin loppupää kytkettiin oikosulun kestävän muuntajan tähtipisteeseen. Napaoikosulkua mallinnettaessa kytkettiin alennusmuuntajan T-vaihe suoraan omaan tähtipisteeseensä

Tuloksista (taulukko 6) voidaan huomata yksivaiheisen napaoikosulun virran olevan kolmivaiheista napaoikosulkuvirtaa suurempi. Tulos ei ole teorian mukainen, eikä vastaa todellisen jakelumuuntajan toimintaa vastaavassa

tilanteessa. Tämä johtunee muuntajan rakenteesta ja mahdollisesta maaka-  
pasitanssien kautta kulkevasta päämuuntajan syöttämästä virrasta.

Taulukko 6. Yksivaiheisten oikosulkujen virta-arvot

	Ir / A	Is / A	It / A
Induktansseilla	0,00	0,00	1,031
napaoikosulkuna	0,00	0,00	6,259

## 7 MUUNTAJAN SIIJASKYTKENNÄN LASKEMINEN

Muuntajalla ei ole suoraa kilpiarvoa, josta laskea muuntajan sisäistä impe-  
danssia vastaava arvo sijaiskytkentää varten. Tämän takia lasketaan tämä ai-  
emmin suoritetuista mittaustuloksista. Lisäksi muuntajan epäsymmetrisen ra-  
kenteen takia on käytettävä saatavista laskelmista parhaiten kaikkiin tapauk-  
siin sopivaa arvoa. Seuraavissa alaluvuissa lasketaan kaikista oikosulkutapa-  
uksista kyseistä tapausta parhaiten vastaava impedanssi ja näistä parhaiten  
kaikkiin tapauksiin sopiva impedanssin arvo.

### 7.1 Sijaiskytkennän oikosulkuarvojen laskeminen

Sijaiskytkennän arvojen laskemiseksi on saaduista oikosulun aikaisista vai-  
hevirroista laskettava keskiarvo. Tätä keskiarvoa käytetään sijaiskytkennän  
oikosulkuvirtana. Saadusta oikosulkuvirrasta lasketaan kyseisen vikatilanteen  
virtaa ja jännitettä vastaava impedanssi. Jännitteeksi määrätään  $U = 40 \text{ V}$ .  
Laskutapana käytetään symmetristen komponenttien sijaan yleistä oikosulku-  
laskentaa.

### 7.1.1 Kolmivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Lasketaan johtimellisessä tapauksesta kolmivaiheisen oikosulun mukainen muuntajan sisäinen impedanssi.

*Virtojen keskiarvoksi  $I_F$  saadaan*

$$I_F = 1/3 * (2,052 + 1,803 + 2,021) A = 1,959 A$$

Saatua virran arvoa käytetään sijaiskytkennässä (ks. Kuva 10). Kytkennässä ainoa tuntematon on muuntajaa mallintava impedanssi  $X_T$ . Kaavasta 9 voidaan muokata tuntemattoman selvittämiseksi kaava 15.

$$X_T = \frac{E_{TH}}{I_K} - X_j = \frac{40/\sqrt{3}}{1,959} \Omega - 6,67 \Omega = 5,12 \Omega \quad (15)$$

### 7.1.2 Kolmivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Kolmivaiheisessa napaoikosulussa lasketaan muuntajan arvo samoin, kuin johtimellisessäkin tapauksessa (ks. 7.1.1.). Erona on johdinimpedanssin puuttuminen.

*Käytetään kaavaa 15:*

$$\begin{aligned} X_T &= \frac{E_{TH}}{I_K} - X_j = \frac{40/\sqrt{3}}{1/3 * (2,565 + 3,978 + 5,184)} \Omega - 0 \Omega \\ &= 5,907 \Omega \end{aligned}$$



### 7.1.3 Kaksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Kaksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän tapauksessa vikavirtojen keskiarvojen laskeminen ei ole tarpeellista, sillä vaihevirratt ovat yhtä suuret. Kaksivaiheisessa oikosulussa vaikuttaa induktanssien yli vaihejännitteen sijaan pääjännite ja induktanssit otetaan huomioon kaksinkertaisina. /4./

*Käytetään kaavaa 15 sisäisen impedanssin selvittämiseen:*

$$X_T = \frac{U}{2 * I_F} - X_J = \frac{40}{2 * 1,541} \Omega - 6,67 \Omega = 6,308 \Omega$$

### 7.1.4 Kaksivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Kaksivaiheisessa napaoikosulussa, kuten johtimellisessakaan tapauksessa, ei ole tarpeellista laskea virroille keskiarvoja. (Ks. 7.1.3.)

*Käytetään kaavaa 15 sisäisen impedanssin selvittämiseen:*

$$X_T = \frac{U}{2 * I_F} - X_J = \frac{40}{2 * 3,30} \Omega - 0 \Omega = 6,06 \Omega$$

### 7.1.5 Yksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Lasketaan yksivaiheinen johtimellinen oikosulku. Johdinimpedanssin ja muuntajaimpedanssin lisäksi vielä otettava huomioon nollajohdinimpedanssi. Koska on vain yksi virta, keskiarvoa ei tarvitse laskea.

*Käytetään kaavaa 15 sisäisen impedanssin selvittämiseen:*

$$\begin{aligned}
 X_T &= \frac{E_{TH}}{I_F} - X_J - X_n = \frac{40/\sqrt{3}}{1,031} \Omega - (6,67 + 10) \Omega \\
 &= 5,729 \Omega
 \end{aligned}$$

### 7.1.6 Yksivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkennän laskeminen

Lasketaan yksivaiheinen napaoikosulun arvojen mukainen muuntajan sisäinen impedanssi. Johtimettomassa yksivaiheisessa oikosulussa ei tarvitse laskea virtojen keskiarvoa. (Ks. 7.1.5.)

Käytetään kaavaa 9 sisäisen impedanssin selvittämiseen:

$$\begin{aligned}
 X_T &= \frac{E_{TH}}{I_F} - X_J - X_n = \frac{40/\sqrt{3}}{6,259} \Omega - 0 \Omega \\
 &= 3,689 \Omega
 \end{aligned}$$

## 7.2 Sisäisen impedanssin laskeminen ja arvon tarkastelu

Koska kaikki aiemmin lasketut muuntajan sisäisen impedanssin arvot poikkeavat toisistaan huomattavasti, on näistäkin laskettava mahdollisimman hyvin kaikkiin tapauksiin sopiva impedanssin arvo. Tämä lasketaan keskiarvolla.

$$\begin{aligned}
 X_T' &= \frac{\Sigma X_T}{n_{XT}} = \frac{5,12 + 5,907 + 6,308 + 6,06 + 5,729 + 3,689}{6} \Omega \\
 &= 5,469 \Omega
 \end{aligned}$$

Missä  $X_T'$  on impedanssien keskiarvo,  $\Sigma X_T$  impedanssien summa ja  $n_{XT}$  keskiarvojen lukumäärä.

Vaikka arvo on saatu mitatuista virran arvoista, tulee tarkastella tämän

soveltuvuutta sijaiskytkennässä. Lasketuissa arvoissa  $I_K'$  tarkoittaa laskennallista oikosulkuvirran arvoa,  $I_K$  mitattua virran arvoa,  $\Delta I_K$  eroa arvojen välillä ja  $\Delta$  arvojen suhteellista eroa.

### 7.2.1 $X_T'$ kolmivaiheisissa sijaiskytkennöissä

Tarkastellaan lasketun  $X_T'$  arvon (ks. 7.2.) soveltuvuus kolmivaiheisiin sijaiskytkentöihin. Tämä tehdään laskemalla korvaten aiemmin tuntematon muuntajan sisäinen impedanssi lasketulla  $X_T'$  arvolla.

*Lasketaan johtimellisen oikosulun virran arvo käyttäen kaavaa 9:*

$$I_K' = \frac{E_{TH}}{X_J + X_T'} = \frac{40/\sqrt{3}}{6,67 + 5,469} \text{ A} = 1,902 \text{ A}$$

*Eroa mitattuun arvoon on*

$$\Delta I_K = |I_K - I_K'| = |1,959 - 1,902| \text{ A} = 0,057 \text{ A}$$

$$\Delta = \frac{0,057}{1,959} \text{ A} * 100 \% = 2,91 \%$$

*Kolmivaiheisessa napaoikosulussa vastaava arvo on*

$$I_K' = \frac{E_{TH}}{X_T'} = \frac{40/\sqrt{3}}{5,469} \text{ A} = 4,228 \text{ A}$$

*Eroa mitattuun arvoon on*

$$\Delta I_K = |I_K - \dot{I}_K| = |4,909 - 4,228| A = 0,681 A$$

$$\Delta = \frac{0,553}{4,909} A * 100 \% = 13,87 \%$$

Näin suuri arvon eroavuus todellisuudesta selittyy muuntajan huomattavan epäsymmetrisellä rakenteella ja keskiarvojen käytöllä.

### 7.2.2 $X_T'$ kaksivaiheisissa sijaiskytkennöissä

Selvitetään lasketun arvon  $X_T'$  soveltuvuus kaksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkentöihin.

Lasketaan johtimellisen kaksivaiheisen oikosulun virran arvo käyttäen kaavaa 9:

$$\underline{I}_1' = \frac{E_{TH}}{\Sigma X} = \frac{40/\sqrt{3}}{2 * (6,67 + 5,469)i} A = 0,951 \angle -90^\circ A$$

$$\underline{I}_K = (1 \angle 120^\circ * 0,951 \angle -90^\circ + 1 \angle 240^\circ * 0,951 \angle 90^\circ) A = 1,647 A$$

Eroa mitattuun arvoon on

$$\Delta I_K = |I_K - \dot{I}_K| = |1,541 - 1,647| A = 0,106 A$$

$$\Delta = \frac{0,13}{1,541} A * 100 \% = 8,44 \%$$

Kaksivaiheisen napaoikosulun virran arvo lasketaan käyttäen kaavaa 9:

$$\underline{I}_1' = \frac{E_{TH}}{\Sigma X} = \frac{40/\sqrt{3}}{2 * 5,469i} A = 2,111 \angle -90^\circ A$$

$$\underline{I}_K = (1 \angle 120^\circ * 2,111 \angle -90^\circ + 1 \angle 240^\circ * 2,111 \angle 90^\circ) A = 3,656 A$$

Eroa mitattuun arvoon on

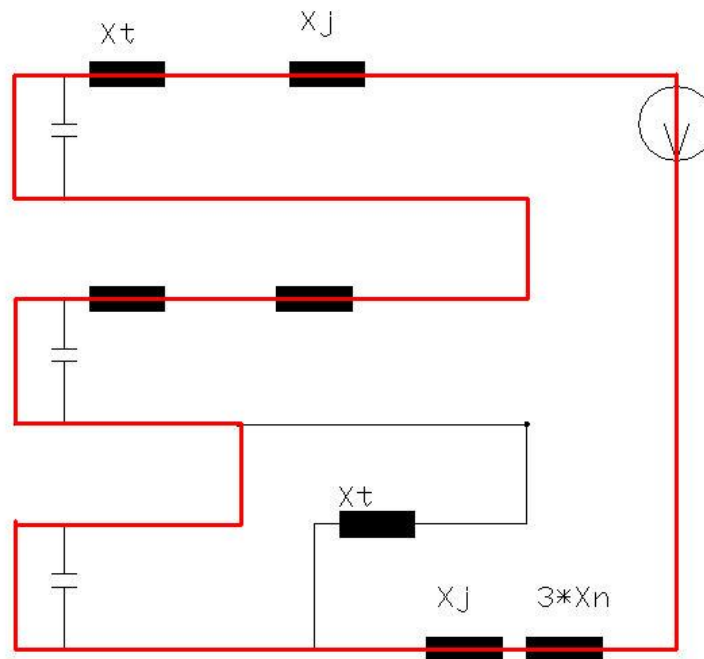
$$\Delta I_K = |I_K - I_K'| = |3,30 - 3,656| A = 0,356 A$$

$$\Delta = \frac{0,356}{3,30} A * 100 \% = 10,8 \%$$

Tämän arvon suurempi poikkeama, aiemmin laskettujen kolmivaiheisten oikosulkujen poikkeamien tavoin (ks. 7.2.1), johtuu muuntajan S-vaiheen kaikkein pienimmästä induktanssista. Tämä voidaan halutessa kompensoida käyttämällä kaksivaiheisen oikosulun mallintamiseen R- ja T-vaiheiden välistä oikosulkua perinteisten S-T -oikosulun sijaan.

### 7.2.3 $X_T'$ yksivaiheisissa sijaiskytkennöissä

Tarkastellaan arvon  $X_T'$  käyttäytymistä yksivaiheisissa oikosuluissa. Koska kyseessä on maakapasitanssillinen vikatapaus, aikaisemmissa luvuissa oleva sijaiskytkentäteoria ei sovellu suoraan. Koska maakapasitanssit ovat kaikki yhteydessä toisiinsa, kulkee nollaverkossa virta poikkeavalla tavalla. Tämä johtaa nollaverkon ohitukseen muuntajan osalta (kuva 15). Vikavirta kuitenkin kulkee johtimia mallintavien induktanssien kautta. Vikavirran kulkureitti korostettu punaisella.



Kuva 15. Virran kulku sijaistykennässä

Lasketaan yksivaiheisen johtimellisen oikosulun virta-arvo kaavalla 9:

$$I_K' = 3 * \frac{E_{TH}}{X_J + X_{Jn} + X_T} = \frac{40/\sqrt{3}}{3 * 6,67 + 3 * 10 + 2 * 5,469} \text{ A} = 3 * 0,379 \text{ A}$$

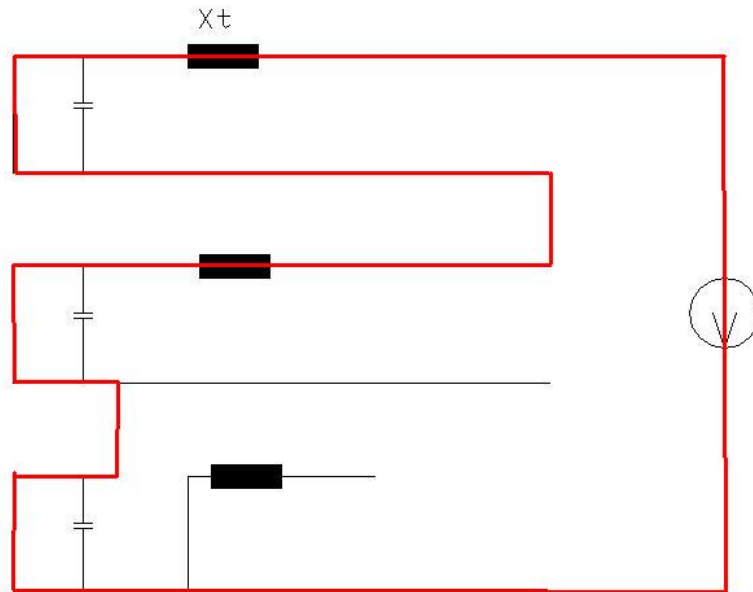
$$I_K' = 1,138 \text{ A}$$

Eroa mitattuun arvoon on

$$\Delta I_K = |I_K - I_K'| = |1,031 - 1,137| \text{ A} = 0,105 \text{ A}$$

$$\Delta = \frac{0,105}{1,031} \text{ A} * 100 \% = 10,3 \%$$

Yksivaiheisessa napaoikosulussa oikosulkuvirta käyttäytyy myös maaka-  
pasitanssien takia aikaisemmasta teoriasta eroavasti (kuva 16).



Kuva 16. Virran kulku yksivaiheisessa napaoikosulussa

*Lasketaan yksivaiheisen napaoikosulun virta kaavalla 9:*

$$I_{K'} = 3 * \frac{E_{TH}}{X_T'} = 3 * \frac{40/\sqrt{3}}{2 * 5,469} A = 6,334 A$$

*Eroa todelliseen arvoon on*

$$\Delta I_K = |I_K - I_{K'}| = |6,259 - 6,334| A = 0,075 A$$

$$\Delta = \frac{0,075}{6,259} A * 100 \% = 1,12 \%$$

Voidaan todeta kaikkien arvojen olevan riittävän lähellä mitattuja arvoja, toimivan sijaiskytkennän tekemiseen.

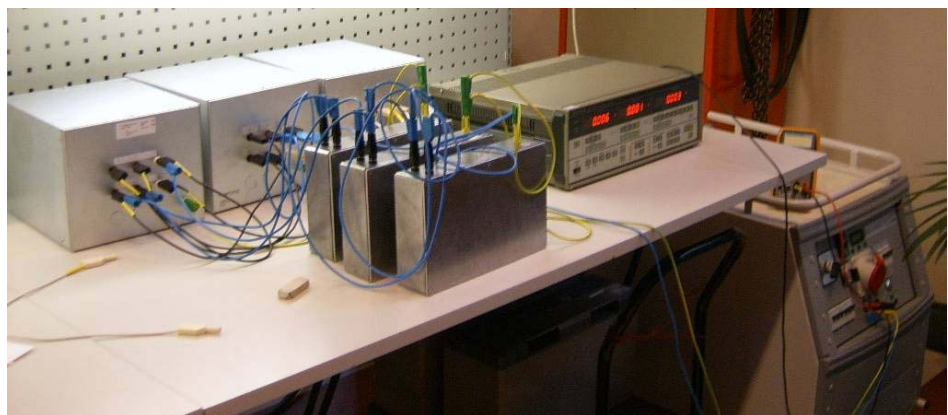
## 8 SIJAISKYTKENTÄ

Sijaiskytkentää varten laskettujen arvojen jälkeen tilattiin sopiva induktanssi-kokonaisuus Trafomic Oy:ltä (kuva 17). Kytkennällä tehtiin kaikki sijaiskytkennän edellyttämät mittaukset. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään mittauksia ja näiden tuloksia.



Kuva 17. Muuntajaa mallintava induktanssipaketti

Kaikkia oikosulkuja mallinnettaessa käytettiin säädettävää jännitelähdettä jännitetasolla  $U_V = U = 23 \text{ V}$

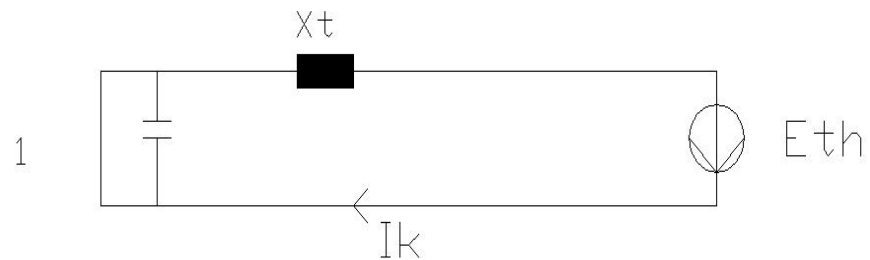


Kuva 18. Johtimellisen maasulun mittaus

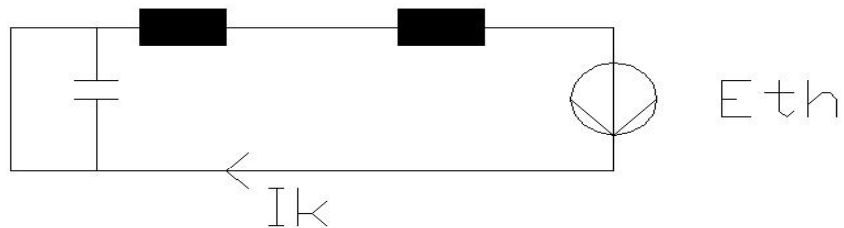


## 8.1 Kolmivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät

Kolmivaiheisia oikosulkuja mallinnettaessa käytettiin teorian mukaista kytkentää (kuva 19; kuva 20) lisäten kapasitanssit induktanssien rinnalle.



Kuva 19. 3-vaiheisen napaoikosulun sijaiskytkentä



Kuva 20. 3-vaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkentä

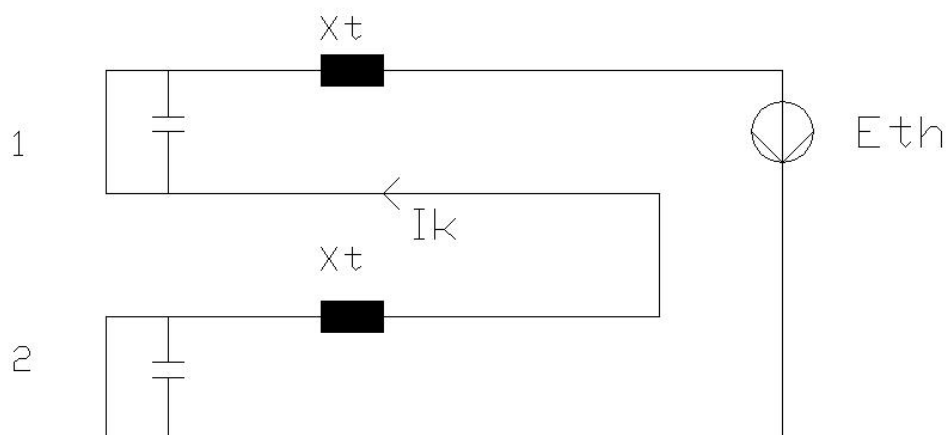
Koska kolmivaiheisen sijaiskytkennän virta-arvo on suoraan sama, kuin vastaava oikeankin oikosulun arvo, ei laskennallista muuttamista normaaliverkon tasolle tarvitse tehdä.

Taulukko 7. 3-vaiheisten sijaiskytkentöjen mittaustulokset

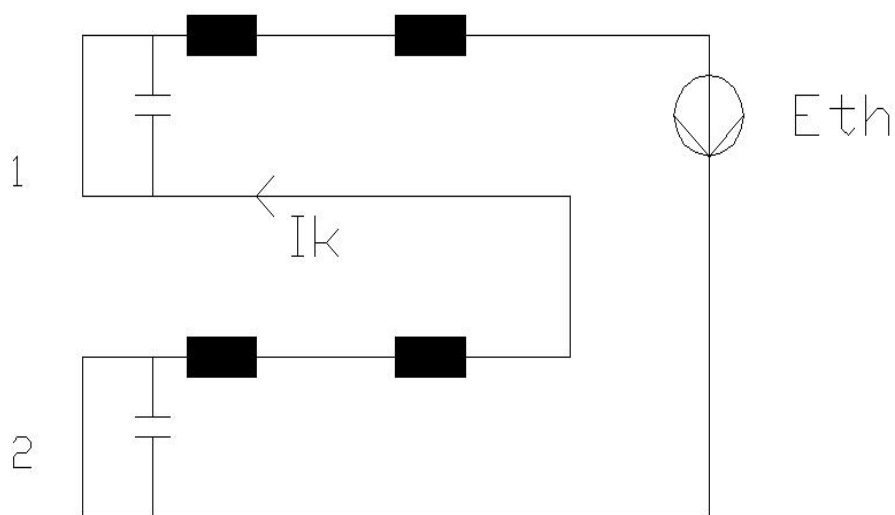
	$X_T$	$X_T + X_J$
I / A	4,43	1,96

## 8.2 Kaksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät

Kaksivaiheisten oikosulkujen mallinnuksessa käytettiin puhtaan teorian mukaisia sijaiskytkentöjä. Kuten kolmivaiheistenkin oikosulkujen sijaiskytkennässä (ks. 8.1.) kytkettiin induktanssien rinnalle kapasitanssit (kuva 21; kuva 22).



Kuva 21. 2-vaiheisen napaoikosulun sijaiskytkentä



Kuva 22. 2-vaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkentä

Sijaiskytkennän tulokset (taulukko 8) on kuitenkin muutettava laskennallisesti symmetristen komponenttien muodosta normaaliverkon muotoon. Ilman tätä on vertailua tulosten välillä mahdoton tehdä.

*Muutetaan mittaustulokset R-S-T -verkkomuotoiseksi laskemalla napaoikosulun virta kaavalla 12:*

$$I_K = (1\angle 240^\circ * 2,095\angle 90^\circ + 1\angle 120^\circ * 2,095\angle -90^\circ) A = 3,63 A$$

*Lasketaan johtimellisen oikosulun virta kaavalla 12:*

$$I_K = (1\angle 240^\circ * 0,972\angle 90^\circ + 1\angle 120^\circ * 0,972\angle -90^\circ) A = 1,68 A$$

Muunnosten jälkeen havaitaan myös kaksivaiheisten oikosulkujen virta-arvojen olevan hyvin lähellä laskettuja teoreettisia arvoja.

Taulukko 8. 2-vaiheisen sijaiskytkentöjen mittaustulokset

	$X_T$	$X_T + X_J$
I / A	2,095	0,972

### 8.3 Yksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennät

Yksivaiheisten oikosulkujen sijaiskytkennöissä poikettiin teoriasta, kuten luvussa 7.2.3. selostettiin. Sijaiskytkentöjen (kuva 23; kuva 24) tulokset (taulukko 9) täsmäävät mitoituksen kanssa.

Taulukko 9. 1-vaiheisten sijaiskytkentöjen mittaustulokset

	$X_T$	$X_T + X_J$
I / A	2,093	0,382

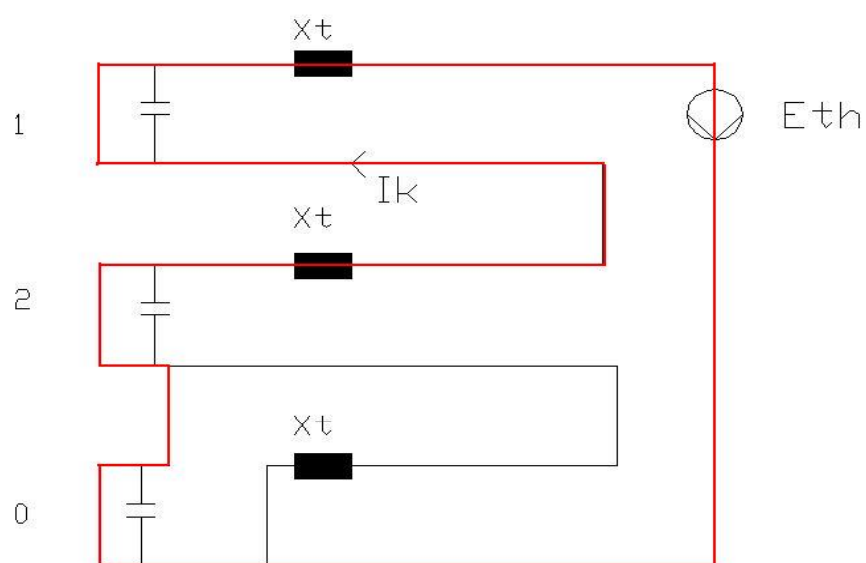
Nämä tulokset on muutettava symmetristen komponenttien muodosta normaalin verkon muotoisiksi, ennen vertailua.

Lasketaan napaoikosulun virta kaavalla 12:

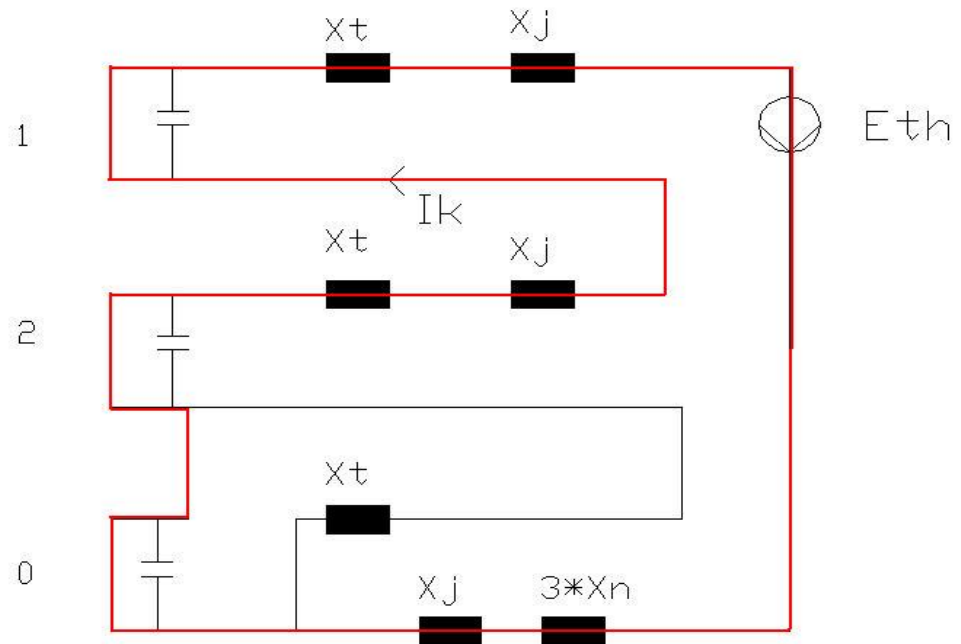
$$I_R = I_K = 3 * I_F = 3 * 2,093 \text{ A} = 6,279 \text{ A}$$

Lasketaan johtimellisen oikosulun virta kaavalla 12:

$$I_R = I_K = 3 * I_F = 3 * 0,382 \text{ A} = 1,146 \text{ A}$$



Kuva 23. Yksivaiheisen napaoikosulun sijaiskytkentä



Kuva 24. Yksivaiheisen johtimellisen oikosulun sijaiskytkentä

## 9 EROAVAISUUDET ARVOJEN VÄLILLÄ

Sijaiskytkennän ja alkuperäisten mittaustulosten välillä on eroavaisuuksia. Tämän takia tarkastellaan mitoituksen onnistuneisuutta laskemalla arvojen väliset erot. Arvot lasketaan havainnollisuuden takia absoluuttisina ja suhteellisina arvoina.

Erot lasketaan sijaiskytkennästä saatujen arvojen ja alkuperäisten mittaustulosten välillä. Arvo  $I$  tarkoittaa alkuperäistä arvoa,  $I'$  sijaiskytkennän arvoa,  $\Delta I$  eroa arvojen välillä ja  $\Delta$  suhteellista eroa. Arvot ilmoitettu ampeereina.

### 9.1 Kolmivaiheiset oikosulut

Lasketaan kolmivaiheisten oikosulkujen mitattujen arvojen erot sijaiskytkennän ja alkuperäisten mittaustulosten välillä. Käytetään kolmivaiheisen oikosulun virta-arvojen laskennassa mittauksista saatujen tulosten keskiarvoa.

*Lasketaan kolmivaiheisen napaoikosulun eroavaisuus*

$$\Delta I = |I - I'| = |4,909 - 4,43| A = 0,479 A$$

$$\Delta = \frac{0,479}{4,909} A * 100 \% = 9,76 \%$$

*Lasketaan kolmivaiheisen johtimellisen oikosulun eroavaisuudet*

$$\Delta I = |I - I'| = |1,959 - 1,96| A = 0,001 A$$

$$\Delta = \frac{0,001}{1,959} A * 100 \% = 0,02 \%$$

## 9.2 Kaksivaiheiset oikosulut

Lasketaan kaksivaiheisten oikosulkujen arvojen eroavaisuus mittauskytkenän ja todellisten mittaustulosten välillä. Mittaustulokset sijaiskytkennästä on muutettu R-S-T -verkkoa vastaavaan muotoon.

*Kaksivaiheisen napaoikosulun eroavaisuus*

$$\Delta I = |I - I'| = |3,30 - 3,63| A = 0,35 A$$

$$\Delta = \frac{0,35}{3,30} A * 100 \% = 10,6 \%$$

*Kaksivaiheisen johtimellisten oikosulun eroavaisuus*

$$\Delta I = |I - I'| = |1,541 - 1,68| A = 0,139 A$$

$$\Delta = \frac{0,139}{1,541} A * 100 \% = 9,02 \%$$

### 9.3 Yksivaiheiset oikosulut

Lasketaan yksivaiheisten oikosulkujen erot varsinaisten ja sijaiskytkennän mittaustulosten välillä. Sijaiskytkennän tulokset on palautettu symmetristen komponenttien muodosta tavallisen kolmivaiheisen verkon muotoon.

*Yksivaiheisen napaoikosulun eroavaisuus*

$$\Delta I = |I - I'| = |6,259 - 6,279| A = 0,02 A$$

$$\Delta = \frac{0,02}{6,259} A * 100 \% = 0,32 \%$$

*Yksivaiheisen johtimellisen oikosulun eroavaisuus*

$$\Delta I = |I - I'| = |1,031 - 1,146| A = 0,115 A$$

$$\Delta = \frac{0,115}{1,031} A * 100 \% = 11,15 \%$$

## 10 LOPPUPÄÄTELMÄT

Loppupäätelmänä voidaan todeta sijaiskytkennän olevan riittävän onnistunut ja tarkka käytettäväksi laboratoriotyönä symmetristen komponenttien havainnollistamiseksi. Tulokset sijaiskytkentöjen ja todellisten kytkentöjen vastaavuudesta ovat hyväksyttävissä rajoissa. Suurin poikkeama sijaiskytkennässä todellisiin arvoihin verrattuna (11,15 %) saatiin yksivaiheista johtimellista oikosulkua mallinnettaessa. Ottaen huomioon komponenttien virhetoleranssit, laskennassa käytetty keskiarvojen vaikutus ja epäsuhta muuntajan vaihekäämien välillä, tämä on erinomainen tulos.

Työssä havaitusta muuntajan epäsymmetrisestä rakenteesta voidaan lisäksi teettää toinenkin opinnäytetyö, joka liittyy epäsymmetrisen lähteen mallintamiseen symmetrisillä komponenteilla.

**LÄHTEET**

- /1/ Elovaara, Jarmo – Laiho, Yrjö, *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Otatieto. 1998.
- /2/ Halonen, Mikko. *Sähkönjakeluverkon keskeytykset, keskeytystilastointi ja toimitustakuut*. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- /3/ Huotari, Kari – Partanen, Jarmo. *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen*. Luentomoniste. ISBN 951-672-285-7.
- /4/ Kupari, Sampsa. *Luentomoniste*. Suojausjärjestelmät -kurssi 2003.
- /5/ <http://www.helsinginenergia.fi/media/energiasanasto.html>. Luettu 21.12.2006
- /6/ Voipio, Erkki. *Virtapiirit ja verkot*. Otatieto. 1976.
- /7/ Sähkönsiirtojärjestelmät, Syksy 2005 [verkkodokumentti, viitattu 21.12.2006]. Saatavissa [http://powersystems.tkk.fi/opinnot/S-18.113/sahkojarj\\_3.ppt](http://powersystems.tkk.fi/opinnot/S-18.113/sahkojarj_3.ppt)