

**Mikko Manninen**

**OIKOSULKUVIRRAN LASKENTA KAIVOKSEN  
SÄHKÖVERKOSSA**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus  
Kesäkuu 2019**

## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Kesäkuu 2019	<b>Tekijä</b> Mikko Manninen
<b>Koulutus</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		
<b>Työn nimi</b> OIKOSULKUVIRRAN LASKENTA KAIVOKSEN SÄKÖVERKOSSA.		
<b>Työn ohjaaja</b> Jari Halme	<b>Sivumäärä</b> 26 + 4 Liitettä	
<b>Työelämäohjaaja</b>		
<p>Tässä opinnäytetyössä on suoritettu oikosulkuvirtalaskenta kaivoksen sähköverkon keskijänniteosalle. Työssä keskityttiin kaivoksen maanalaiseen sähköverkkoon, koska koko tehdasalueen verkko on liian suuri kokonaisuus. Laskennassa käytettiin apuna ABB DOC -laskentaohjelmaa ja tarkasteltiin siitä saatuja tuloksia.</p> <p>Työn teoriaosassa tarkastellaan oikosulkuvirtojen laskennan menetelmiä. Teoriaosuuden tarkoitus on selventää oikosulkuvirran laskentaa ja auttaa ymmärtämään laskettuja tuloksia. ABB DOC -ohjelma esitellään työssä lyhyesti, mutta sen käyttö vaatii kuitenkin perehtymistä itse ohjelmaan syvemmin.</p> <p>Työn lopussa esitellään tulokset ja vertaillaan niitä valmistajan ilmoittamiin arvoihin. Tuloksista tehtiin päätelmiä ja kehitysideoita.</p>		
<b>Asiasanat</b> ABB DOC, jakeluverkko, kaivos, oikosulkuvirta.		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> June 2019	<b>Author</b> Mikko Manninen
<b>Degree programme</b> Electrical Engineering and Automation		
<b>Name of thesis</b> Short-circuit calculation in a mine electrical network		
<b>Instructor</b> Jari Halme	<b>Pages</b> 26 + 4 Appendices	
<b>Supervisor</b>		
<p>This thesis examines short-circuit currents in an underground mining medium voltage network. The surface industrial electric network was not examined in this thesis, because the subject would be too wide. ABB DOC program is used to model the network and help in calculations.</p> <p>The theoretical part of this thesis examines methods for short-circuit current calculations. The theoretical part helps to understand calculations of short-circuit currents and calculation results. ABB DOC program is presented briefly, but using the program requires a deeper orientation.</p> <p>At the end of this thesis, results are presented and compared to the values declared by the manufacturers. Conclusions and development ideas are made from the results of this thesis.</p>		

<p><b>Key words</b> ABB DOC, distribution network, mine, short-circuit.</p>
---

## KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

A	Ampeeri, sähkövirran yksikkö
AHXAMK-W	Alumiinijohtiminen hohtosuojalla varustettu kaapeli keskijännitekaapeli
AMCMK	Sektorimuotoisilla alumiinijohtimilla varustettu keskijännitekaapeli
c	IEC 60909 -standardin mukainen jännitekerroin
I	Sähkövirran symboli
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardisointi järjestö
$I_k$	Oikosulkuvirran symboli
$i_p$	Sysäysoikosulkuvirran symboli
$I_{th}$	Termisen oikosulkuvirran symboli
k	Sysäyskerroin
m	Tasavirtatekijä
n	Vaihtovirtatekijä
R	Resistanssin symboli
$T_k$	Vian kestoaika
U	Jännitteen symboli
V	Voltti, jännitteen yksikkö
Z	Impedanssin symboli
X	Reaktanssin symboli
$\Omega$	Ohmi, resistanssin ja impedanssin yksikkö

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 PYHÄSALMI MINE OY .....</b>	<b>2</b>
<b>3 OIKOSULKUTILANTEET .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Kolmivaiheinen oikosulku .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Kaksivaiheinen oikosulku.....</b>	<b>5</b>
<b>3.3 Yksivaiheinen oikosulku .....</b>	<b>6</b>
<b>3.4 Sysäysoikosulkuvirta.....</b>	<b>7</b>
<b>3.5 Terminen oikosulkuvirta .....</b>	<b>8</b>
<b>4 THEVENIN MENETELMÄ.....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 Oikosulkuimpedanssit.....</b>	<b>10</b>
<b>4.2 Muuta huomioitavaa .....</b>	<b>12</b>
<b>5 LÄHTÖTIETOJEN KERÄÄMINEN.....</b>	<b>13</b>
<b>5.1 Kaapelit keskijänniteverkossa .....</b>	<b>13</b>
<b>5.2 Jakeluverkon muuntajat .....</b>	<b>14</b>
<b>5.3 Jakeluverkon kojeistot.....</b>	<b>15</b>
<b>5.4 Käsin lasketut tiedot .....</b>	<b>16</b>
<b>6 ABB DOC .....</b>	<b>19</b>
<b>6.1 Projektin luonti.....</b>	<b>19</b>
<b>6.2 Verkon mallintaminen .....</b>	<b>20</b>
<b>7 TULOKSET.....</b>	<b>23</b>
<b>8 YHTEENVETO .....</b>	<b>25</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>26</b>
<b>LIITTEET</b>	
<b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Sysäyskertoimen $\kappa$ riippuvuus oikosulkuvirtapiirin resistanssin suhteesta reaktanssiin .....	7
KUVIO 2. Tasavirtatekijän m riippuvuus sysäyskertoimesta oikosulun kestoaikaan .....	9
KUVIO 3. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta .....	9
KUVIO 4. Malliverkosta muodostettu Thevenin sijaiskytkentä.....	10
KUVIO 5. Sijaiskytkentä .....	17
<b>KUVAT</b>	
KUVA 1. Rekan valmistama kaapeli AMCMK 3x300+25 3,6/6 kV .....	13
KUVA 2. Rekan valmistama kaapeli AHXAMK-W 12/20 kV .....	14
KUVA 3. Tyypillinen jakelumuuntamo.....	15
KUVA 4. SF6 eristeinen kojeisto .....	16
KUVA 5. Verkon syötön määrittely .....	20

KUVA 6. Alkutilanne .....	21
KUVA 7. Jakelukaavio ABB DOC -ohjelmasta .....	22

**TAULUKOT**

TAULUKKO 1. IEC 60909 –standardin mukainen jännitekerroin c .....	5
TAULUKKO 2. ABB DOC -ohjelmasta saadut oikosulkuvirran arvot .....	23
TAULUKKO 3 Arvojen vertailu .....	24

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Pyhäsalmi Mine Oy:n tehdaspalvelun sähkökunnossapito. Työssä oli tarkoitus päivittää maanalaisen 6 kV:n keskijänniteverkon piirustuksia ja oikosulkuvirtatietoa. Työn tuloksia voidaan käyttää myöhemmin verkon kunnossapidon ja muutoksien suunnitteluun. Työ on yritetty tiivistää helposti ymmärrettäväksi kokonaisuudeksi, jotta kerättyjä tietoja olisi helppo hyödyntää myöhemmin.

Pyhäsalmen kaivoksella on käytössä 6 kV:n keskijänniteverkko, jota syötetään 110 kV:n siirtoverkosta. Varavoiman käyttö on myös mahdollista 20 kV:n keskijänniteverkosta, kun erotaan 110 kV:n suurjänniteverkosta. Kaivoksen sähkönjakeluverkko on rakennettu 1960-luvun alussa, ja verkkoa on myöhemmin päivitetty vastaamaan kasvavaa tarvetta. Suurimmat muutokset on tehty vuosituhannen vaihteessa uuden malmion löytymisen yhteydessä. Verkon rakenne maan alla on keskeisiltä osin rengas, mutta rengasta käytetään avoimena. Muilta osin verkko on säteittäinen.

Maanalaisen keskijänniteverkon oikosulkuvirtojen tarkastelu oli ajankohtaista, koska verkkoon on lisätty muuntajia ja silmukan viallinen kojeisto on korvattu uudella. Viimeisimmät tiedossa olevat laskelmat on tehty 2000-luvun vaihteessa, mutta silmukan eri kytkentätilanteita ei ole otettu huomioon. Kaivostoiminnan päättyttyä on myös suunnitteilla erilaisia hankkeita hyödyntämään kaivoksen maanalaisia tiloja, jolloin sähköverkon muutoksille voi olla tarvetta.

Työn teoriaosuudessa käsitellään oikosulkuvirran laskentaa keskijännitteellä, mutta pääosin laskentayhtälöt toimivat myös muilla jännitetasoilla. Teoriassa tärkeimpinä lähteinä on käytetty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun opetusmonistetta teollisuuden oikosulkuvirtojen laskentaan ja ABB 2000 Teknisiä tietoja ja taulukoita -kirjaa. Laskenta suoritettiin ABB DOC -ohjelmalla, mutta myös käsin tarkastelua suoritettiin siltä osin, kun ohjelmalla se ei ole mahdollista. Oikosulkuvirran laskenta käsityönä on työlästä, ja virheiden mahdollisuus on suuri, joten ohjelmien käyttö on yleensä suotavaa.

Työn lopuksi esitellään laskennan tuloksia ja verrataan niitä laitevalmistajien ilmoittamiin tietoihin. Vertailun jälkeen pohditaan työn tuloksia ja niistä tehtäviä päätelmiä, kehitystarpeita ja muita tarpeellisia toimenpiteitä.

## 2 PYHÄSALMI MINE OY

Pyhäsalmen kaivos sijaitsee Pyhäjärvellä Pohjois-Pohjanmaalla ja sen omistaa First Quantum Minerals Ltd. Aiemmat omistajat olivat Outokumpu Oyj ja Inmet Mining Corporation. Outokumpu myi kaivoksen vuosituhaten vaihteessa Inmet Mining -yhtiölle, joka sittemmin siirtyi First Quantum Minerals -yhtiön omistukseen. Pyhäsalmen kaivos työllistää noin 200 työntekijää sekä useita aliurakoitsijoita ja heidän työntekijöitään. Pyhäsalmen kaivoksen malmi louhitaan maan alta, josta se nostetaan 1410 metrin syvyydestä maanpinnalle nostokoneella malmisiiloon. Malmisiilosta malmi kuljetetaan hinnakuljettimella rikastamolle, missä prosessi erottaa arvokkaat rikasteet. Rikastuksen jälkeen kupari-, pyriitti- ja sinkki-rikasteet varastoidaan odottamaan junaan lastaamista. (Pyhäsalmen kaivos 1962–2012.)

Pyhäsalmen malmin löysi paikallinen asukas Erkki Ruotanen vuonna 1958. Kaivon teon yhteydessä löytyi erikoisen näköistä kiveä, joka osoittautui malmikiveksi. Pyhäsalmen kaivos aloitti toimintansa vuonna 1962, neljä vuotta malmin löytymisen jälkeen. Maanalainen toiminta alkoi vuonna 1967, ja sitä ennen tuotanto tapahtui avolouhintana. Kaivosta on syvennetty vaiheittain 1960-luvulta asti, viimeisimpänä uusi kaivos projekti vuosituhaten vaihteessa. Uuden kaivoksen myötä saavutettiin nykyinen syvyys noin 1450 metriä, ja uuden nostokuilun myötä tuotanto nousi huomattavasti. Kaivoksen rakennetta kuvataan liitteessä 1. Maanalaisen louhinnan on arvioitu loppuvan joulukuussa 2019 nykyisten tunnettujen malmivarantojen ehdyttyä. Tähän asti Pyhäsalmen kaivos on ollut kokoluokassaan maailman tehokkaimpia ja myös Euroopan syvin toiminnassa oleva kaivos. (Pyhäsalmen kaivos 1962–2012.)

Maanalaisen kaivostoiminnan loputtua on kaivoksen tiloille suunnitteilla useita erilaisia käyttötarkoituksia. Tätä varten on perustettu Pyhäjärven Callio, joka tarjoaa tiloja maan alta ja kaivosalueelta erilaisiin tarpeisiin. Tiloja on jo rakennettu kasvinkasvatukseen ja laboratoriotiloja eri tieteenalojen tutkimuksille. Suunnitteilla on myös energiavarasto ja datakeskus, mutta nämä tarvitsevat jonkun suuremman toimijan investointihalukkuutta. (Pyhäjärven Callio 2019.)

Kaivoksen sähköverkolla on paljon ominaispiirteitä ja säädöksiä, jotka tulee ottaa huomioon verkkoa rakennettaessa ja suunniteltaessa. Sähköverkon suurin jakelujännite on rajattu 20 kV:iin. Avolouhoksissa on suurin sallittu käyttöjännite 3000 V ja maanalaisissa kaivoksissa 1000 V, mutta kiinteille laitteille sallitaan kuitenkin käyttöjännitteeksi 6000 V. Suurempien jännitetasojen käyttöön täytyy hakea lupa Turvallisuus- ja kemikaalivirastolta. Maanalainen jakeluverkko pyritään rakentamaan kahdenneusti siten, ettei henkilöturvallisuuteen vaikuttavien laitteiden toiminta keskeydy. (ST-kortti 51.78. )



Maanalaiset muuntamot, jakokeskukset yms. tulee sijoittaa erilliseen kallioon louhittuun syvennykseen tai muuhun suojaisaan paikkaan, jossa niiden vaurioitumisen vaara on pieni. Huolto- ja käyttötoimenpiteet on myös pystyttävä suorittamaan turvallisesti. Muuntamot on sijoitettava vähintään 25 metrin päähän kuiluista, korjaamoista, ruokapaikoista tai muista tämän tapaisista kohteista. Räjähdyksinevarastoon tai muihin palavan aineen varastoihin etäisyyden tulee olla vähintään 50 metriä. Etäisyydet mitataan kulkuteitä pitkin.(ST-kortti 51.78.)

Kaapeleita asennettaessa on huomioitava käyttöolosuhteet ja erityiset asennustavat. Kaivoksissa käytetään yleensä vain märkiin tiloihin soveltuvia kaapeleita ja niiden täytyy olla yksittäin asennettuna paloa edistämättömiä. Kuiluun tai pystysuoriin porattuihin reikiin asennettavissa kaapeleissa tulee olla mekaaninen tai sähkömekaaninen suojaus. Asennettavien kaapeleiden tulee kestää vähintään kolme kertaa oman painonsa ja kaapelit on kiinnitettävä luotettavasti. Tarvittaessa on hyvä käyttää lisäsuojauksia ehkäisemään kaapelien vaipan vaurioitumista. Veden kertyminen kaapeleita suojaaviin rakenteisiin on estettävä.(ST-kortti 51.78.)

Kaivokseen asennettavien laitteiden tulee olla korroosion kestäviä ja mekaanisesti lujia. Tavallisesta teräksestä ja alumiinista valmistetut laitteet tai tavarat ruostuvat erittäin nopeasti kaivos olosuhteissa. Nämä asiat on otettava huomioon esimerkiksi valaisimia valittaessa, jotta niitä voidaan käyttää turvallisesti. Olosuhteita voidaan parantaa käyttötilan lämpöä ja kosteutta säätämällä esimerkiksi riittävällä ilmanvaihdoilla, jolloin kondenssiveden kertyminen on vähäisempää. (ST-kortti 51.78.)

### 3 OIKOSULKUTILANTEET

Turvallisen sähköverkon suunnittelun perusta on tuntea verkossa ja sen eri osissa esiintyvät oikosulkuvirrat. Verkon komponenttien on kestävä oikosulun aikaiset termiset ja dynaamiset rasitukset. Verkkoon suoraan kytkettyjen sähkömoottorien vikatilanteissa synnyttämä oikosulkuvirta on myös huomiotava, kun moottorien yhteenlaskettu pätöteho on vähintään noin neljännes syöttävän muuntajan nimellistehosta laskettaessa verkon suurinta oikosulkuvirtaa. Moottorit, joita ohjataan säätölaitteilla kuten taaajuusmuuttajilla, eivät lisää oikosulkuvirtaa, vaan ohjainlaite kuluttaa generaattoritehon häviönä moottorin käämityksessä. (Hietalahti 2013, 225–228.)

Oikosulkuvirrassa on tasavirta- ja vaihtovirtakomponentti, joista tasavirtakomponentin suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimeneminen piirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta toisiinsa. Tasavirtakomponentti esiintyy oikosulun alussa ja vaimenee kohti nollaa. Vaihtovirtakomponentissa voi esiintyä vaimeneva osa, jos oikosulku tapahtuu lähellä generaattoriyksiköitä. (Huotari & Partanen 1998, 2–10.)

Teollisuuden jakeluverkko on usein maasta erotettu, jolloin oikosulkutapaukset rajoittuvat kaksi- ja kolmivaiheisiin oikosulkuihin. Yleensä ei ole tarpeen laskea kaikkia oikosulkuvirtoja, vaan riittää että tunnetaan suurin ja pienin verkonpisteessä esiintyvä oikosulkuvirta. Oikosulkuvirtoja ja niiden laskemista käsitellään IEC 60909 -standardissa. (Huotari & Partanen 1998, 2–10.) Tässä teoriaosuudessa käsitellään oikosulkuvirta laskelmiin liittyvät perussuureet ja laskelmat.

#### 3.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, joten sen tarkastelu on helpompaa. Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihdetta yhdistyvät ja aiheuttavat siten yleensä suurimman vikavirran. Kolmivaiheisessa oikosulussa esiintyy vain verkon myötäimpedanssi  $Z_1$ , toisin kuin epäsymmetrisissä kaksi- ja yksivaiheisissa oikosuluissa, joissa on huomiotava verkon nolla ja vastaimpedanssit. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä 1. (ABB 2000.)

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \quad (1)$$

jossa

$c$  on jännitekerroin,

$U_n$  on syöttävän verkon jännite ja

$Z_1$  on myötäimpedanssi.

TAULUKKO 1. IEC 60909 -standardin mukainen jännitekerroin  $c$

Nimellisjännite $U_n$	Maksimioikosulkuvirta $c_{max}$	Minimioikosulkuvirta $c_{min}$
pienjännite 230/400V	1	0.95
muut	1.05	0.95
keskijännite 1kV-35kV	1.1	1.0
suurjännite 35kV-230kV	1.1	1.0

### 3.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisessa oikosulussa kolmivaihejärjestelmän kaksi vaihdetta yhdistyvät. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on yleensä aina kolmivaiheista oikosulkuvirtaa pienempi. Kaksivaiheinen oikosulku ilman maakosketusta voidaan laskea yhtälöllä 2.(ABB 2000.)

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad (2)$$

jossa

$U_n$  on syöttävän verkon jännite,

$c$  on jännitekerroin,

$Z_1$  on myötäimpedanssi ja

$Z_2$  on vastaimpedanssi.

Jos ollaan kaukana oikosulkuvirtaa syöttävistä lähteistä, muodostuvat impedanssit lähes yhtä suuriksi:  $Z_1 \sim Z_2$ . Tällöin voidaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskea yhtälöllä 3. (ABB 2000.)

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3} \quad (3)$$

jossa

$I_{k3}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta.

### 3.3 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheisessa oikosulussa eli maasulussa vaihdejohdin saa kosketuksen maahan johtavaan johtimeen tai maahan kytkettyyn johtavaan materiaaliin. Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä 4. (ABB 2000.)

$$I_{k1} = \frac{c * U_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} \quad (4)$$

jossa

$c$  on jännitekerroin

$U_n$  on syöttävän verkon jännite,

$Z_0$  on nollaimpedanssi,

$Z_1$  on myötäimpedanssi ja

$Z_2$  on vastaimpedanssi.

Jos ollaan kaukana oikosulkuvirtaa syöttävistä lähteistä, muodostuvat myötäimpedanssi ja vastaimpedanssi yhtä suuriksi. Tällöin voidaan yksivaiheinen oikosulkuvirta laskea kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla:

$$I_{k1} = \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}} * I_{k3} \quad (5)$$

jossa

$Z_0$  on nollaimpedanssi,

$Z_1$  on myötäimpedanssi ja

$I_{k3}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta.

### 3.4 Sysäysoikosulkuvirta

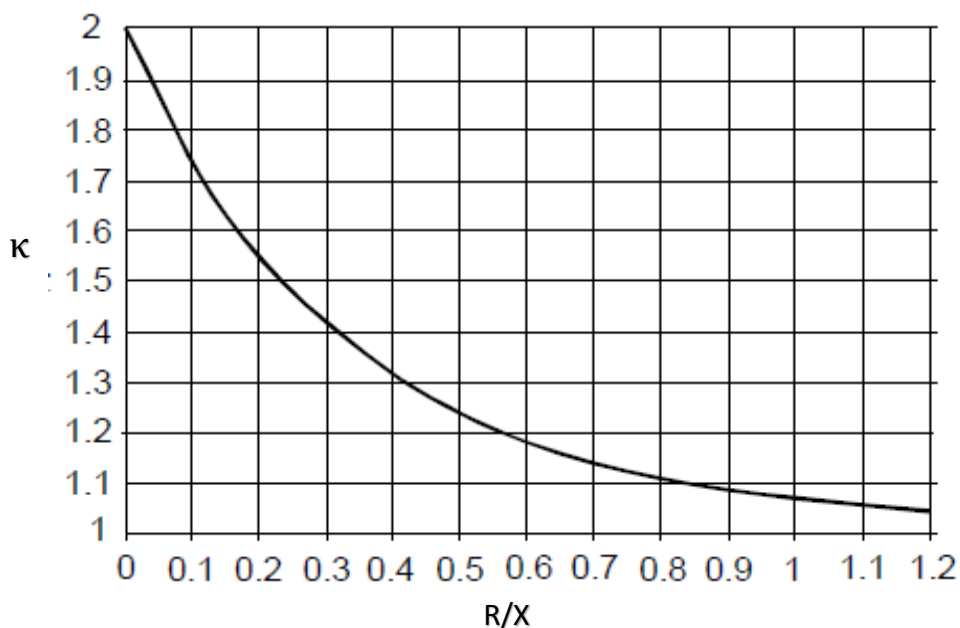
Sysäysoikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirran suurinta hetkellistä arvoa, joka saavutetaan noin 10 millisekunnin päästä oikosulun alusta. Sysäysoikosulkuvirtaa käytetään laitteiden mekaaniseen mitoittamiseen. Valmistaja ilmoittaa tyyppikilvessä kestoisuusarvon. Sysäysoikosulkuvirrasta käytetään myös nimitystä dynaaminen oikosulkuvirta, ja se voidaan laskea yhtälöllä 6. (Huotari & Partanen 1998, 23–24.)

$$i_p = \kappa * \sqrt{2} * I_k \quad (6)$$

jossa

$\kappa$  on sysäyskerroin, joka saadaan kuviosta 1 ja

$I_k$  on alkuoikosulkuvirta.



KUVIO 1. Sysäyskerroimen  $\kappa$  riippuvuus oikosulkuvirtapiirin resistanssin suhteesta reaktanssiin (ABB 2000.)

Vaihtoehtoisesti voidaan sysäyskerroin  $\kappa$  laskea yhtälöllä 7. (Huotari & Partanen 1998, 24.)

$$\kappa = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} \quad (7)$$

jossa

R on oikosulkuvirtapiirin resistanssi ja

X on oikosulkuvirtapiirin reaktanssi.

Joskus on vaikea määrittää verkon resistanssin ja reaktanssin suhdetta. Tällöin on hyväksyttävää käyttää suurjännitteellä sysäyskertoimen arvona 1,8.

### 3.5 Terminen oikosulkuvirta

Termisen oikosulkuvirran avulla mitoitetaan verkon komponenttien terminen oikosulkukestoisuus. Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirran tehollisarvoa, jolla on sama terminen vaikutus ja kestoaika kuin todellisella oikosulkuvirralla. Jotta laite tai asennus kestä oikosulkuvirran termiset vaikutukset, on sen nimellisen termisen oikosulkukestoisuuden oltava suurempi tai yhtä suuri kuin yhtälöllä 8 laskettu ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen 1998, 29.)

$$I_{th} = I_k'' * \sqrt{((m + n) * t_k)} \quad (8)$$

jossa

$I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,

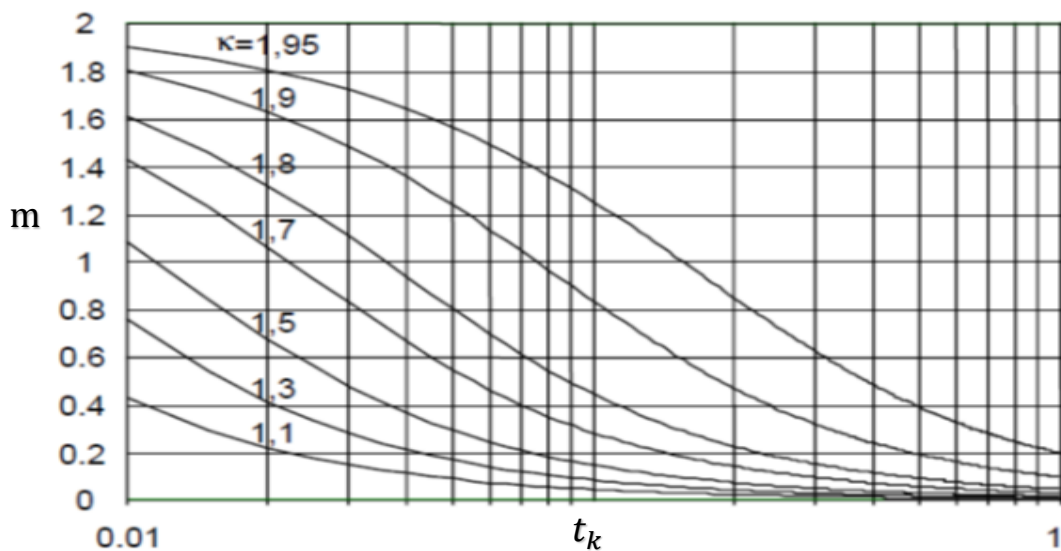
$m$  on tasavirta tekijä,

$n$  on vaihtovirta tekijä ja

$t_k$  on vian kesto aika.

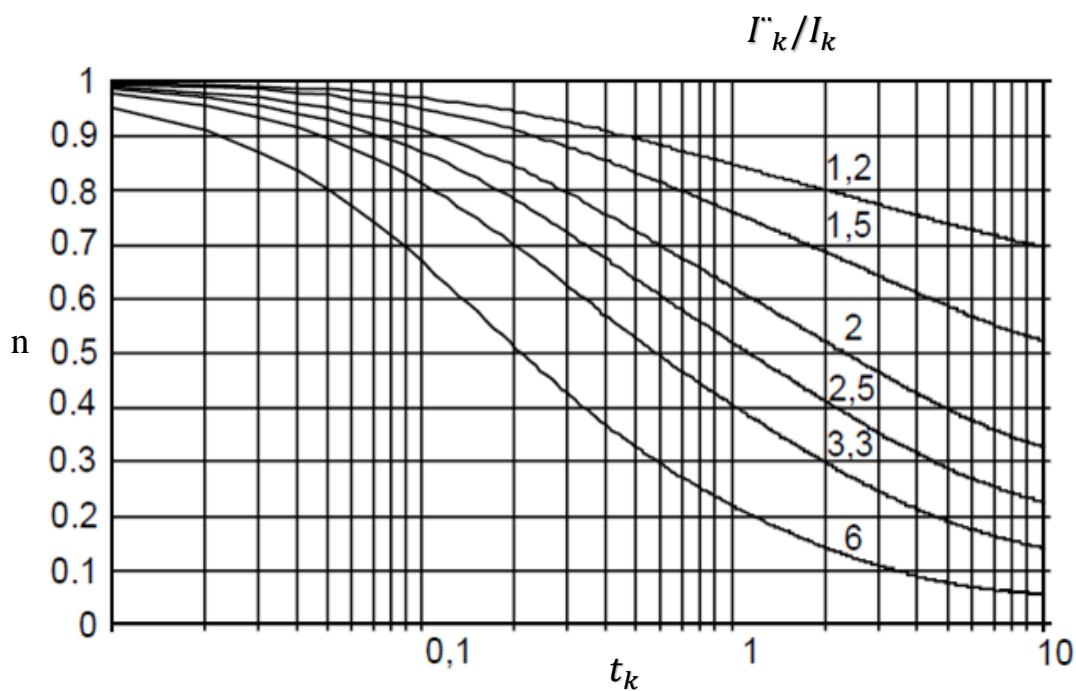
Jos oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista ja vian kesto aika ylittää 0,5 s, voidaan olettaa että  $m + n = 1$ , jolloin  $I_{th} = I_k''$

Tasavirtatekijän  $m$  avulla otetaan huomioon tasavirtakomponentin vaimeneminen. Tasavirtatekijän arvo määräytyy sysäyskertoimesta  $\kappa$  ja vian kesto ajasta  $t_k$ . Tasavirtatekijä voidaan määrittää kuviosta 2.



KUVIO 2. Tasavirtatekijän  $m$  riippuvuus sysäyskertoimesta oikosulun kestoajaan (ABB 2000.)

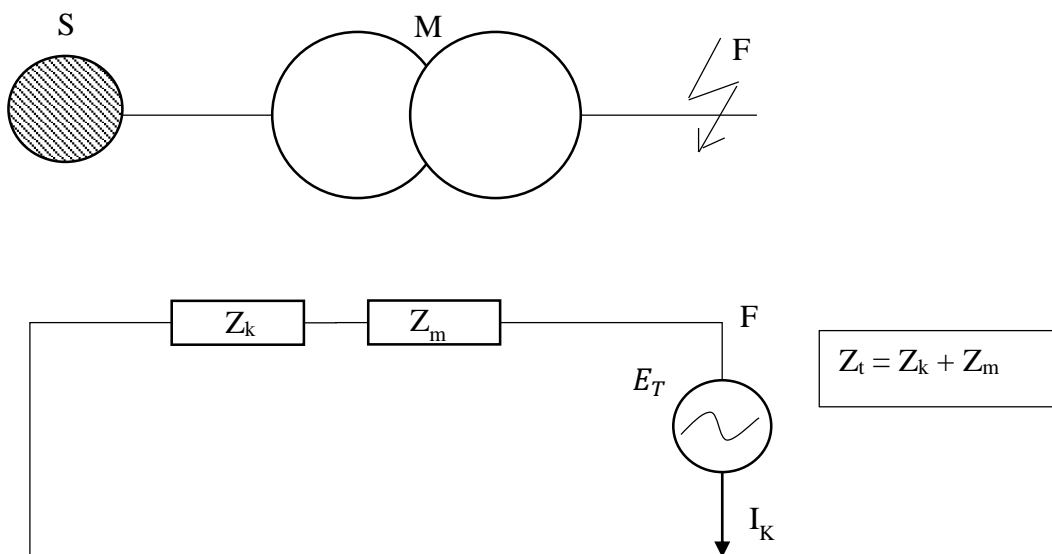
Vaihtovirtatekijän  $n$  avulla otetaan huomioon oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin vaimeneminen. Vaihtovirtatekijän arvo määräytyy alkuoikosulkuvirran  $I'_k$  ja pysyvän tilan oikosulkuvirran  $I_k$  suhteesta ja vian kestoajasta  $t_k$ . Vaihtovirtatekijä voidaan määrittää kuviosta 3.



KUVIO 3. Vaihtovirtatekijän  $n$  riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta (ABB 2000.)

## 4 THEVENIN MENETELMÄ

Thevenin menetelmää käytetään usein teollisuuden sähköverkkojen oikosulkuvirtojen laskennassa. Menetelmässä vikaantunut verkko korvataan yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jossa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla, ja vikapaikkaan sijoitetaan jännitelähde. Vikapaikassa kulkeva virta voi teollisuudessa olla useiden lähteiden syöttämä summa, jolloin ne voidaan Thevenin teoreeman avulla muodostaa yhdeksi ns. ekvivalenttiseksi jännitelähteeksi. (Huotari & Partanen 1998,8-9.)



KUVIO 4. Malliverkosta muodostettu Thevenin sijaiskytkentä

S on syöttävä verkko, M on muuntaja,  $Z_k$  ja  $Z_m$  ovat niille muodostetut oikosulkuimpedanssit. Pisteessä F tapahtuu jäykkä oikosulku, jolle voidaan laskea arvo  $I_k$ .  $E_T$  kuvaa muodostettua Thevenin jännitelähdettä.

### 4.1 Oikosulkuimpedanssit

Thevenin menetelmässä on tärkeää muodostaa verkon komponenteille mahdollisimman tarkat oikosulkuimpedanssit. Eri komponenteille oikosulkuimpedanssit muodostuvat hieman eri tavalla. Valmistaja voi ilmoittaa komponentin oikosulkuimpedanssin arvon, mutta se voidaan myös laskea.



Muuntajien oikosulkuimpedanssi voidaan selvittää tyyppikilven arvoilla laskemalla yhtälöllä 9. Oikosulkuimpedanssi voidaan myös jakaa oikosulkuresistanssiksi ja oikosulkureaktanssiksi yhtälöillä 10 ja 11. Kuristimelle voidaan käyttää samoja yhtälöitä kuin muuntajille. (Huotari & Partanen 1998,18.)

$$Z_k = \frac{u_k}{100\%} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (9)$$

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3 * I_n^2} \quad (10)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (11)$$

joissa

$u_k$  on muuntajan oikosulkujännite prosentteina,

$U_n$  on muuntajan nimellisjännite,

$S_n$  on muuntajan nimellisteho ja

$P_{kn}$  on muuntajan kokonaispätotehohäviöt nimellisvirralla.

Kaapeleille ja kiskostoille voidaan oikosulkuimpedanssi määrittää valmistajan ilmoittamilla resistanssi- ja reaktanssiarvoilla. Kiskostojen pituus on yleensä erittäin lyhyt, joten niiden osuus jää huomattavan pieneksi, jolloin ne voidaan jättää huomiomatta. Kaapeleille, kiskostoille ja osin myös avojohdoille voidaan oikosulkuimpedanssi määrittää yhtälöllä 12. (Salminen 2009,47.)

$$Z_j = \sqrt{r^2 + x^2} * l \quad (12)$$

jossa

$r$  on kaapelin tasavirtaresistanssi pituusyksikkö kohti,

$x$  on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti ja

$l$  on kaapelin pituus.

Yhtälöllä 12 laskettu oikosulkuimpedanssi vastaa kaapelien myötä- ja vastaimpedanssia sijaiskytkentää muodostettaessa, kun ei käsitellä maakosketusta. Maasulkuilanteita varten on selvitettävä kaapelin nol-laimpedanssi, ja se voidaan selvittää yhtälöllä 13. (Salminen 2009,47–48[Alatalo 1975].)

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \quad (13)$$

jossa

$R_0$  on kaapelin nolaresistanssi ja

$X_0$  on kaapelin nolareaktanssi.

Epätahtimoottoreiden huomioimista varten on niille muodostettava myös oikosulkuimpedanssi ja se voidaan suorittaa yhtälöllä 14. Suurjännitemoottorit otetaan aina laskelmissa huomioon, mutta pienjännitemoottoreita ei yleensä mallinneta erikseen, vaan niiden oikosulkuimpedanssit lasketaan yhteen ja muodostetaan muuntajakohtainen ekvivalenttimoottori. (Huotari & Partanen 1998,19.)

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (14)$$

jossa

$I_s$  on moottorin käynnistysvirta,

$I_n$  on moottorin nimellisvirta,

$S_n$  on moottorin nimellinäennäisteho ja

$U_n$  on moottorin nimellijännite.

## 4.2 Muuta huomioitavaa

Teollisuusverkkoihin on yleensä kytkettynä kompensointilaitteita, yliaaltosuodattimia ja muita komponentteja, jotka eivät syötä verkkoon oikosulkuvirtaa, ja ne on jätetty huomioimatta. Teollisuusverkoissa on yleensä paljon katkaisijoita ja erottimia, joissa ilmenee yleensä pieni ylimenoresistanssi ja häviöteho, mutta ne ovat kuitenkin niin pieniä, että niitä ei tarvitse ottaa laskelmissa huomioon.

Suurin osa teollisuusverkon kuormituksesta syntyy pääosin pyörivistä koneista, mutta valaistus ja lämmityskuormia esiintyy myös. Näiden kuormien osuus on yleensä niin pieni, ettei niitä tarvitse ottaa huomioon, jos niitä ei voi selvästi erotella muusta kuormituksesta. Epätahtimoottoreiden osalta tähän työhön on mallinnettu vain suorakäynnisteiset moottorit, joiden teho tai tehot ovat merkittävät. Huomioidaan vielä, että näille edellä mainituille verkon osille olisi sijaiskytkennän muodostaminen hankalaa ja vaikutus lopputulokseen erittäin pieni.

## 5 LÄHTÖTIETOJEN KERÄÄMINEN

ABB DOC -ohjelmalla voidaan laskea keskijänniteverkon oikosulkuvirrat, mutta selektiivisyyttä ja kuormitettavuutta ei voida tarkkaan laskea, koska ohjelma käyttää vain ABB:n valmistamia komponentteja. Verkon mallinnusta varten on ensin kerättävä lähtötiedot, joiden avulla mallintaminen ABB DOC -ohjelmaan voidaan suorittaa. Lähtötiedoista osa joudutaan laskemaan käsin, koska tässä tapauksessa tehdasalueen syöttö tulee Elenia -verkkoyhtiön 110 kV:n suurjännite johdosta ja ABB DOC -ohjelma ei tue laskentaa tällä jännitetasolla.

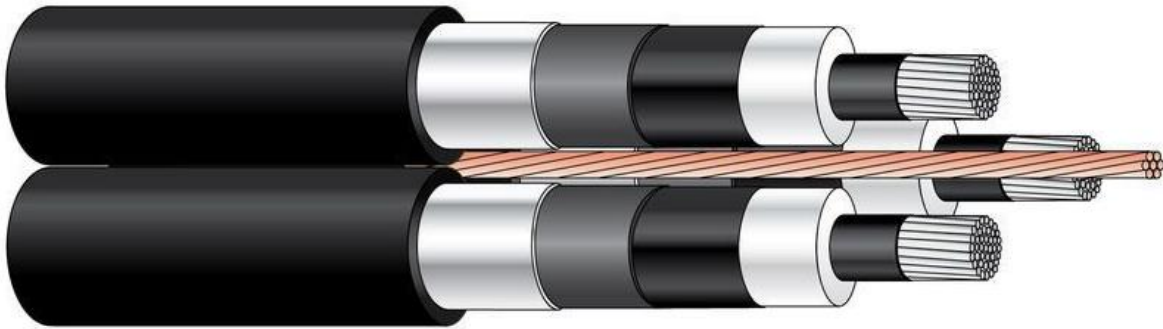
Kaapeleiden pituus-, ja poikkipintatiedot on kerätty jakeluverkkokaaviosta, jota on päivitetty tämän työn aikana. Myös muuntajien tiedot on kerätty jakeluverkkokaaviosta ja osa tarkastettu paikan päältä arvokilvestä. Kojesteiden ja niiden komponenttien tiedot on kerätty osin arvokilvistä ja asennuskuvista, mutta kaikkia tietoja ei ollut saatavilla.

### 5.1 Kaapelit keskijänniteverkossa

Keskijänniteverkon kaapelina on käytetty harvinaisempaa Rekan valmistamaa AMCMK 3,6/6 kV -kaapelia. Kyseistä kaapelia ei enää valmisteta, mutta arkistoista löytyivät Rekan toimittamat kaapelin tekniset tiedot pääosin käytetylle 300 mm<sup>2</sup>:n poikkipinnalle. Kaapelia on jakeluverkon kaaviosta laskettuna yhteensä 2927 metriä ja pienempinä poikkipintoina 931 metriä. Korvaavana kaapelina on siirrytty käyttämään AHXAMK - W 12/20 kV -tyyppistä uudenaikaista kaapelia, joka on ominaisuuksiltaan vastaava tai parempi.



KUVA 1. Rekan valmistama kaapeli AMCMK 3x300+25 3,6/6 kV



KUVA 2. Rekan valmistama kaapeli AHXAMK-W 12/20 kV (Reka 2019)

Kuvissa 4 ja 5 on havaittavissa kaapeleiden rakenne-erot, kuten hohtosuojan puuttuminen vanhemmassa kaapelissa. Poikkipinnaltaan samansuuruiset kaapelit vastaavat impedansseiltaan toisiaan, mutta kuorimitettavuudessa on eroa. Liitteessä 2 kerrotaan tarkemmat sähköiset arvot AMCMK 3x300 -kaapelille, josta voi tehdä vertailuja muihin kaapeleihin.

## 5.2 Jakeluverkon muuntajat

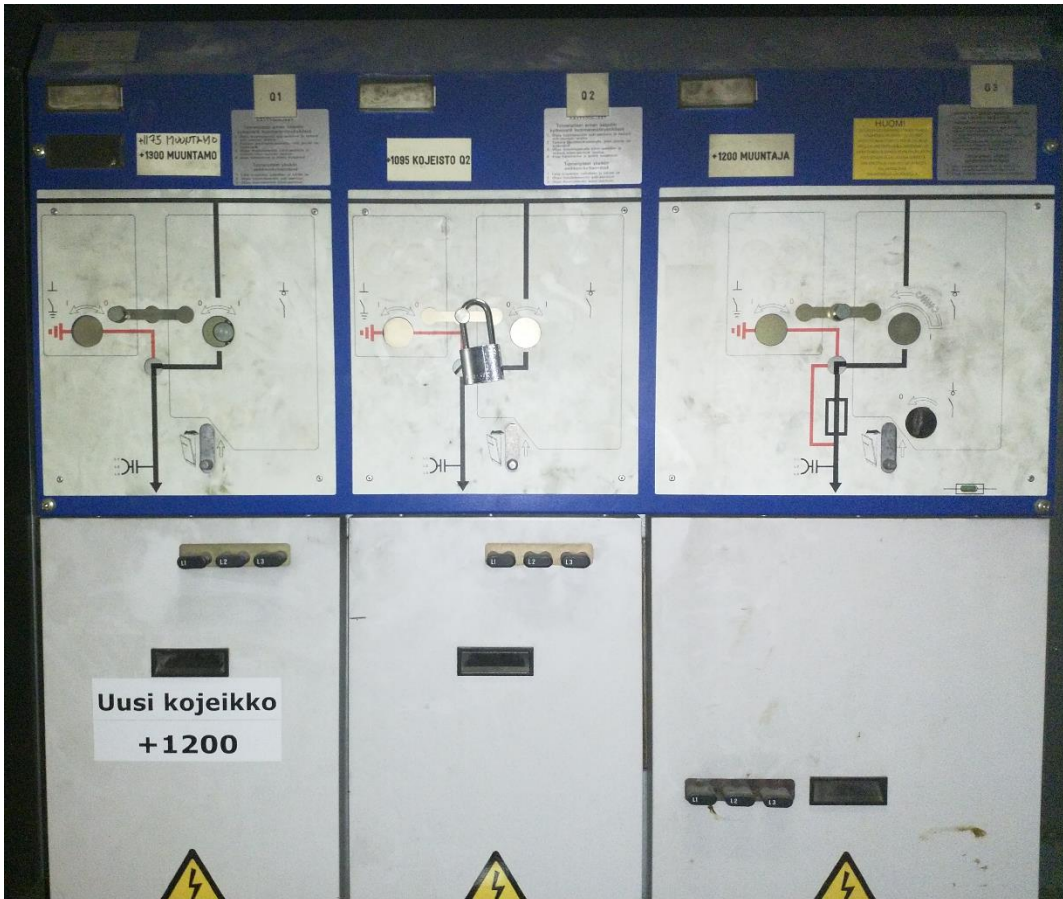
Muuntajat (16 kpl) ovat muuntosuhteeltaan 6/0,4 kV ja kytkennältään Dyn11. Ne ovat tyypillisesti kuivamuuntajia, paitsi yksi, joka on öljyeristeinen silikoniöljymuuntaja. Muuntajien tiedot on kerätty tyyppikilvistä ja verkostokaaviosta. Muuntajien valmistajat vaihtelevat, samoin tehot vaihtelevat 1600 - 20 kVA. Muuntajat on mallinnettu mukaan, vaikka ne eivät itse suoraan vaikuta keskijännitepuolen oikosulkuvirtoihin. Lisäksi kaksi +400-tason muuntajaa on jätetty pois, koska niiden syöttö omalla kaapelilla ja ne ovat käytöstä poistumassa. Muuntajien avulla voidaan ottaa laskennassa huomioon verkon kuormitus ja tarvittaessa tarkastella pienjännitepuolta.



KUVA 3. Tyypillinen jakelumuuntamo

### 5.3 Jakeluverkon kojeistot

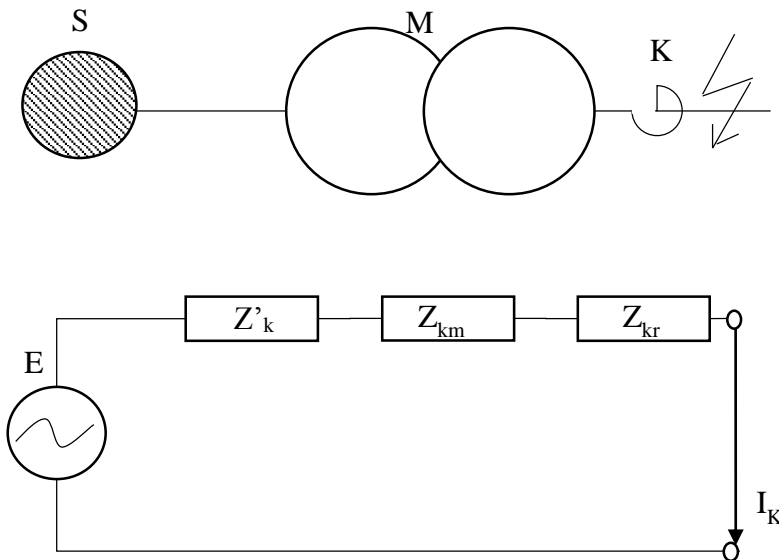
Kojeistot ovat pääosin SF6-eristeisiä Ormazabal CGM tai Schneider electric RM6 -kojeistoja, mutta käytössä on myös yksi ilmaeristeinen vanha Strömbergin valmistama suurempi kojeisto. Strömbergin valmistaman kojeiston tietoja ei suoraan löytynyt, mutta Strömbergin vuonna 1986 julkaisemassa Teknisiä tietoja ja taulukoita -kirjassa on niitä käsitelty kattavasti. Kojeistot eivät suoraan vaikuta oikosulkuvirtoihin, mutta niiden on kestävä niihin kohdistuvat mekaaniset ja termiset vaikutukset oikosulun aikana. Huomion arvoinen asia kojeistoissa on SF6-eristeisten kojeistojen kompakti koko, joka helpottaa paljon kojeistojen tilojen suunnittelussa.



KUVA 4. SF<sub>6</sub>-eristeinen kojeisto

#### 5.4 Käsin lasketut tiedot

Työssä laskettiin 110 kV:n puolelta tuleva oikosulkuvirta päämuuntajan yli 6 kV:n puolelle. Laskenta tehtiin Thevenin menetelmää mukailleen eli luotiin sijaiskytkentä:



KUVIO 5. Sijaiskytkentä

Verkon oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä 1.

$$Z_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (1)$$

jossa

$c$  on jännitekerroin,

$U$  on verkonjännite ja

$I_k$  on verkonoikosulkuvirta.

Elenia on ilmoittanut liityntäkohdan oikosulkuvirran arvoksi:  $I_k = 1,8 \text{ kA}$ , kun tässä tapauksessa oletetaan  $I_k = I_k''$ . Sijoittamalla arvot yhtälöön 1, saadaan tulokseksi verkon oikosulkuimpedanssi.

$$Z_k = \frac{1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 1,8 \text{ kA}} = 38,81 \Omega \quad (1)$$

Verkon oikosulkuimpedanssi täytyy redusoida päämuuntajan yli 6 kV:n puolelle, jotta sitä voidaan käyttää laskenassa alemmalla jänniteellä. Redusointi suoritetaan yhtälöllä 15.

$$Z_k \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = Z'_k = \left(\frac{6}{110}\right)^2 \cdot 38,81 = 0,115 \Omega \quad (15)$$

jossa

$U_1$  on muuntajan ensiöjännite,



$U_2$  on muuntajan toisiojännite,

$Z_k$  on verkon oikosulkuimpedanssi ja

$Z_k'$  on verkon oikosulkuimpedanssi redusoituna alemmalle jänniteportaalle.

Muuntajan oikosulkuimpedanssi täytyy selvittää, jotta voidaan muuntajan jälkeinen oikosulkuvirta laskea. Muuntajan oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä 8.

$$Z_{km} = \frac{u_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10,4}{100} * \frac{6^2}{16} = 0,234 \quad (8)$$

jossa

$u_k$  on muuntajan oikosulkujännite prosentteina,

$U_n$  on muuntajan nimellisjännite ja

$S_n$  on muuntajan nimellisteho.

Verkon oikosulkuvirta arvo 6 kV:n puolella, päämuuntajan ja kuristimen jälkeen lasketaan yhtälöllä 1 sijoittamalla tässä kappaleessa edellä lasketut arvot yhtälöön.

$$I_k = \frac{E}{Z_k' + Z_{km} + Z_{kr}} = \frac{\frac{1.1 * 6000}{\sqrt{3}}}{0,115 + 0,234 + 0,1} = 8486,66 \text{ kA} \quad (1)$$

jossa

$E$  on jännitelähde,

$Z_{km}$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi ja

$Z_{kr}$  on kuristin ja sen arvo  $0,1\Omega$ .



## 6 ABB DOC

DOC on ABB-yhtymän pien- ja keskijänniteverkkojen laskentaohjelma, jolla voidaan mitoittaa yksivivuvakaaviona verkko alkupisteestä kulutuspisteeseen asti. Ohjelma toimii osana e-Design käyttöympäristöä, josta löytyy muitakin työkaluja tarpeen vaatiessa. Ohjelmassa on valittavana kansallisia ja kansainvälisiä standardeja, joista tässä työssä käytettäväksi valittiin kansainväliset IEC 60909-1 ja IEC 60364 -standardit. Ohjelmassa on laaja valikoima ABB:n valmistamia komponentteja, mutta ei mahdollisuutta muokata tai luoda uusia, joten selektiivisyys- ja kuormitettavuuslaskelmissa tämä on otettava huomioon. Tässä työssä keskityttiin vain keskijänniteverkon oikosulkuvirtoihin, jotka lasketaan IEC 60909-1 -standardin mukaan, joten valmistajat eivät laskelmiin suuresti vaikuta. (ABB DOC,6.)

Ohjelman käyttöliittymän kielenä toimi englanti, koska uusimmassa versiossa ei ole suomen kieltä valittavana. Kielellisiin ongelmiin apua voi etsiä muista ohjelmalla tehdyistä opinnäytetöistä tai muuten perehtyä ammattisanastoon, koska suurin osa alaa käsittävästä tiedosta on julkaistu englanniksi. Ohjelma on käyttöliittymältään hyvin selkeä, joskin perehtyminen siihen on tarpeen ennen varsinaisen käytön aloittamista.

### 6.1 Projektin luonti

Ohjelma käynnistää ensimmäisenä Project wizard -ikkunan, johon voi syöttää projektin tiedot. Tiedot kerätään kuudessa eri vaiheessa, joista tärkeimmät ovat standardin ja syöttävän verkon valinta sekä syöttävän verkon lähtötietojen määrittely. Tietoja on mahdollista muuttaa vielä myöhemmin, mutta ajan säästämiseksi nämä kannattaa tehdä huolellisesti heti aluksi.

Power supply

Power supply

LV Distribution

$I''_k$  8.458 [kA]  MV-LV Transformer 1 Trafo

Sk 5.86 [MVA] Sr 400 [kVA]

+10% tolerance Ukr 4 [%]

+6% tolerance

MV Distribution

Ur 6000 [V]  $I''_k$  8.458 [kA]

Neutral insulated 3Io | [A]


LV section default values

400 [V] LLLN TN-S 50 [Hz]

Network demands

P 1124 [kW] I 120.1 [A]

Q 542.2 [kvar]  $\cos\phi_n$  0.9007

 Options

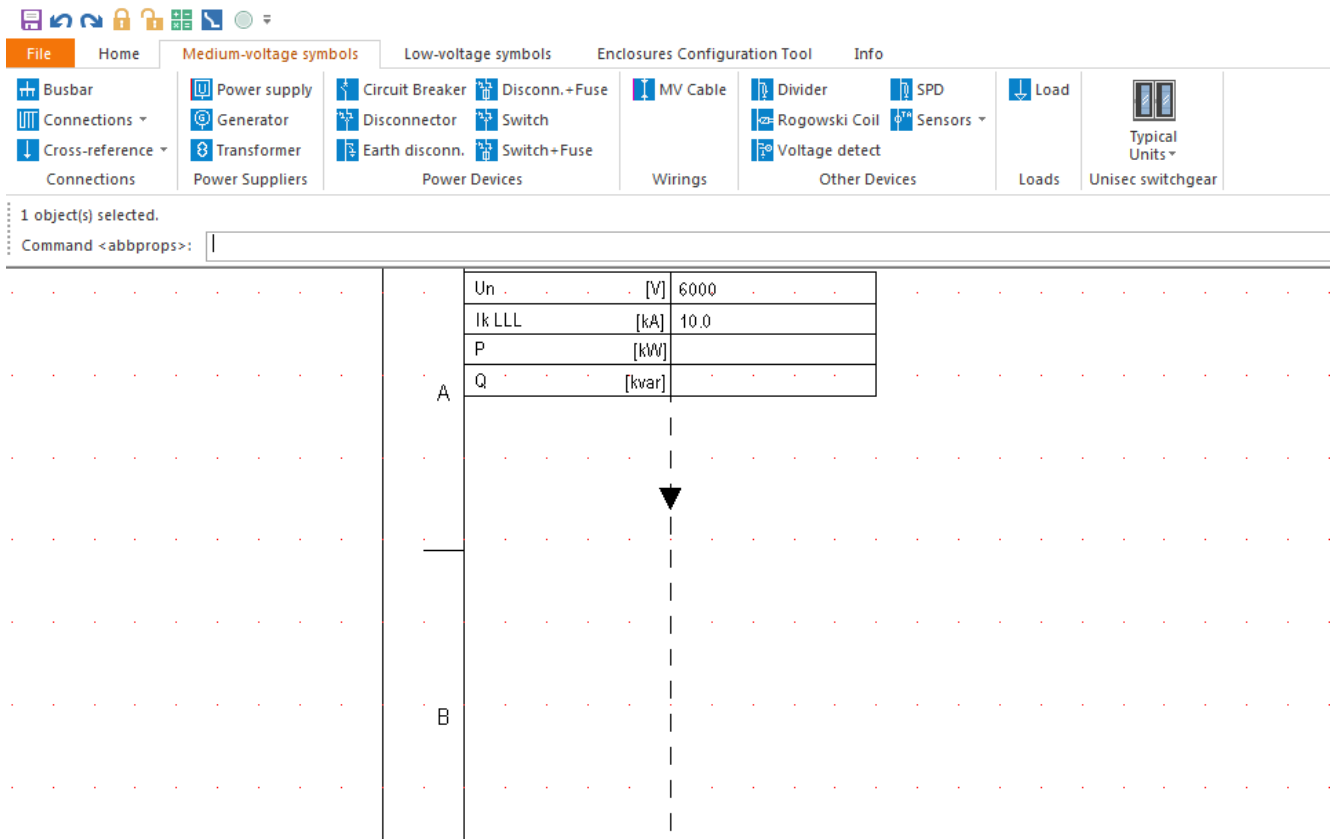
Store current settings as default values for new projects

**ABB** OK Cancel

KUVA 5. Verkon syötön määrittely

## 6.2 Verkon mallintaminen

Lähtötietojen asettelun jälkeen voidaan aloittaa verkon mallintaminen ohjelmaan. Ohjelman näytön vasemmassa yläkulmassa on aiemmin määritelty verkon syöttö, josta verkkoa ryhdytään rakentamaan. Ohjelma antaa tekijälle vapauden verkon rakenteen suhteen mutta varoittaa, jos esimerkiksi objekti jää irttonaiseksi. Tässä työssä luotiin yksinkertaistettu sähköjakaavaio, josta jätettiin kaikki sellaiset osat pois, jotka eivät vaikuta oikosulkuvirtaan.

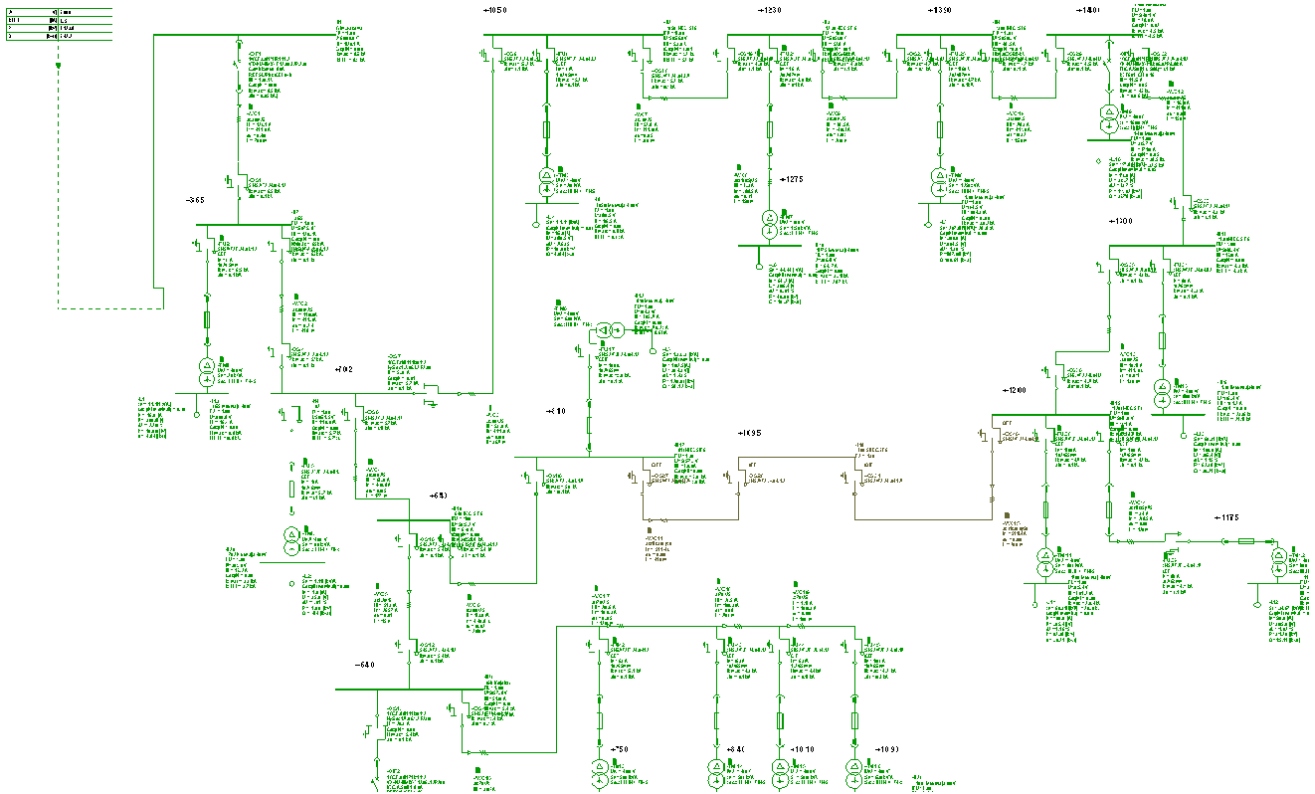


KUVA 6. Alkutilanne

Komponenttien lisäys tapahtuu käyttöliittymän yläreunan työkalupalkista, jossa on pienjännitteelle ja suurjännitteelle omat osiot. Katkaisijat, erottimet, kaapelit ja muuntajat ovat tämän työn keskeisimpiä komponentteja. Näistä kaapelit mallinnettiin niin tarkasti kuin mahdollista, katkaisijat ja erottimet ohjelma sai itse päättää. Kaapeista tarvitaan vähintään poikkipinta, pituus ja johdinmateriaalitieto, muuten niiden mallintaminen ei tarvittavalla tarkkuudella onnistu. Muuntajien mallintaminen on oma haasteensa. Ohjelmassa on vain ABB:n valmistamia muuntajia, joten niiden tietoja täytyi muokata hieman. Muuntajia suojaavat sulakkeet mallinnettiin myös mukaan, vaikka niillä ei suurta vaikutusta oikosulkuvirtaan ole. Kuormitus mallinnettiin muuntajien alajännitepuolelle ja niiden suuruusluokat arvioitiin saatavilla olevien tietojen perusteella.

Verkon laskenta tapahtuu calculate -toimintoa käyttäen. Ennen tätä on kuitenkin hyvä varmistaa että kaapelit ja muut tarkkaan määritellyt komponentit on lukittu. Muuten ohjelma muuttaa ne mielestään sopiviksi. Laskennan jälkeen ohjelmasta voi katsoa eri pisteiden oikosulkuvirranarvoja ja tulostaa ne halutessaan.

Jakelukaaviota tehtiin tässä työssä kaksi kappaletta, ilman moottorikuormia ja moottorikuormien kanssa. Näin voitiin tarkastella, miten pienjännitepuolen moottorikuormat vaikuttavat muuntajan yläjännitepuolelle.



KUVA 7. Jakelukaavio ABB DOC -ohjelmasta

## 7 TULOKSET

Oikosulkuvirrat laskettiin ABB DOC -ohjelmalla ja niistä muodostettiin alla oleva taulukko 2. Taulukossa 2 on oikosulkuvirran arvot kolmevaiheiselle ja kaksivaiheiselle oikosululle ja dynaaminen oikosulkuvirta-arvo ilman moottorikuormia ja moottorikuormien kanssa. Termistä oikosulkuvirta-arvoa ohjelma ei laske, joten sen tarkastelu on suoritettava käsinlaskentana, josta tarkemmin liitteessä 4.

TAULUKKO 2. ABB DOC -ohjelmasta saadut oikosulkuvirran arvot

Paikka	$I_{k3}$ (kA)	$I_{k2}$ (kA)	$I_p$ (kA)	$I_p$ (kA)
Voima-asema	8.46	7.33	20.87	22.14
+365	6.52	5.65	14.41	15.76
+702	5.72	4.95	12.15	13.76
+1050	5.17	4.47	10.69	13.55
+1230	4.90	4.25	10.02	12.74
+1275	4.64	4.02	9.12	11.54
+1390	4.66	4.04	9.44	12.02
+1400	4.50	3.9	9.04	11.43
+1300	4.35	3.76	8.67	11.01
+1200	4.22	3.66	8.38	10.64
+1175	4.06	3.52	7.68	9.94
+1095	4.55	3.94	9.16	11.38
+810	5.04	4.36	10.36	13.00
+640	5.43	4.71	11.39	14.40
+750	5.10	4.42	10.05	12.72
+840	4.83	4.18	9.13	11.55
+1010	4.42	3.83	7.91	9.97
+1090	4.24	3.67	7.42	9.35

Tuloksia on tarkasteltu laskemalla käsin lähimmän ja etäisimmän verkon pisteen kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Laskennat vaikuttavat näiden osalta vastaavan toisiaan, ja tarkemmin asiaa voi tarkastella liitteestä 4. Tuloksia verrataan valmistajien ilmoittamiin kojeistojen arvoihin alla olevassa taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Arvojen vertailu

Kojeisto/Koje	Dynaaminen oikosulkukestoisuus $I_{dyn}$	Dynaaminen oikosulkuvirta $I_{dyn}$	Terminen oikosulkukestoisuus $I_{th}$ 1s	Terminen oikosulkuvirta $I_{th}$ 1s
Schneider RM6	52.5 kA	7.42 – 11.43 kA	21 kA	5.1 kA
Ormazabal SF6	50 kA	7.68 – 15.76 kA	20 kA	7.22 kA
OSAM 12		11.39 – 14.40 kA	20 kA/3s	6.11 kA
OJOK 24	50 kA	11.39 – 14.40 kA	20 kA	6.11 kA
OJOM 24	50 kA	11.39 – 14.40 kA	20 kA	6.11 kA

Taulukosta voidaan todeta kojeistojen kestävän hyvin oikosulun aikaiset termiset ja dynaamiset rasitukset. Taulukon kolme alinta laitetta ovat järjestyksessä vähäöljykatkaisija, kuormanerotin ja varokeuornerotin. Näitä kaikkia on asennettu ilmaeristeiseen kojeistoon. Strömbergin valmistamasta kojeistosta ei tarkkoja tietoja löytynyt, mutta kojeissa on omat arvokilvet. Kyseisen kojeiston voidaan olettaa kestävän samansuuruiset oikosulkuvirrat kuin siihen asennetut komponentit kestävät. Asia käy ilmi Strömbergin vuonna 1986 julkaisemassa Teknisiä tietoja ja taulukoita -kirjasta, jossa on taulukoituna tiedot tämän aikakauden keskijännitekojeistoista (Strömberg 1986, 278–288).

Tässä luvussa esiteltyjen tulosten pohjalta olisi helppo ryhtyä tutkimaan pienjännitepuolen oikosulkuvirtoja ja suojauksen toimivuutta. Ne on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle verkon laajuuden takia. 110 kV:n verkon suojausta ei tässä työssä käsitelty, mutta työssä esiteltyjen tietojen perusteella senkin toteuttaminen olisi mahdollista.

## 8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksen oli päivittää maanalaisen keskijänniteverkon oikosulkuvirtojen tiedot, ja tämä tavoite saavutettiin. Kaikille verkon pisteille saatiin määritettyä tarvittavat arvot, ja niitä pystyttiin vertailemaan, vaikka osa tiedoista oli hankala varmistaa. Sähkön pääjakelukaavion tiedot myös päivitettiin vastaamaan nykyistä tilannetta ja jakeluverkosta luotiin ABB DOC -ohjelmaan kaavio, jonka avulla voidaan suunnitella mahdollisia muutoksia.

Uusia muuntamoita tai kojeistoja rakennettaessa voi tämän työn pohjalta suorittaa tarvittavat laskelmat, joko ohjelmalla tai käsin laskemalla. Tulevaisuudessa olisi hyvä suorittaa mitoitus myös pienjännitepuolelle ja tarkastella suojausten toimivuutta. Työssä tehdyn jakeluverkkokaavion pohjalta voisi lähteä pienjännitepuolen keskuksia mallintamaan omina projekteinaan, kun nyt tiedetään muuntajien ensiö- ja toisiopuolen oikosulkuvirrat.

Työni osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi projektiksi. Olin työskennellyt kaivoksessa noin kuusi vuotta yhtäjaksoisesti ennen työn aloittamista, joten aihe oli valmiiksi harkittu. Ennen työn aloittamista minulla ei ollut tietoa mahdollisista laskentaohjelmista, joista tässä työssä käytettiin ABB DOC -ohjelmaa. Ohjelman käyttö ja siinä tehdyt virheet opettivat paljon työn aikana. Tulosten tarkastelussa täytyi osata hahmottaa virheet, joten huomasin oikosulkuteorian tarpeellisuuden. Teoriapohjaa kerätessäni huomasin aihealueen laajuuden. Mietin samalla, täytyykö jotakin vielä rajata pois. Tarkasteltavaa olisi vielä lisääkin, mutta työn tarkoitus ei ollut mennä tämän pidemmälle. Ajallisesti ja muutenkin haastavin osio tässä työssä oli kirjallinen toteutus, koska itse laskenta ei enää tuntunut aiheuttavan ongelmia teorian ja ohjelman käytön ollessa halussa.

## LÄHTEET

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa. Suomalaiset ABB-yhtiöt.

ABB e-Design DOC User Manual – Englanti. Saatavilla: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A9880&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Luettu 10.4.2019

ABB STRÖMBERG(YHTIÖ), 1986. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 7 painos . Vaasa: ABB Strömberg. ISBN 951-99366-0-2

Alatalo, P. 1975. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Oy Nokia Ab Kaapelitehdas.

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. AMK-Kustannus Oy.

Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Luukkonen, K., Lähteenmäki, S., Mäki, T., Oertel, A. 2012. Pyhäsalmen Kaivos : 1962-2012. Pyhäsalmi: Pyhäsalmi Mine Oy.

Pyhäjärven Callio. Saatavilla: <https://callio.info/>. Luettu 20.03.2019.

Reka. 2019. Keskijännite kaapeli AHXAMK 3x300+70. Saatavilla: <https://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv>. Luettu 20.03.2019.

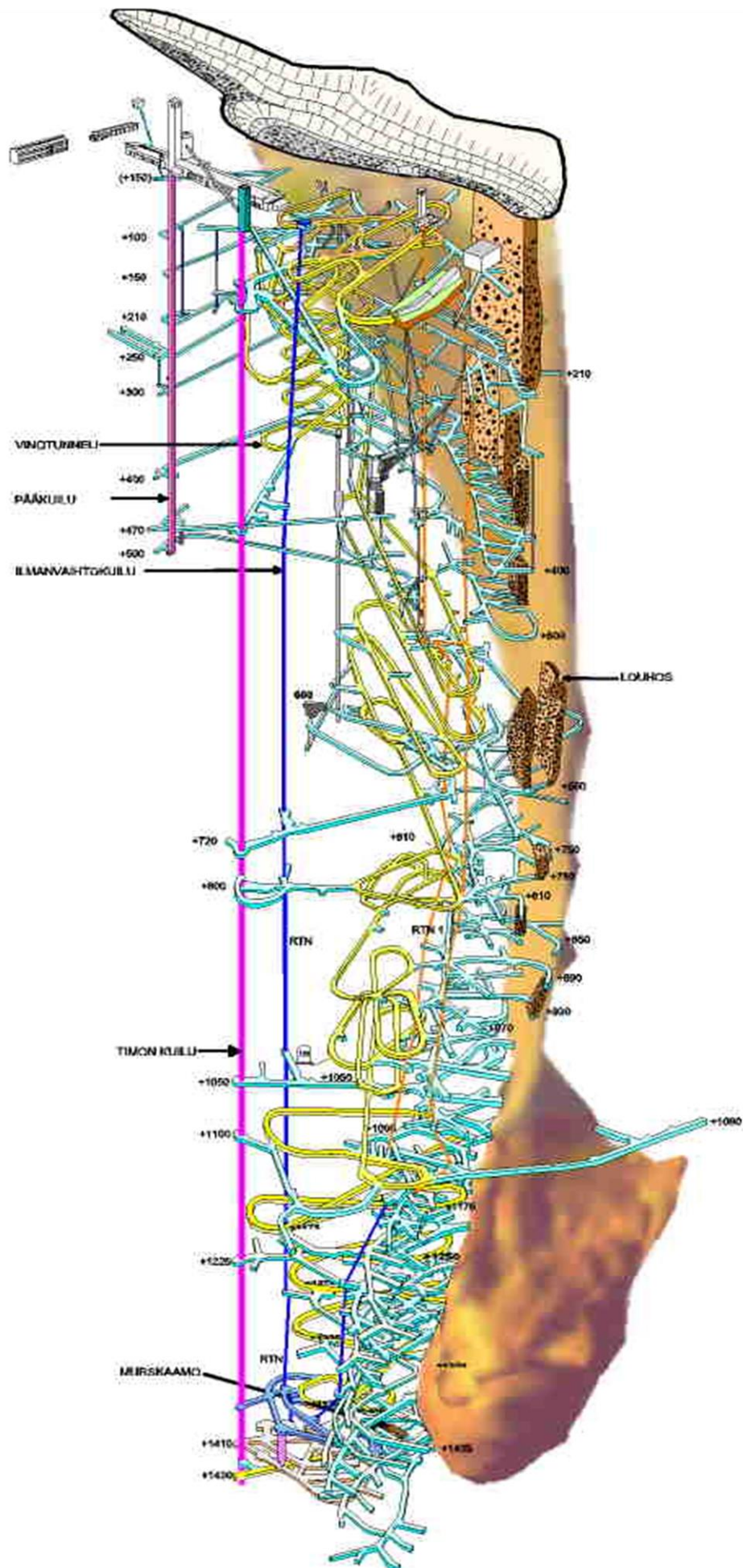
Salminen, P. 2009. Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut: diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.

ST -kortisto ST 51.78. 2014. Sähkölaitteet ja -asennukset kaivoksissa sekä huolto- ja työtunneleissa.



## Liitteluettelo

Liite 1	Kaivoksen rakenne
Liite 2	Reka 3,6/6kV kaapeli sähköiset arvot
Liite 3	Kaivoksen sähkönjakelu kaavio
Liite 4	Tulosten tarkastelua käsin



AMCMK 3x300Al + 25 Cu, 3,6/6 kV sähköisiä arvoja:

Vaihejohtimen DC-resistanssi ( +20°C ):	0,100 Ω/km
Vaihejohtimen AC-resistanssi ( +20°C ):	0,107 Ω/km
Vaihejohtimen AC-resistanssi ( +65°C ):	0,126 Ω/km
Konsentrisen johtimen DC-resistanssi ( +20°C ):	0,727 Ω/km
Induktanssi vaihetta kohti:	0,25 mH/km
Käyttökapasitanssi:	0,60 µF/km
<del>Maakapasitanssi</del> <del>Maasulkuvirta</del> <i>0,82 A/km</i>	<i>0,25 µF/km</i>

( Huom. Induktanssi ja käyttökapasitanssi arvot perustuvat laskelmiin )

Vaihejohtimen oikosulkuvirta (1 s, alku +65°C, loppu+135°C ):	20,1 kA
Konsentrisen johtimen oikosulkuvirta (1 s, alku +40°C, loppu+135°C ):	3,8 kA

Kuormitusvirta ( ilma +25°C, maa+15°C, as. syvyys 0,7 m, maan lämpöresistivisyys 1 K m/W ),  
kun jatkuvan käytön suurin sallittu johdinlämpötila on +65°C ( IEC 287 ).

Ilmassa: 330 A

Maassa: 370 A

Käsin kirjoitetut tiedot selvemmin (ei varmistettu):

Maakapasitanssi 0,25 µF/km

Maasulkuvirta 0,82 A/km



Tarkastellaan suurin  $I_k$ :n arvo +365 tasolta:

$$I_K = 6.52kA$$

$$Z_K = 0.115 + 0.234 + 0.1 + z_j$$

$$z_j = 0.202 \frac{\Omega}{km} * 0.7km = 0.1414\Omega$$

$z_j$  on kaapelin impedanssi

$$I_K = \frac{\frac{1.1 * 6000}{\sqrt{3}}}{0.115 + 0.234 + 0.1 + 0.1414} = 6454A \approx 6.45kA$$

Lukemat näyttävät samanlaisilta, tarkastellaan vielä pisin etäisyys tasolta +1200:

$$I_k = 4.20kA$$

$$I_k = \frac{\frac{1.1 * 6000}{\sqrt{3}}}{0.115 + 0.234 + 0.1 + 0.3266} = 4161A \approx 4.16kA$$

Arvoissa ei siis suurempia heittoa, joten ainakin näiden perusteella voidaan olettaa laskennan onnistuneen.

Lasketaan  $I_{th}$  arvoja, kun ohjelma ei siihen pysty

+640

$$I_k'' = 6.11 I_k = 5.43 \text{ suhde } \frac{6.11}{5.43} = 1.125 \text{ k} = \frac{14.4}{\sqrt{2} * 6.11} = 1.66$$

$n \approx 0.9$  määritelty kuvasta 3

$m \approx 0.1$  määritelty kuvasta 2

$$T_k = 1s$$

$$I_{th} = I_k'' * \sqrt{m + n * t_k} = 6.11 * 1 = 6.11$$

Tuloksista voidaan päätellä aiemmin luvussa 3.5 olevan huomautuksen, vian kestoajan ollessa 0,5 s suurempi on  $I_{th} = I_k''$ , pitävän paikkansa. Ilman moottorien tuottamaa oikosulkuvirran lisäystä olisi  $I_k = I_k''$ , joten muodostetaan alle taulukko jossa on suurimmat alkuoikosulkuvirrat.

Kojeisto	Alkuoikosulkuvirran tehollisarvo
+365 ORMAZABAL	$I_k'' = 7.22 \text{ kA}$
+640 STRÖMBERG	$I_k'' = 6.11 \text{ kA}$
+1400 SCHNEIDER	$I_k'' = 5.1 \text{ kA}$

Yleistäen tästä voidaan siis todeta että, valmistajien ilmoittamat arvot paljon suurempia kestävyys siten hyvä.