



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# POWERFACTORY ALUEVER- KON SUOJAUKSEN MÄÄRIT- TELYSSÄ

Opinnäytetyö

TEKIJÄ: Toni Heikkinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Toni Heikkinen			
Työn nimi PowerFactory alueverkon suojauksen määrittelyssä			
Päiväys	3.6.2019	Sivumäärä/Liitteet	36/1
Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Timo Savallampi			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kuopion Sähköverkko Oy, käyttöpäällikkö Simo Hyvärinen			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia DIgSILENT PowerFactory-ohjelmiston toimivuutta alueverkon mallinnuksessa ja suojauksen määrittelyssä. Tavoitteena oli rakentaa riittävän tarkka mallinnus Kuopion Sähköverkko Oy:n 110 kV alueverkosta. Mallinnuksen tarkoituksena oli saada alueverkko helposti tarkasteltavaan digitaaliseen muotoon. Relesuojausten tarkastelua varten verkon releistys on mallinnettu riittävällä tarkkuudella mallinnukseen.</p> <p>Työ tehtiin siten, että työ aloitettiin perehtymällä ohjelmistoon ja sen käyttöön sekä mallinnettavan verkon erilaisiin komponentteihin. Mallinnusta laadittiin työn edetessä sitä mukaa, kun verkon tietoja oli saatavilla. Lisäksi työssä valmisteltiin PowerFactory-ohjelmiston hankintaa ja käyttöönottoa Kuopion Sähköverkko Oy:lle.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin toimiva mallinnus Kuopion Sähköverkko Oy:n 110 kV alueverkosta sekä lisäksi pieni-muotoinen testimallinnus eräästä keskijänniteverkon osasta. Lisäksi työn lopputuloksina todettiin ohjelmiston toimivuus Kuopion Sähköverkko Oy:n käytössä sekä saatiin tietoa ohjelmiston mahdollisuuksissa laajemmassa käytössä verkkomallinnuksiin liittyen.</p>			
Avainsanat alueverkko, laskenta, PowerFactory, relesuojaus			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Toni Heikkinen			
Title of Thesis Definition of Protection in Regional Transmission Network with PowerFactory			
Date	3 June 2019	Pages/Appendices	36/1
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr. Timo Savallampi, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Kuopion Sähköverkko Oy, Mr. Simo Hyvärinen, Operations Manager			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of this thesis was to find out how the DIGSILENT PowerFactory software works in the modeling of the regional transmission network owned by Kuopion Sähköverkko Oy. The objective of the thesis was to create the modeling of the regional transmission network as accurately as possible. The purpose of the modeling was to model the regional transmission network to a computer-based form to access detailed information about the network. Concerning the relay protection, the protection of the network was modelled to the areal transmission system model as accurately as possible.</p> <p>The PowerFactory software was familiarized with and the information about the network was searched. The modeling was made during the thesis. Additionally, the purchasing and commissioning of the software was prepared as part of this thesis.</p> <p>As a result of this thesis, a properly working modeling of the regional transmission network owned by Kuopion Sähköverkko Oy was made. In addition, an example part of the medium voltage network was modelled. Operability of the PowerFactory software and the possibilities about using the software in the future for different needs in Kuopion Sähköverkko Oy were discovered in this thesis.</p>			
Keywords regional transmission network, calculation, PowerFactory, relay protection			
Public			

## ESIPUHE

Kiitos Kuopion Sähköverkko Oy:lle mielenkiintoisesta ja opettavaisesta opinnäytetyöstä. Kiitokset työn ohjaajalle käyttöpäällikkö Simo Hyväriselle työn aiheesta sekä ohjauksesta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää verkkopäällikkö Lauri Siltasta sekä muuta Kuopion Sähköverkko Oy:n henkilökuntaa työn aikaisesta ohjauksesta ja avusta. Kiitokset yliopettaja Juhani Rouvalille asiantuntevasta ohjauksesta opinnäytetyön aikana sekä pätevistä opetuksesta opintojen aikana. Lisäksi haluan kiittää Savonia-ammattikorkeakoulun muitakin opettajia pätevistä opetuksesta. Fingridin asiantuntijoita Minna Luojusta ja Timo Naukkarista haluan kiittää työn aikana saaduista neuvoista.

Perheelle ja läheisille suuri kiitos tukemisesta opiskeluiden ja opinnäytetyön aikana.

Kuopiossa 3.6.2019

Toni Heikkinen

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
2	KUOPION SÄHKÖVERKKO OY .....	8
3	110 KV VERKON TEOREETTINEN TARKASTELU .....	9
3.1	Suhteelliset arvot verkostolaskennassa .....	10
3.2	Tehonjako .....	11
3.3	Oikosulku .....	13
3.4	Maasulku .....	15
3.4.1	Symmetriset komponentit .....	15
3.5	Verkon tähtipisteiden maadoitus .....	17
3.5.1	Maasulkukerroin .....	18
3.6	Maadoitustavat suurjännitteisissä sähköjärjestelmissä .....	19
3.6.1	Maadoitustavat alue- ja kantaverkoissa .....	19
3.6.2	Maadoitustavat keskijänniteverkoissa .....	19
4	SUOJAUS SUURJÄNNITTEISISSÄ SÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ .....	20
4.1	Suurjännitteisten sähköjärjestelmien suojauksen määrittely .....	21
4.2	Suurjännitteisten sähköjärjestelmien suojauksen toiminta .....	21
4.3	110 kV ja 20-10 kV johto- ja muuntajalähdöillä käytettävät releet .....	21
4.4	110 kV alueverkoissa käytettävät releet .....	22
4.4.1	Distanssirele .....	22
4.4.2	Differentialirele .....	24
4.4.3	Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele .....	24
4.4.4	Ylivirtarele .....	25
4.5	20-10 kV jakeluverkoissa käytettävät releet .....	25
5	DIGSILENT POWERFACTORY-OHJELMISTO JA SEN KÄYTTÖ .....	26
5.1	DIgSILENT GmbH .....	26
5.2	Yleistä ohjelmistosta ja sen käytöstä .....	26
5.3	Ohjelmiston hankinta .....	28
6	KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N 110 KV ALUEVERKON KUVAUS POWERFACTORY-OHJELMISTOLLA .....	29
6.1	Tehonjako .....	29
6.2	Oikosulku .....	29

6.3	Maasulku.....	31
7	KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N 110 KV ALUEVERKON SUOJAUS JA SEN MÄÄRITTELY POWERFACTORYLLA.....	32
7.1	Alueverkon suojauksen määrittely PowerFactorylla.....	32
7.2	Keskijänniteverkon suojauksen selektiivisyys sähköaseman ja asiakasmuuntamon välillä .....	32
8	POWERFACTORY KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N KÄYTÖSSÄ .....	33
9	KEHITYSIDEOITA .....	33
10	YHTEENVETO.....	34
	LÄHTEET .....	35
	LIITTEET .....	36
	LIITE 1: PowerFactory 2019 -ohjelmiston esite.....	36

## 1 JOHDANTO

Erilaisten sähköverkkojen toiminnan havainnollistamiseksi verkkoja voidaan kuvata eri tavoin, jotta sähköverkon käytettävyys helpottuu. Sähköverkko, joko siirto- tai jakeluverkko kuvataan nykyään hyvin yleisesti graafisia tietokonejärjestelmiä käyttäen. Ohjelmistot ja niiden eri osat sisältävät jokainen eri toiminnallisuuksia, soveltaen kuitenkin samoja periaatteita keskenään. Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena on selvittää PowerFactory-ohjelmiston käytettävyyttä sähköverkon mallinnuksessa. Opinnäytetyössä on mallinnettu Kuopion Sähköverkko Oy:n 110 kV alueverkko kokonaisuudessaan. Lisäksi työssä on mallinnettu suojauksen osalta pieni osa keskijänniteverkkoa. Työn aihe on saatu kesäharjoittelun aikana käyttöpäällikkö Simo Hyväriseltä Kuopion Sähköverkko Oy:ltä.

Työssä käsitellään esimerkkejä käyttäen verkon kuvausta ilman laskentaohjelmia, joista on mahdollista nähdä ohjelmistojen sisällä toimivia laskentatapoja. Suojauksesta suurjännitteisissä sähköjärjestelmistä kerrotaan yleisesti. PowerFactory-ohjelmistosta ja sen käytöstä on käsitelty ohjelman toiminnallisuuksia ja työn liitteeksi on liitetty lyhyt käyttöohje ohjelmiston käyttöön. Alueverkon kuvausta PowerFactory-ohjelmistolla on kuvattu tehonjaon, oikosulkujen ja maasulkujen osalta. Tuloksia on laskettu ohjelmistolla ja niitä on verrattu Fingridin laskentatuloksiin sekä muihin olemassa oleviin laskentatuloksiin. Työ valmistaa ohjelmiston käyttöönottoa Kuopion Sähköverkko Oy:n käyttöön.

Verkon suojausta on käsitelty PowerFactory -ohjelmistoa käyttäen. Relesuojaus on esitetty koestusdokumenttien, Fingridin tietojen ja relevalmistajien dokumenttien tietojen avulla mallinnuksessa. Työn viimeisellä osiolla on käsitelty työn tavoitteita ja niiden toteutumista sekä kehitysideoita tulevia ohjelmistolla tehtäviä töitä varten. Työn keskeisenä tavoitteena on tutustuminen PowerFactory -ohjelmiston hyödyntämiseen Kuopion Sähköverkko Oy:llä. Työn tulosten perusteella yritykseen tehdään kyseisen ohjelmiston hankinta. Työssä ei käsitellä kiskosuojausta, yli- ja alijännitesuojausta, taajuussuojausta eikä tahdissaolon valvontaa.

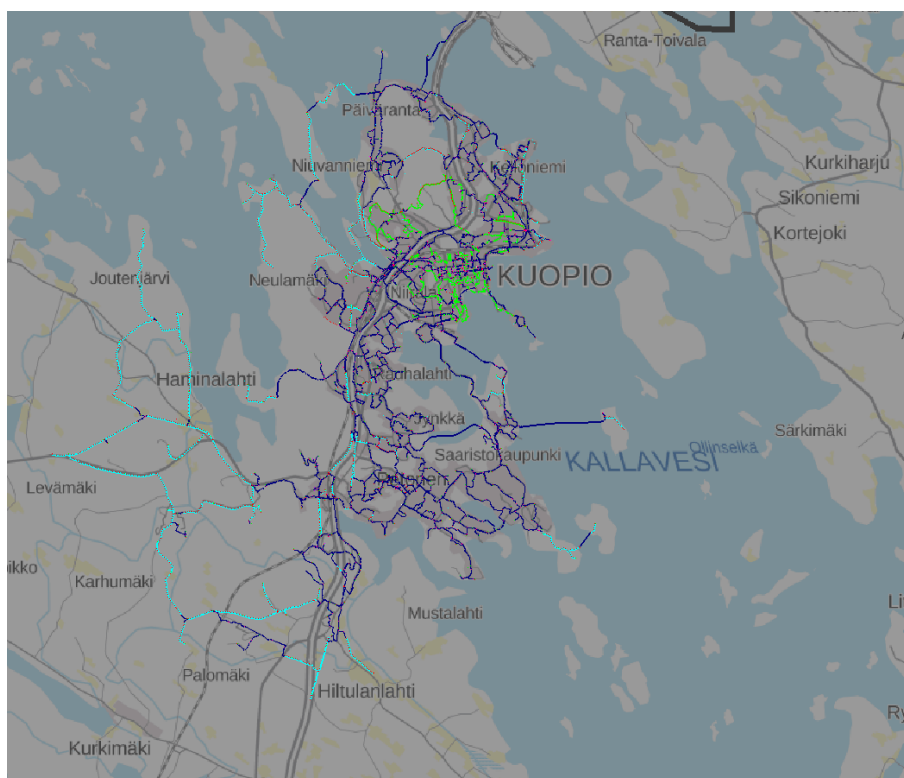
## 2 KUOPION SÄHKÖVERKKO OY

Kuopion Sähköverkko Oy on Kuopion kaupunkialueella toimiva sähkönjakeluyhtiö. Kuopion Sähköverkko Oy on osa Kuopion Energia -konsernia, jonka omistaa Kuopion kaupunki.

Kuopion Energia -konserniin kuuluu lisäksi Kuopion Energia Oy, johon kuuluvat energiantuotanto, kaukolämpö sekä konsernin hallinto. (Kuopion Sähköverkko Oy, 2018)

Kuopion Sähköverkko Oy:n sähkönsiirtoasiakkaiden määrä oli 58143 vuonna 2018. Keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon kaapelointiaste oli 81 %. Jakeluverkossa siirrettiin energiaa noin 600 GWh. Keskeytysaika asiakkaalle oli 6,6 min. (Kuopion Sähköverkko Oy, 2018)

Verkkoalue sijaitsee suurilta osin Kuopion keskeisellä kaupunkialueella rajoittuen Haminalahteen, Hiltulanlahteen, Kallaveden vesialueisiin sekä Sorsasaloon. Kuvassa 1 on esitetty verkkoalue keskijänniteverkon osalta. Keskijänniteverkon kokonaispituus on 504 km ja pienjänniteverkon 1143 km. (Kuopion Sähköverkko Oy, 2018)



KUVA 1. Kuopion Sähköverkko Oy:n verkkoalue (Kuopion Sähköverkko Oy)

Kuopion Sähköverkko Oy hallinnoi alueellaan 110 kV jännitteellä toimivaa alueverkkoa, jonka pituus on 13 km (Kuopion Sähköverkko Oy, 2018).

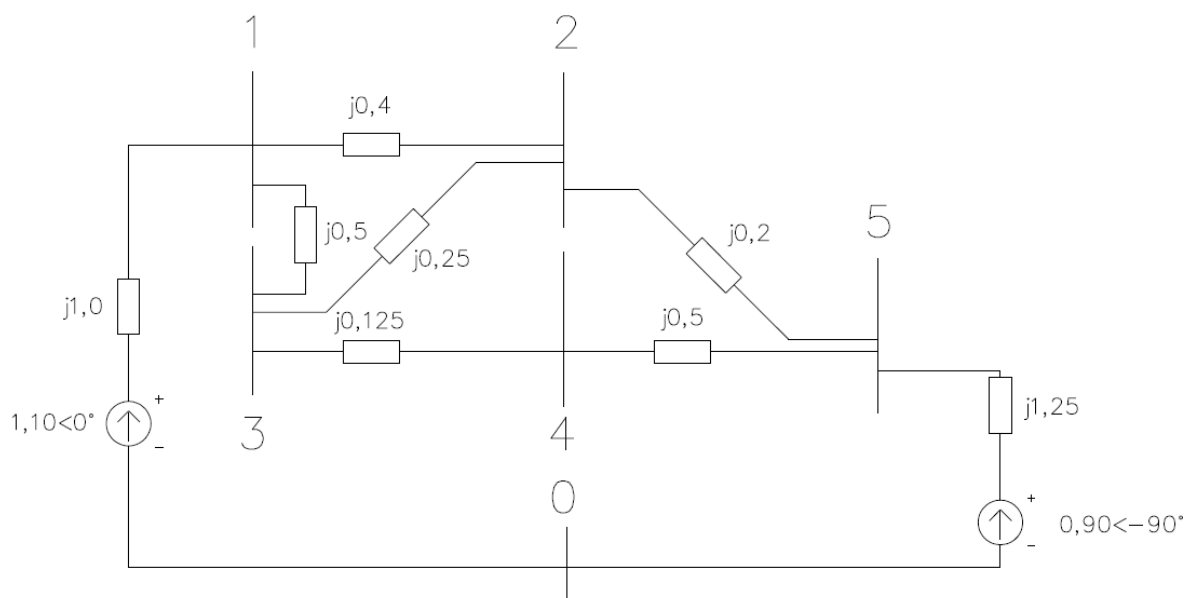


## 3 110 KV VERKON TEOREETTINEN TARKASTELU

Alueverkkoja voidaan kuvata käyttäen laskennallisia menetelmiä. Alueverkkojen suunnittelulaskelmissa verkko mallinnetaan matemaattisten mallien ja sijaiskytkentöjen avulla. Laskelmissa verkko kuvataan sillä tarkkuudella, kun se laskentatulosten tarkkuuteen nähden on mahdollista ja kannattavaa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 75)

Verkon laskentojen varten verkon pääosat kuvataan kuten kuormat, johdot, muuntajat, generaattorit sekä kompensointilaitteet. Lisäksi näistä tarkennetaan tiedot riittävällä tarkkuudella, kuten esimerkiksi kuormituksen vaihtelut ajan suhteen sekä johtojen, muuntajien, generaattorien ja kompensointilaitteiden tarkemmat tiedot. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 75)

Verkkoja on helpompi tietojen tarkkuuden tarpeen kannalta mallintaa staattisissa, kuin dynaamisissa tilanteissa. Yleisesti johtojen, muuntajien ja generaattoreiden arvot ovat melko hyvin tiedossa erilaisissa dokumentaatioissa. Kuormituksen vaihtelu on usein hankalampaa käsitellä ilman tarkempaa tietoa verkossa, jolloin joudutaan tekemään arvioita (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011). Kuormitusten vaihtelusta on yleisesti mahdollista saada tarkempaa tietoa energiamittauksien avulla. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki verkon kuvauksesta. Kyseisessä kuvassa verkko on kuvattu siten, että johdot on kuvattu reaktansseina suhteellisina arvoina ja tehoa syöttävät pisteet, kuten kantaverkko tai voimalaitos jännitelähteinä.



KUVA 2. Rengasmallisen sähkösiirtoverkon kuvaaminen reaktansseina ja jännitelähteinä (Rouvali, 2017), (Grainger & Stevenson, 1994)

### 3.1 Suhteelliset arvot verkostolaskennassa

Alueverkkojen ja muiden sähkösiirtoverkkojen laskennassa käytetään yleisesti suhteellisia arvoja absoluuttisten arvojen sijaan. Laskettavaa suuretta, esimerkiksi jännitettä verrataan johonkin valittuun tai laskettuun perusarvoon. Jännitereferenssin arvo valitaan mahdollisimman lähelle verkon perusarvoa, kuten 110 kV verkossa lähelle ykköstä olevaa arvoa. Suhteellisilla arvoilla laskeminen helpottaa laskemista siten, että esimerkiksi muuntajan kohdalla jännitetason vaihtuessa redusointia ei tarvita. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 141)

Suhteellisilla arvoilla laskettaessa laskusäännöt pätevät aivan samalla tavalla kuin absoluuttisia arvoja käyttäen, ainoastaan jännitteen osalta vaihe- ja pääjännitettä ei käsitellä erikseen (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 141).

Perusarvojen osalta valitaan tai arvioidaan kolmivaiheteho  $S_b$  sekä edellä mainittu jännitereferenssi  $U_b$ . Näitä arvoja käyttäen voidaan laskea esimerkiksi 110 kV alueverkon virran perusarvo, joka voidaan laskea kaavalla 1.

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} \quad (1)$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 141)

Impedanssi samaan verkkoon lasketaan kaavalla 2:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (2)$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 141)

Absoluuttiset arvot muutetaan suhteellisiksi arvoksi kaavan 3 mukaisesti:

$$\text{Suhteellinen arvo} = \frac{\text{Suurearvo}}{\text{Perusarvo}} \quad (3)$$

Suurearvo voidaan esittää missä tahansa yksikössä, mutta perusarvon on oltava samassa yksikössä kuin suurearvon.

## 3.2 Tehonjako

Alueverkoissa tehonjaon laskeminen on yksi tärkeimmistä verkkoon tehtävistä laskennoista. Laskennassa voidaan arvioida verkon käyttäytymistä erilaisissa kuormitusilanteissa. Lisäksi laskennan avulla voidaan arvioida, kuinka suuria häviöitä verkossa syntyy, kuinka voidaan jännitteitä säätämällä optimoida tehon siirtoa, kuinka verkko käyttäytyy jännitteen osalta eri kuormitusilanteissa, kuinka johtimet riittävät siirrettyyn tehoon nähden poikkipintojen ja kuormittumisen osalta sekä kuinka lämpenemää ilmenee, onko varavoiman tarvetta jossain tietyssä kuormitusilanteessa, kuinka paljon verkko tuottaa ja kuluttaa loistehoa, myös voidaan tarkastella jännitteen säätöä sekä verkon käyttäytymistä N-1- vikojen jälkeen. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 76)

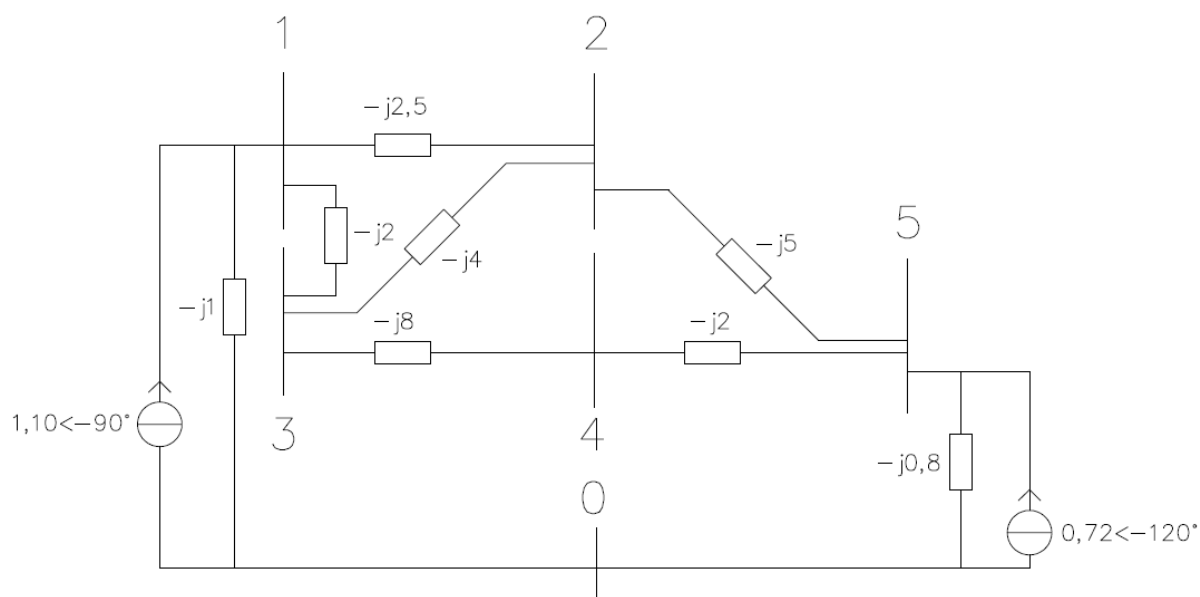
N-1-vikatilanteella tarkoitetaan sellaista vikaa, joka ei aiheuta verkossa merkittävää sähkön laadullista tai toimituksellista häiriötä.

Verkkojen käsinlaskenta voidaan suorittaa myös käyttäen silmukkamenetelmää verkon jännitteiden avulla. Harjoitustöissä saatujen kokemusten perusteella solmupistemenetelmä on silmukkamenetelmää yksinkertaisempi käsitellä. Tässä esimerkissä on käytetty laskentatapana solmupistemenetelmää.

Kuvassa 2 esitetyn verkon solmupistejännitteet eri pisteissä voidaan määrittää solmupisteyhtälöiden avulla. Solmupisteyhtälömatrisien muodostamiseksi verkko on esitettävä admittansseina ja virtalähteinä, jolloin se on muutettava kuvan 3 mukaiseksi.

Reaktanssit on muutettu admittansseiksi ottamalla reaktanssin arvosta käänteisarvo ja jännitelähteet on muutettu virtalähteiksi kaavalla 4:

$$\underline{I}_{\text{virtalähde}} = \frac{\underline{U}_{\text{jännitelähde}}}{\underline{X}_{\text{syöttöpiste}}} \quad (4)$$



KUVA 3. Rengasmallisen sähkösiirtoverkon kuvaaminen admittansseina ja virtalähteinä (Rouvali, 2017) (Grainger & Stevenson, 1994)

Eri pisteiden arvot syötetään matriiseihin, admittanssit suurempaan matriisiin ja virtalähteiden tiedot pienempään matriisiin. Matriisien ulkonäkö on taulukoiden 1 ja 2 mukainen.

TAULUKKO 1. Admittanssimatriisi A

$$\begin{bmatrix} -j5,5 & j2,5 & j2 & 0 & 0 \\ j2,5 & -j11,5 & j4,0 & 0 & j5 \\ j2 & j4,0 & -j14 & j8 & 0 \\ 0 & 0 & j8 & -j10 & j2 \\ 0 & j5,0 & 0 & j2 & -7,8 \end{bmatrix}$$

TAULUKKO 2. Virtalähteiden arvot -matriisi B

$$\begin{bmatrix} 1,1 \angle -90^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,72 \angle -120^\circ \end{bmatrix}$$

Näiden matriisien tulona kaavalla 5 saadaan laskettua solmupistejännitteet verkon eri pisteissä.

$$X = A^{-1}B \quad (5)$$

Tulos esitettyä suhteellisina arvoina matriisimuodossa:

TAULUKKO 3. Solmupistejännitteet verkon pisteissä 1-5

$$\begin{bmatrix} 0,99 \angle -9,92^\circ \\ 0,97 \angle -12,56^\circ \\ 0,98 \angle -12,20^\circ \\ 0,97 \angle -12,60^\circ \\ 0,96 \angle -14,22^\circ \end{bmatrix}$$

Jännitteiden arvoista voidaan nähdä verkon komponenttien vaikutus jännitteeseen. Kyseisessä esimerkissä ei ole otettu huomioon kuormituksia, verkossa ainoat vastustavat komponentit ovat verkon johdot.

Solmupistejännitteiden absoluuttiset arvot saadaan laskettua kaavalla 6:

$$\text{Suurearvo} = \text{Perusarvo} * \text{Suhteellinen arvo} \quad (6)$$

Tässä tapauksessa solmujännitteen  $U_1$  suurearvo on:

$$110 \text{ kV} * 0,99 \angle -9,92^\circ = 108,9 \angle -9,92^\circ \text{ kV}$$

### 3.3 Oikosulku

Oikosulkuvirtalaskenta on tehonjaon jälkeen seuraava hyvin merkittävä laskenta alueverkoissa verkon oikosulkukestoisuuden sekä suojausten kannalta. Oikosulkuvirtalaskennalla lasketaan verkon minimi- ja maksimioikosulkuvirtoja erilaisissa vikatilanteissa, kuten yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisissa oikosuluissa vaiheiden välillä. Lisäksi on tarpeen selvittää, kuinka verkko käyttäytyy jonkun komponentin, kuten päämuuntajan lauetessa verkosta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 76)

Oikosulun aiheuttamista vioista osa on symmetrisiä, jolloin vika näkyy kaikissa vaiheissa samantyyppisissä. Symmetristen vikojen laskennassa on mahdollista käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 166). Kolmivaiheinen oikosulku on kolmivaihejärjestelmässä vaikein vikatilanne. Oikosulkuvirrat voivat olla kolmivaiheisessa oikosulussa hyvin suuria, jopa 10-40 kertaisia nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna. (Elovaara & Laiho, Sähkölaitostekniikan perusteet, 1988, s. 74)

Oikosulkuvirtojen laskentaan vaaditaan tehonjakolaskennassa saadut solmupistejännitteiden tiedot, jotka on merkitty taulukkoon 3. Jännitearvoja käyttäen lasketaan valitun vikapisteen oikosulkuvirran arvo.

*"Oikosulku (kolmivaiheinen oikosulku, vikaresistanssi nolla) pisteessä 4 tarkoittaa sitä, että piste 4 ja referenssipiste menevät oikosulussa yhteen. Referenssipiste kannattaa käsittää kolmivaihejärjestelmän tähtipisteenä."* (Rouvali, 2017)

*"Tästä seuraa, että pisteen 4 ja pisteen 0 välille sijoitetaan impedanssi, jonka suuruus on  $0 \Omega$ . Admittanssiesityksessä pisteiden 4 ja 0 välillä on äärettömän suuri admittanssi. Tämä lisäys näkyy admittanssimatriisissa alkiossa (4,4) siten, että sen suuruus on äärettömän suuri. Lävistäjäalkio (4,4) tarkoittaa solmupisteeseen liittyvien admittanssien summaa! Tarkasti määriteltynä alkion (4,4) arvo on  $\infty - j10$ , mutta laskennallisesti saadaan sama tulos, jos arvoksi merkitään  $\infty$ ."* (Rouvali, 2017)

Admittanssimatriisi oikosulkuvirtaa pisteessä 4 laskettaessa on taulukon 4 mukainen.

TAULUKKO 4. Admittanssimatriisi oikosulkuvirtaa pisteessä 4 laskettaessa

$$\begin{bmatrix} -j5,5 & j2,5 & j2 & 0 & 0 \\ j2,5 & -j11,5 & j4,0 & 0 & j5 \\ j2 & j4,0 & -j14 & j8 & 0 \\ 0 & 0 & j8 & \infty & j2 \\ 0 & j5,0 & 0 & j2 & -7,8 \end{bmatrix}$$

Virtalähteiden arvoina käytetään taulukon 2 mukaista matriisia solmupistejännitteiden ratkaisemiseksi. Matriiseista ratkaistaan solmupistejännitteet oikosulkutilanteessa. Solmupistejännitteiden ratkaisemiseksi käytetään kaavaa 6, kuten tehonjakolaskennassa.

Tulos esitettynä suhteellisina arvoina matriisimuodossa:

TAULUKKO 5. Oikosulkuvirtalaskennan solmupistejännitteet

$$\begin{bmatrix} 0,33 \angle -4,46^\circ \\ 0,20 \angle -12,42^\circ \\ 0,10 \angle -8,84^\circ \\ 0 \\ 0,22 \angle -19,75^\circ \end{bmatrix}$$

Solmupistejännitteiden avulla voidaan laskea eri pisteistä tulevien oikosulkuvirtojen arvot. Tässä tapauksessa solmupisteet 3 ja 5 syöttävät vikapaikkaan oikosulkuvirtaa.

Solmupisteen 3 syöttämän oikosulkuvirran arvo voidaan laskea kaavalla 7:

$$\underline{I}_{3-4} = \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_4}{\underline{Z}_{3-4}} = \frac{0,10 \angle -8,84^\circ}{j0,125} = 0,83 \angle -98,84^\circ \quad (7)$$

Solmupisteen 5 syöttämän oikosulkuvirran arvo voidaan laskea kaavalla 8:

$$\underline{I}_{5-4} = \frac{\underline{U}_5 - \underline{U}_4}{\underline{Z}_{5-4}} = \frac{0,22 \angle -19,75^\circ}{j0,5} = 0,44 \angle -109,75^\circ \quad (8)$$

Solmupisteessä 4 vaikuttavan kolmivaiheisen oikosulkuvirran arvo lasketaan edellisten summana kaavalla 9:

$$\underline{I}_{3-4} + \underline{I}_{5-4} = 1,26 \angle -102,60^\circ \quad (9)$$

Oikosulkuvirran arvo suhteellisena arvona pisteen 4 kolmivaiheisessa oikosulussa on 1,26.

Kyseisessä verkossa määritellään perusjännitteen arvoksi 110 kV sekä perustehoksi 1000 MVA. Suuri perusteho johtuu oikosulkuvirtojen ja sitä myöten -tehojen hyvin suurista arvoista. Kaavalla 10 määritetään perusvirran arvo kyseisen verkon oikosulkuvirtojen suurearvojen laskentaa varten.

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{1000 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 110 \text{ kV}} = 5248,64 \text{ A} \quad (10)$$

, jossa  $S_b = 1000 \text{ MVA}$  ja  $U_b = 110 \text{ kV}$ .

Oikosulkuvirran arvo suurearvona pisteen 4 kolmivaiheisessa oikosulussa on kaavan 11 mukaan:

$$5248,64 \text{ A} * 1,26 \angle -102,60^\circ = 6613,3 \angle -102,6^\circ \text{ A} \quad (11)$$

### 3.4 Maasulku

Maasulkuvirtalaskenta kuuluu myös tärkeänä osana verkostolaskentaan. Maasulkuvirtalaskennassa lasketaan verkossa maasulkutilanteessa esiintyvät maasulkuvirrat. Maasulkutilanteet ovat epäsymmetrisiä poikittaisia vikatilanteita. Maasulkuja voi esiintyä yksi- ja kaksivaiheisina. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 167)

Maasulut ovat epäsymmetrisyytensä vuoksi laskennallisesti hankalampia käsitellä, kuin symmetriset oikosulkutilanteet (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 167). Epäsymmetrisessä viassa vaiheiden jännitteet ja virrat erovat keskenään. Epäsymmetrisiä vikatilanteita laskettaessa yksivaiheista sijaiskytkentää ei voida käyttää, koska verkko ei ole symmetrinen. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 177) Verkon jokaista vaihetta joudutaan käsittelemään yksinään.

#### 3.4.1 Symmetriset komponentit

Epäsymmetrisissä vikatilanteissa työkaluna voidaan käyttää symmetrisiä komponentteja, jonka avulla esimerkiksi jännitteet ja virrat esitetään kolmen symmetrisen komponentin  $\underline{U}_0, \underline{U}_1$  ja  $\underline{U}_2$  sekä  $\underline{I}_0, \underline{I}_1$  ja  $\underline{I}_2$  avulla. Näistä  $\underline{U}_0$  ja  $\underline{I}_0$  ovat nollajärjestelmän komponentteja,  $\underline{U}_1$  ja  $\underline{I}_1$  myötäjärjestelmän komponentteja sekä  $\underline{U}_2$  ja  $\underline{I}_2$  vastajärjestelmän komponentteja. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 177)

Myötäjärjestelmässä vaihejärjestys on normaali R-S-T ja vaiheiden välillä on normaali  $120^\circ$  vaihesiirto. Myötäjärjestelmän jännitteet kuvattuna R-vaihetta referenssinä käyttäen voidaan kuvata seuraavasti:  $\underline{U}_{R1} = \underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_{S1} = \underline{a}^2 \underline{U}_1$  ja  $\underline{U}_{T1} = \underline{a} \underline{U}_1$ , jossa  $\underline{a} = 1 \angle 120^\circ$  vaihesiirto sekä lisäksi

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ ja } \underline{a}_2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Vastajärjestelmässä pyörimissuunta on sama kuin myötäjärjestelmän, mutta vaihejärjestys on R-T-S. Vastajärjestelmän vaihejännitteet voidaan kuvata seuraavasti:  $\underline{U}_{R2} = \underline{U}_2$ ,  $\underline{U}_{S2} = \underline{a} \underline{U}_2$  ja  $\underline{U}_{T2} = \underline{a}^2 \underline{U}_2$ . (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 178)

Nollajärjestelmässä vaiheiden osoittimet ovat yhtä suuria sekä samansuuntaisia keskenään ja ne pyörivät samaan suuntaan kuin myötäjärjestelmän vaiheet. Nollajärjestelmän komponentit voidaan esittää seuraavasti:  $\underline{U}_{R0} = \underline{U}_{S0} = \underline{U}_{T0} = \underline{U}_0$ . (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 179)

Epäsymmetriset vaihejännitteet  $\underline{U}_R$ ,  $\underline{U}_S$  ja  $\underline{U}_T$  saadaan, kun lasketaan yhteen jokaisen järjestelmän vaiheiden komponentit seuraavien yhtälöiden avulla:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{R0} + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2}$$

$$\underline{U}_S = \underline{U}_{S0} + \underline{U}_{S1} + \underline{U}_{S2}$$

$$\underline{U}_T = \underline{U}_{T0} + \underline{U}_{T1} + \underline{U}_{T2}$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 179)

Edellä mainitut yhtälöryhmät R-vaiheen symmetristen komponenttien laskentaan ovat esitetty matriisimuodossa taulukossa 6.

TAULUKKO 6. R-vaiheen symmetristen komponenttien laskenta matriisimuodossa (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 179)

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{R0} \\ \underline{U}_{S0} \\ \underline{U}_{T0} \end{bmatrix}$$

Tätä matriisiyhtälöä kääntäen ratkaistuna voidaan ratkaista kyseisiä jänniteitä vastaavat symmetriset nolla-, myötä- ja vastajärjestelmien komponentit:

TAULUKKO 7. Epäsymmetrisiä jänniteitä vastaavien symmetristen komponenttien laskenta matriisimuodossa (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 180)

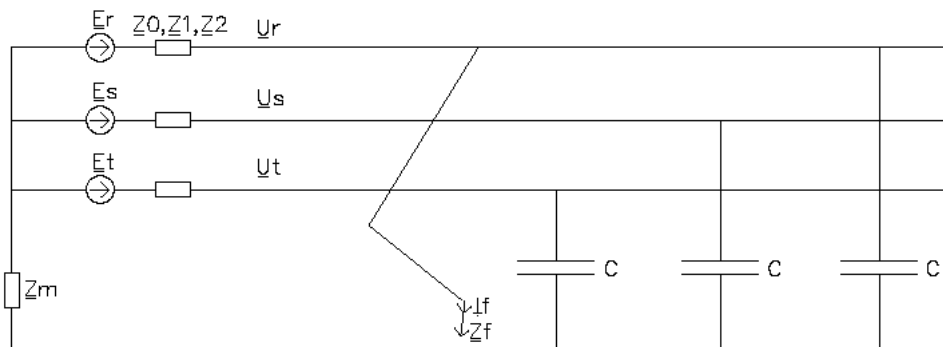
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{R0} \\ \underline{U}_{R1} \\ \underline{U}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix}$$

Samat matriisiyhtälöt pätevät myös virroille.



## 3.5 Verkon tähtipisteiden maadoitus

Kun epäsymmetrinen vika, kuten yksivaiheinen maasulku tapahtuu, verkon jännitteet muuttuvat. Verkon jännitteissä tapahtuu huomattavia muutoksia normaalitilanteeseen nähden. Aiheutuvien ylijännitteiden arvot riippuvat verkon eri tähtipisteiden maadoitustavoista.



KUVA 4. Yksivaiheinen maasulku tähtipisteestään maadoitetussa verkossa (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 209)

Kuvan 4 tarkkuus ei kerro vikavirran oikeaa sulkeutumistapaa, vaan on vain suurpiirteinen esitys viikakohdasta katsottuna. Oikeassa tilanteessa maasulkuvirta ei käyttyä yhtä suoraviivaisesti, vaan virta tulee verkosta joka puolelta ja lopulta sulkeutuu muuntajien ja generaattorien tähtipisteiden kautta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 209)

Vikavirta  $\underline{I}_f$  lasketaan kaavalla 12 vaiheen R yksivaiheisessa maasulussa:

$$\underline{I}_f = 3\underline{I}_0 = \frac{3\underline{E}_R}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 3\underline{Z}_f} \quad (12)$$

, jossa impedanssit  $\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$  ovat nolla-, myötä- ja vastajärjestelmien symmetriset komponentit. Nollaimpedanssi sisältää johtojen maakapasitanssit C sekä tähtipisteen ja maan väliset impedanssit  $\underline{Z}_N$ .

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 209)

### 3.5.1 Maasulkukerroin

Kanta- ja alueverkkojen maadoitustapa vaikuttaa suoraan suojauksen toimivuuteen. Esimerkiksi alueverkossa olevien päämuuntajien tähtipisteet jätetään maadoittamatta 110 kV tähtipisteestä tai vaihtoehtoisesti käytetään maadoituskuristinta. Maadoituskuristimilla pienennetään verkossa ilmenevien maasulkuvirtojen suuruutta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 212)

Maasulkutilanteen tapahtuessa niiden vaiheiden jännite nousee, jotka eivät ole maasulussa. Ylijännitettä voidaan kuvata maasulkukertoimen  $k$  avulla, joka kertoo maasulkutilanteessa terveen vaiheen suurimman esiintyvän vaihejännitteen ja verkon normaalin vaihejännitteen suhteen. Vian ilmetessä vaiheessa R, maasulkukerroin lasketaan kaavalla 13:

$$k = \frac{\max(U_{S_v}, U_{T_v})}{U_v} \quad (13)$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 213)

Terveet vaihejännitteet eroavat toisistaan vain vaihesiirtokulmien osalta, joten maasulkukertoimen laskenta pätee yhtä lailla molemmilla terveillä vaihejännitteellä (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 213).

Yleensä vikapaikasta mitattuna maasulkukerroin esitetään symmetristen komponenttien avulla. Verkon reaktanssit symmetrisinä komponentteina muodostuvat seuraavasti yhtälöryhmän 14 mukaisesti:

$$\begin{aligned} X_0 &= X + 3X_N \\ X_1 &= X \\ X_2 &= X_1 = X \end{aligned} \quad (14)$$

, jossa  $X$  = johdon reaktanssi ja  $X_N$  = verkon tähtipisteiden ja maan väliset reaktanssit

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 214)

Maasulkukerroin lasketaan tässä tapauksessa käyttäen verkon impedansseja.

Symmetrisillä komponenteilla esitettynä maasulkukertoimen kaavat eri muodoissa esitettynä ovat seuraavanlaiset:

$$\begin{aligned} \underline{k} &= \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{\sqrt{3}X_0 - j(X_0 + 2X_1)}{X_0 + 2X_1} \\ \underline{k} &= \sqrt{3} \frac{\sqrt{X_0^2 + X_0X_1 + X_1^2}}{X_0 + 2X_1} \end{aligned} \quad (15)$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 214)

Maasulkukerrointa käsitellään erilaisissa voimansiirtoverkoissa  $X_0 / X_1$  - reaktanssisuhdetta käyttäen. 110 kV verkoissa maasulkukertoimen arvo voi olla 1,7, koska verkossa maasulun aiheuttaman jännitemuutoksen vaatimat verkon mitoitusarvot ovat halvempia, kuin esimerkiksi 220 kV ja 400 kV jännitetasoilla. Maasulkukertoimeen voidaan vaikuttaa suoraan kyseiseen reaktanssisuhteeseen vaikuttaen esimerkiksi muuntajien tähtipisteiden maadoitustavalla tai maadoittamatta jättämisellä sekä maadoituskuristimen kautta maadoitetun muuntajan maadoituskuristimen reaktanssin avulla. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 214)

110 kV verkoissa kaikkien muuntajien tähtipisteitä ei maadoiteta, kuten Kuopion Sähköverkko Oy:n tapauksessa vain Vahtivuoren sähköaseman päämuuntajan yläjännitepuolen tähtipiste on maadoitettu maadoituskuristimen kautta. (Hyvärinen, 2019)

### 3.6 Maadoitustavat suurjännitteisissä sähköjärjestelmissä

Suurjännitteiset sähköjärjestelmät on maadoitettu eri tavoin. Alue- ja siirtoverkoissa käytetään yleisesti tehollista maadoittamista muuntajien tähtipisteiden kautta.

Keskijänniteverkoissa verkon koko vaikuttaa maadoitustavan valintaan. Suuremmissa keskijänniteverkoissa on käytettävä sammutusta maasulkuvirtojen aiheuttamien kosketusjännitteiden nousun vuoksi. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 337), (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 210)

#### 3.6.1 Maadoitustavat alue- ja kantaverkoissa

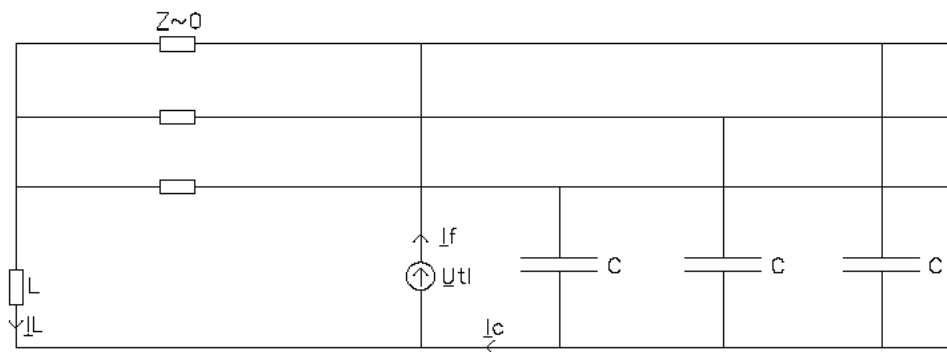
Yli 45 kV eli alue- ja siirtoverkkotasolla verkkojen maadoitustavat ovat erilaisia kuin keskijänniteverkoissa joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Esimerkiksi Lapin 110 kV verkossa käytetään maadoitustapana sammutusta. Yleisesti 110 kV alue- ja siirtoverkot sekä 220 kV ja 400 kV verkot ovat tehollisesti maadoitettuja muuntajien tähtipisteistä joko suoraan tai virranrajoituskuristimen kautta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 211), (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 337)

Alue- ja siirtoverkoissa käytetään tehollista maadoittamista siksi, että sillä saadaan vähennettyä maasulkutilanteessa jänniteiden nousua vaiheissa, jotka eivät ole maasulussa. Lisäksi tällä maadoitustavalla saadaan maasulkuvirta tietylle tasolle, jotta suojaus voidaan toteuttaa oikein. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 337)

#### 3.6.2 Maadoitustavat keskijänniteverkoissa

Keskijännitteellä verkot ovat maasta erotettuja tai sammutettuja. Maasta erotettu verkko tarkoittaa sitä, ettei sitä ole tähtipisteestä maadoitettu tai se on maadoitettu impedanssin, kuten johtojen maakapasitanssien aiheuttaman nolliimpedanssin kautta. Verkon maadoitus verkon tähtipisteen ja maan

väliltä sammutuskuristimella tarkoittaa sitä, että verkkoon on kytketty kyseiselle välille sammutuskela, jota voidaan säätää eri käyttötilanteen mukaan. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki maasulun sammutuksesta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 210)



KUVA 5. Esimerkki maasulun sammuttamisen toteutuksesta maan ja tähtipisteen välillä kytketyllä kelalla (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 211)

#### 4 SUOJAUS SUURJÄNNITTEISISSÄ SÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ

Suurjännitteisen sähköjärjestelmän suojausten kokonaisuuteen kuuluvat mittamuuntajat, suojareleet ja katkaisijat, jotka toimivat nimellisarvojen ja asetteluarvojen mukaisesti sähköverkossa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 335)

Tässä työssä käytetään tätä kyseistä määritelmää, kun puhutaan suojausjärjestelmästä. Tässä työssä käsitellään suurjännitteisten sähköverkkojen, kuten 110 kV alueverkon johto- ja muuntajalähtöjen suojausten kokonaisuutta pois lukien kiskosuojat, jännitereleet ja tahdistusreleet sekä keskijänniteverkon ylivirtasuojauksen selektiivisyyttä verraten asiakasmuuntamon suojauksiin.

Standardissa SFS 60050-448 on kerrottu suojausjärjestelmän toiminnasta seuraavasti:

*"Standardin SFS 60050-448 mukaan sana suojausjärjestelmä (protection system) on tarkkaan rajattu sisältäen suojauslaitteet, mittamuuntajat, johdotuksen, laukaisupiirin, teholähteet sekä mahdollisesti myös tiedonsiirtojärjestelmän ja jälleenkytkentäautomatiikan mutta ei katkaisijoita."* (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 1, 2011, s. 335)

Relesuojausjärjestelmä, joka on toteutettu suunnitelmallisesti ja hyvin, toimii varmasti ja luotettavasti erilaisissa vikatilanteissa. Hyvä relesuojausjärjestelmä on selektiivinen, joka erottaa pelkästään vikaantuneen osan verkosta aiheuttamatta suurempaa keskeytystä muulle verkolle. Releen toiminnassa toimintanopeus on oleellisin osa vikavirtojen vaikutusten vuoksi. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 343)

#### 4.1 Suurjännitteisten sähköjärjestelmien suojauksen määrittely

Standardissa SFS 60050-448 kerrotaan suojauksen tarkoituksesta sähköjärjestelmässä seuraavasti: *"Standardin SFS-IEC 60050-448 mukaan suojauksen (protection) tarkoitus on havaita viat tai epänormaalit olosuhteet voimajärjestelmässä, jotta viat voidaan selvittää tai epänormaalit olosuhteet saadaan loppumaan. Suojarele (protection relay, protective relay) on mittaava rele, joka on suojareleistyksen (protection equipment, relay system) ja samalla koko suojausjärjestelmän (protection system) osa."* (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 335)

Jos oiko- tai maasulku tapahtuu verkossa, on viallinen verkon osa erotettava muusta sähköverkosta lisävahinkojen estämiseksi verkossa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 336)

Sähköturvallisuuslaissa 1135/2016 vaatimukset sähköverkoille on ilmoitettu seuraavasti:

*"Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että*

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;*
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti."* (Sähköturvallisuuslaki, 1135/2016)

#### 4.2 Suurjännitteisten sähköjärjestelmien suojauksen toiminta

Suojareleet toimivat siten, että ne havaitsevat mittamuuntajien mittaamien tulosten perusteella virroissa tai jännitteissä releen toiminnan vaativia muutoksia. Kun muutos mittauksissa tapahtuu, rele toimii asetettujen arvojen mukaisesti ja havahtuu. Arvon muutoksen pituuden ollessa riittävän pitkä, yleisin käytetty toiminta on se, että rele suorittaa laukaisukäskyn katkaisijalle sekä aiheuttaa hälytyksen. Tätä väliaikaa vian ilmettyä kutsutaan toiminta-ajaksi. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 344)

Mittaussuureen poistuttua joko havahtumisaikana tai releen aiheutettua katkaisijan laukaisu, rele palautuu ja indikoi vikatilanteen, jonka aiheuttamana se on toiminut. Palautumisaika releillä on aika, joka ilmenee mittaussuureen poistumisen ja palautumisen välillä. Vian erotusajalla tarkoitetaan vian alkamisen ja vikapaikan erottamisen välistä aikaa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 344)

#### 4.3 110 kV ja 20-10 kV johto- ja muuntajalähdöillä käytettävät releet

Alue- ja jakeluverkoissa käytettävät releistykset eroavat suurilta osin toisistaan. Näiden jännitetasojen välillä käytetään kuitenkin joitain samoja reletyyppisiä, kuten ylivirta- ja maasulkureleitä. Verkkojen suojausten eroavaisuus riippuu verkon kytkentätyypistä, keskijänniteverkot ovat suurilta osin säteittäisiä tai rengasmaisia verkkoja, jotka on mahdollisia kytkeä lohkorajojen kautta yhteen ja alue- ja siirtoverkot yleisesti rengasmaisia, jolloin ei voida käyttää samoja suoja, kuin jakeluverkoissa.

#### 4.4 110 kV alueverkoissa käytettävät releet

Alueverkoissa käytetään johtojen ja muuntajien suojarleinä distanssi-, differentiaali-, nollavirta- ja maasulkureleitä sekä ylivirtareleitä. Yleisesti käytetyin pääsuoja alue- ja siirtoverkoissa on distanssi-rele, mutta esimerkiksi lyhyissä aluejohdoissa tai sarjakompensoiduissa johdoissa käytetään yleisesti pääsuojana distanssireleen lisäksi differentiaalisuojaa. Ylivirtareleitä käytetään rengasmallisessa alue- tai siirtoverkossa varasuojina niiden toiminnallisuuden vuoksi. Nollavirtareleitä sekä suunnattuja maasulkureleitä käytetään verkoissa maasulkusuojina, yleisesti varasuojina distanssi- tai differentiaalireleille. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011)

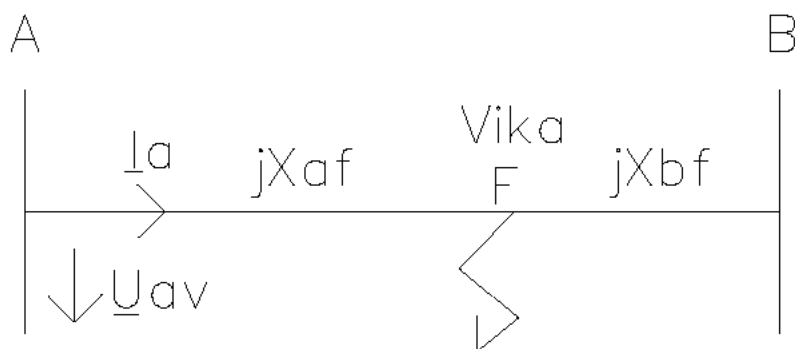
Johto- ja muuntajalähtöjen releistyksen jälkeen lisäksi on olemassa kiskosuojat, jotka toimivat siten, että vian sattuessa aseman 110 kV kiskostoon, kiskosuoja laukaisee kaikki katkaisijat auki kyseiseltä kiskolta. (Hyvärinen, 2019)

##### 4.4.1 Distanssirele

Distanssireleitä käytetään yleisesti pääsuojana silmukoiduissa suurjännitteisissä sähköverkoissa. Distanssireleen toiminnallisuuksiin kuuluu muun muassa se, että rele pystyy havaitsemaan vian suunnan. Silmukoidun verkon vuoksi vika voi tulla releeseen nähden etu- tai takapuolelta. Distanssireleitä käytetään silmukoiduissa verkoissa siksi, että ylivirtareleellä ei pystytä havaitsemaan vikavirtojen suuntia. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 348)

Distanssireleillä suojataan verkkoa oiko- ja maasuluilta. Distanssirele mittaa mittamuuntajia käyttäen suojattavan johdon vaihejännitteitä ja -virtoja. Rele laskee näiden tietojen avulla impedanssin. Impedanssin avulla rele määrittää vian sijainnin. Lisäksi distanssirele arvioi johdon reaktanssin mukaan vian suunnan jännitteen ja virran välistä vaihesiirtokulmaa käyttäen. Alue- ja siirtoverkoissa reaktanssi on määräävässä osassa johtoa, resistanssin arvon ollessa hyvin pieni. Vian ollessa releen etupuolella, vikavirta on siinä tapauksessa induktiivista loisvirtaa, joten virta on jännitettä jäljessä  $90^\circ$ . Vian ollessa releen takapuolella, eli johdolla, jota ei suojata, virta on jännitettä edellä  $90^\circ$ . Rele havaitsee tämän, eikä aiheuta virhelaukaisua. Uusilla distanssireleillä käytetään 10 % virtaherkkyyttä nimellisvirrasta, vikavirran ollessa tätä pienempi, ja tilanteessa, jossa jännite olisi nolla, rele ei siltikään havaitse vikaa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 348)

Distanssirele laskee virtojen ja jännitteiden avulla impedanssin suojattavalla johto-osalla. Distanssireleen toiminta on havainnollistettu kuvassa 6.



KUVA 6. Distanssireleen toimintaperiaate (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 349)

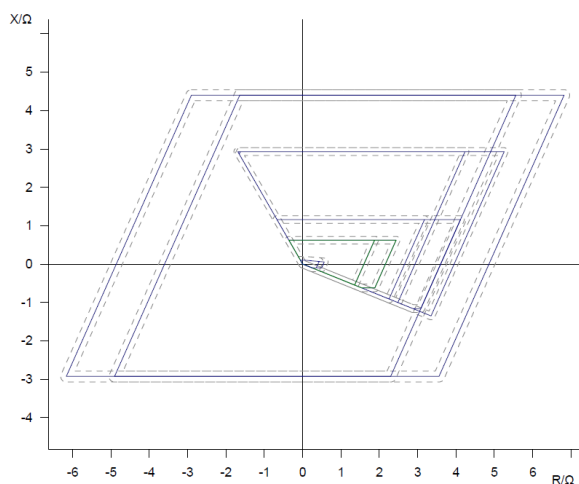
Kuvassa on esitetty kahden aseman välisen johdon suojaus distanssireleellä. Johdon puolivälin tienoille tulee vika, johdon distanssirele havahtuu ja suorittaa laukaisun. Rele mittaa alkupään asemalla jännitteen  $\underline{U}_{av}$  sekä virran  $\underline{I}_a$ . Rele määrittää näiden tietojen avulla impedanssin, josta voidaan määrittää reaktanssin arvo vikapaikassa.

Johdon kokonaisreaktanssi lasketaan kaavalla 16:

$$X = X_{af} + X_{bf}. \quad (16)$$

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 349)

Distanssireleiden asettelut voidaan esittää asettelukuviolla, joka sisältää  $(R, X)$  koordinaatiston, johon sijoitetaan releen resistanssi- ja reaktanssiasettelut. Asettelut ovat vyöhyketyypisiä. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 350) Esimerkki nykyaikaisen distanssireleen asettelukuviosta on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Distanssireleen asettelukuviio (Kuopion Sähköverkko Oy)

#### 4.4.2 Differentiaalirele

Differentiaalireleitä käytetään yleisesti pääsuojana lyhyillä tai sarjakompensoiduilla johtoväleillä suurjännitteisissä sähköverkoissa. Differentiaalireleen toiminta perustuu erovirtaan, rele toimii siihen tulevien ja siitä lähtevien vaihevirtojen erotessa toisistaan asetteluarvon verran. Normaalitilanteessa virtojen summa on nolla virtojen lävistäessä releen mittauksen. Vian ilmetessä rele havaitsee virroissa muutoksen sekä vikavirtojen kulkeutumisen vikakohdetta päin. Differentiaalireleiden käyttö vaatii viestiyhteiden releiden välillä, yleisesti käytetään valokuituyhteyttä releiden välillä. Differentiaalireleellä voidaan suojata vain yksi johtolähtö tai muuntaja. Differentiaalirele on käytössä hyvin nopea rele. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 355)

Differentiaalirele vaatii yleisesti läpi kulkevaan virtaan verraten huomattavasti suuremman virtaeron toimiakseen. Suurilla kuormitusvirroilla virtamuuntajien ja käämikytkimien aiheuttamat virheet ovat merkittävämpiä, kuin pienillä kuormitusvirroilla. Differentiaalireleissä on tätä varten kuormitusvirtaan vertaava virtaeron tarkastelu, eli stabilointi tai vakavointi. Tällä estetään suojausalueen lähellä olevien vikojen aiheuttamat virhelaukaisut. Vakavoinnin avulla poistetaan käämikytkimien aiheuttamat muutokset erovirrassa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 355)

Differentiaalisuojia käytetään muuntajien pääsuojina sekä niillä voidaan suojata pieniä kiskorakenteita. Differentiaalisuoja, joka toimii muuntajan suojana, pystyy havaitsemaan viat, kuten oiko-, maa-, käämi- ja kierrossulut, jotka tuottavat riittävän erovirran. Tähtipisteestään maadoitettujen muuntajien osalta differentiaalireleen mittaamasta erovirrasta poistetaan nollakomponentti. Muuntajan kytkentäryhmän ollessa joku muu kuin nolla, erovirrassa on otettava huomioon kulmaero. Releille ohjelmoidaan suojattavan muuntajan kytkentäryhmä. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 355)

#### 4.4.3 Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele

Nollavirtareleitä ja suunnattuja maasulkureleitä käytetään suurjännitteisissä sähköverkoissa johtojen maasulkusuojana. Nollavirtarele mittaa vaihevirtojen summavirtaa. Nollavirtareleellä ei voida tunnistaa vian suuntaa. Nollavirtareleiden asettelut voivat olla herkkiä tai karkeita. Herkällä nollavirtareleellä virran asettelu on pieni, mutta hidastus pitkä sekä karkealla nollavirtareleellä virran asettelut otetaan laskelmista ja niiden osalta hidastus on lyhyt. Nollavirtareleitä voidaan myös käyttää muuntajien maasulkusuojana differentiaalireleen lisäksi. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 353)

Suunnattu maasulkurele toimii siten, että se mittaa vaiheiden vikavirtojen lisäksi nollajännitettä, joka muodostuu muuntajan tähtipisteeseen maasulun aiheuttamana sekä näiden välistä vaihekulmaa. Suunnatulla maasulkuvirralla voidaan havaita vian suunta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 354)



#### 4.4.4 Ylivirtarele

Ylivirtareileitä käytetään silmukoiduissa suurjännitteisissä sähköverkoissa yleisesti varasuojina, koska ylivirtarele ei toimi pääsuojana silmukoidussa verkossa ominaisuuksiensa vuoksi. Ylivirtarele suorittaa laukaisun nimensä mukaisesti mitatun virran ylittäessä asetellun arvon. Ylivirtareleistä yleisesti käytettyjä vaihtoehtoja ovat vakioaikaylivirtarele sekä käänteisaikaylivirtarele. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 346)

Vakioaikaylivirtarele toimii siten, että rele havahtuu asetetun arvon ylittyessä asetellun ajan verran, jonka jälkeen rele suorittaa katkaisijan laukaisun. Virran pudottua alle asetteluarvon, rele päästää, mutta yleisesti katkaisija jää tässä vaiheessa auki ja vaatii toimenpiteen kiinni laittamiseksi. Vakioaikaylivirtareileitä voidaan käyttää monenlaisissa suojauksissa, ainoa poikkeus on rengasmaiset verkot. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 346)

Käänteisaikaylivirtarele toimii siten, että toiminta on hidastettu virtaan verraten käänteisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että rele on nopeampi suurivirtaisissa kuin pienivirtaisissa vioissa. Käänteisaikaylivirtareileitä voidaan käyttää myös silmukoidussa sähköverkossa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot 2, 2011, s. 346)

#### 4.5 20-10 kV jakeluverkoissa käytettävät releet

Keskijännitteisissä jakeluverkoissa käytettävät releitä tässä tarkastelussa on hieman vähemmän ja useat toiminnallisuudet ovat samoja, kuin suurjännitteisissä siirto- ja alueverkoissa. Jakeluverkoissa suojaukset toteutetaan yleisesti ylivirta- ja maasulkureleet sisältävillä relemoduuleilla, kuten Strömbergin SPCJ- tai ABB:N RE-sarjoilla.

Ylivirtarelesuojauksessa johto- ja muuntajälähtöjen osalta käytetään vakioaikaylivirtareileitä. Rele havaitsee verkossa asetteluaan suuremman virran ja asetellun ajan jälkeen toimii ja aiheuttaa katkaisijan laukaisun. Ylivirtareleen asettelu asetetaan suurimman kuormitusvirran ja pienimmän kaksivaiheisen oikosulkuvirran väliin. Aika-asettelu asetellaan verkon suojauksen selektiivisyyden kannalta oikein. Muuntajälähdöillä ylivirtasuojaa suojaa muuntajan alajännitepuolelta kiskolle päin. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 176) (Hyvärinen, 2019)

Maasulkurelesuojauksessa mitataan verkon vaihevirtojen epäsymmetriaa sekä nolajännitettä verkon tähtipisteessä. Vaihevirtoja mitataan yleisesti kaapelivirtamuuntajalla. Maasulun tapahtuessa vaiheiden virroissa tapahtuu suunnanmuutoksia, vikavirta pyrkii maasulun aikana vikakohdetta päin. Maasulkuvirtojen suuruudet vaihtelevat keskijänniteverkon maadoitustavan ja verkkorakenteen mukaan. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 186)

## 5 DIGSILENT POWERFACTORY-OHJELMISTO JA SEN KÄYTTÖ

PowerFactory on saksalaisen DIgSILENT GmbH:n julkaisema erilaisten sähköverkkojen mallintamiseen ja analysointiin käytettävä ohjelmisto. Ohjelmisto mahdollistaa esimerkiksi sähköverkkojen mallinnuksen ja analysoinnin tuotannosta siirron ja jakelun kautta loppukäyttäjille saakka. Ohjelmisto sisältää myös ominaisuuden, jolla mahdollistetaan rajapintaliitynnät esimerkiksi SCADA:an. (DIgSILENT GmbH, 2019)

### 5.1 DIgSILENT GmbH

DIgSILENT GmbH on saksalainen, vuonna 1985 perustettu ohjelmisto- ja konsultointiyritys. Yritys tarjoaa palveluita sähkön siirron, sähkön jakelun, tuotannon, teollisuuden ja uusiutuvien energianlähteiden aloilla. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Gomaringenissä Saksassa. (DIgSILENT GmbH, 2019)

Yritys on laajentumassa ympäri maailmaa mm. Australiaan ja USA:han. Yritys on toimittanut palveluita ja ohjelmistoja yli 140 maahan. Yrityksellä ei ole toimistoa Suomessa. Yrityksen tuotteita ovat PowerFactory ja StationWare. Lisäksi yritys tarjoaa palveluita ja laitteita sähköverkon monitorointiin. (DIgSILENT GmbH, 2019)

Kuvassa 8 on esitetty DIgSILENTin pääkonttori Gomaringenissä, Saksassa.



KUVA 8. DIgSILENTin pääkonttori (DIgSILENT GmbH, 2019)

### 5.2 Yleistä ohjelmistosta ja sen käytöstä

PowerFactory-ohjelmisto muodostuu useasta erilaisesta ohjelmaosasta. Ohjelman runko muodostuu verkkojen kuvausten mahdollistavista piirtoalustoista ja erilaisista komponenttimalleista. Ohjelman laskennan osalta päärunko muodostuu Base Packagesta, joka sisältää verkkojen peruslaskentaan tarvittavat osat, kuten tehonjaon ja oikosulkuvirtojen laskennat.

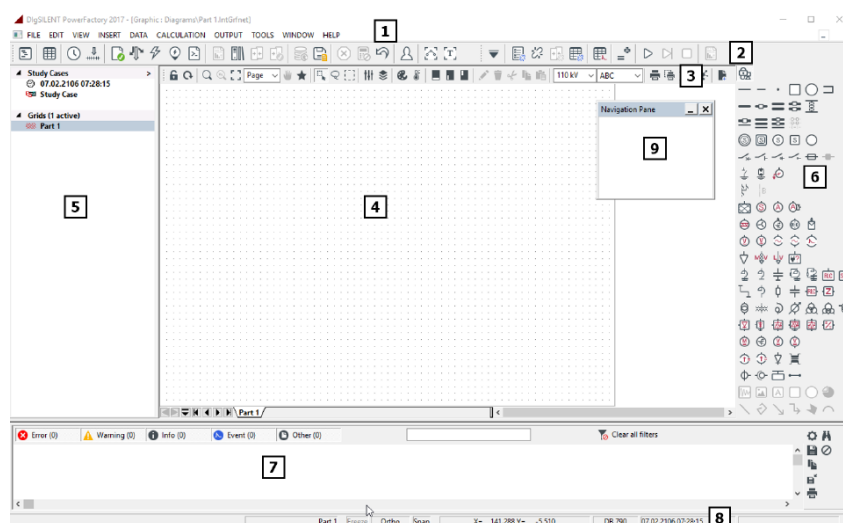
Ohjelmiston lisäominaisuudet kuuluvat Advanced Features -pakettiin. Advanced Features sisältää varmuuslaskentaan, tehonjakolaskentaan tietyllä aikavälillä, suojausten mallintamiseen, valokaariin, sähkön laatuun sekä muun muassa transienttilyijännitteisiin liittyvät ohjelmaosat. Ohjelmiston uusimman version esite on esitetty liitteessä 1.

PowerFactory -ohjelmisto mahdollistaa eri jännitetasoisten sähköverkkojen tarkan mallinnuksen. Ohjelma ei ole jännitetasosta riippuvainen, koska se käyttää omissa laskennoissaan suhteellista laskentaa. Ohjelmistotoimittaja on laatinut ohjelmiston käyttöön pikaohjeen, joka löytyy ohjelmiston työkalupalkista tai ohjelmistotoimittajan verkkosivujen rekisteröityneiden käyttäjien osiosta.

Uuden projektin aloitus alkaa projektin tietojen luomisella, johon kuuluvat mm. projektin nimen ja mallinnettavan verkon syöttäminen. Sen jälkeen piirtoalustalle aletaan syöttää verkon eri tietoja, kuten tässä harjoitustyössä sähköasemia ja niiden välisiä aluejohtoja. Tässä harjoitustyössä sähköasemien katkaisijat, erottimet, virta- ja jännitemuuntajat sekä releet ovat syötetty viimeisimpänä.

Ohjelmiston piirtoalusta näyttää perustilassaan kuvan 9 mukaiselta. Numeroidut osat ovat seuraavanlaiset:

1. Valikkorivi
2. Ohjelman eri toimintojen kuvakkeet, kuten tehonjakolaskenta ym.
3. Piirtoikkunan työkalut
4. Piirtoalue
5. Projektin yhteenveto
6. Piirustuskomponenttivalikko
7. Ilmoitusikkuna
8. Tilaindikaattori
9. Navigointi-ikkuna



KUVA 9. PowerFactoryn projektin luonnin jälkeinen perusnäyttö

### 5.3 Ohjelmiston hankinta

Ohjelmisto on mahdollista hankkia opinnäytetyö- tai tutkimustarkoitukseen erikseen siihen tarkoitettulla lisenssillä. Oppilaitoksille on myös olemassa oma lisenssityyppi. Tätä opinnäytetyötä varten on hankittu PF4T-lisenssi melkein kaikilla Advanced Features -paketin lisäominaisuuksilla muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta rajoittamattomalla solmupistemäärällä. Ohjelmisto on mahdollista hankkia kyseiseen käyttöön hakemuksella.

Ohjelmiston hankinta yrityskäyttöön toteutetaan siten, että valitaan omaa tarvetta vastaavat ohjelmaosat, jonka jälkeen ohjelmistotoimittaja tekee tarjouspyynnön perusteella tarjouksen ohjelmistosta. Ohjelmisto on mahdollista hankkia joko yhdelle tai useammalle työasemalle joko paikallisena tai verkkoasennuksena. Ohjelmisto on mahdollista myös asentaa Citrix- tai vastaavaan ympäristöön. Ohjelmiston eri osien hinnat eroavat toisistaan, joten ohjelman lopullinen hankintahinta riippuu ohjelmaosista sekä lisenssityypistä.

Ohjelmistotyytit selitettynä ovat: PF4C on normaali kaupallinen lisenssi, PF4R on tutkimuslisenssi, PF4E opetuskäyttöön oleva lisenssi, PF4S oppilaslisenssi sekä PF4T opinnäytetyölisenssi. (DIgSILENT GmbH, 2019)

TAULUKKO 8. Yhteenveto PowerFactoryn lisenssityypeistä (DIgSILENT GmbH, 2019)

	<b>PF4C</b>	<b>PF4R</b>	<b>PF4E</b>	<b>PF4S</b>	<b>PF4T</b>
<b>Licensing</b>	Softkey or USB Dongle <sup>3</sup>	Softkey or USB Dongle <sup>3</sup>	Softkey or USB Dongle <sup>3</sup>	Softkey	Softkey
<b>Database</b>	Individual oder Multi-user (Oracle, SQL)	Individual	Individual	Individual	Individual
<b>Installation Platforms</b>	Local: MS-Windows 7, 8 or 10 Application server: MS-Server (2008, 2008 R2, 2012, 2012 R2, and 2016) or Citrix Terminal Service	MS-Windows 7, 8 or 10	MS-Windows 7, 8 or 10	MS-Windows 7, 8 or 10	MS-Windows 7, 8 or 10
<b>Supported Editions</b>	Single-/Multi-User or Team	Multi-User	Multi-User	Single-User	Single-User

## 6 KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N 110 KV ALUEVERKON KUVAUS POWERFACTORY-OHJELMISTOLLA

Alueverkko sekä sähköasemat on mallinnettu riittävällä tarkkuudella, jotta tehonjako-, oikosulku- ja maasulkulaskennat on saatu toimiviksi ja ne vastaavat todellisuutta. Suojauksen tarkastelun kannalta suojaukseen tarvittavat komponentit on kuvattu riittävällä tarkkuudella.

### 6.1 Tehonjako

Tehonjaon kannalta tarkasteluun on tarkasteltu erästä tehotilannetta talvelta 2019. Kuormitus on hieman talven huippukuormituksia pienempi. PowerFactoryyn kantaverkon syöttöpisteiden ja generaattoreiden pätö- ja loistehot sekä päämuuntajien alajännitepuolen näennäistehot ja  $\cos \varphi$ :t syötettäessä tehonjakolaskenta vastaa mitattuja tuloksia hyvin. Arvot ovat melko hyvin linjassa mitattuihin tuloksiin pois lukien joitain pieniä laskentatarkkuudesta johtuvia muutoksia. Kaiken kaikkiaan laskentatulokset näyttävät oikeanlaisilta.

Tehonjaon laskentaa käyttäen on mahdollista muuttaa tehojen arvoja ja seurata verkon kuormitustilanteen muutosta eri tilanteissa. PowerFactoryn laskennat ovat myös päteviä johtojen ym. loistehotarkasteluun. PowerFactoryssa on myös mahdollista Quasi-Dynamic Simulation -ohjelmaosaa käyttäen mallintaa tuntisarjoja laskennassa, mutta tässä opinnäytetyössä kyseistä ominaisuutta ei ole tarkasteltu tarkemmin.

### 6.2 Oikosulku

Oikosulkuvirtojen osalta tarkasteluun on otettu koko alueverkon alueen sähköasemien kiskojen kolmivaiheisessa oikosulkutilanteessa aiheutuva maksimioikosulkuvirta. Maksimioikosulkuvirtatilanteessa kantaverkossa tuotanto on suurimmillaan. Lisäksi Haapaniemen voimalaitoksen generaattorit ovat käytössä ja syöttävät maksimioikosulkutilanteen mukaisia oikosulkuvirtoja. Taulukossa 9 on esitetty Fingridin vuodelle 2019 laskemien maksimioikosulkuvirtojen arvot. Taulukossa 10 on esitetty PowerFactorylla lasketut maksimioikosulkuvirtojen arvot. Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, joten voidaan todeta PowerFactoryn laskevan tulokset oikein. Oikosulkuvirtojen osalta voidaan laskea tässä tilanteessa Fingridin laskemiin vuosittaisiin tuloksiin verraten, vuonna 2020 arvot eroavat jo näistä arvoista.

TAULUKKO 9. Fingridin laskemat kolmivaiheiset maksimioikosulkuvirrat vuodelle 2019 Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemien kiskoissa (Luojaus, 2019)

Asema	Ik" (kA)
Iloharju	10
Savilahti	9,7
Männistö	9,3
Vahtivuori	9,5
Haapaniemi	9,8
Levänen (syöttö Huutokoskelta)	9,2
Levänen (syöttö Iloharju-Suonenjoki)	8
Matkus	8,6

TAULUKKO 10. PowerFactorylla lasketut kolmivaiheiset maksimioikosulkuvirrat Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemien kiskoissa

Asema	Ik" (kA)
Iloharju	9,87
Savilahti	9,66
Männistö	9,29
Vahtivuori	9,45
Haapaniemi	9,68
Levänen (syöttö Huutokoskelta)	9,2
Levänen (syöttö Iloharju-Suonenjoki)	8
Matkus	8,6

## 6.3 Maasulku

Maasulkuvirtojen osalta tarkasteluun on otettu koko alueverkon alue, samoin kuten oikosulkuvirtalaskennassa. Tuloksia on verrattu Fingridin laskemiin  $3I_0$  - arvoihin. Johtojen  $R_0$  - ja  $X_0$  -arvot on laskettu Fingridin laskuihin verraten. Maasulkuvirtojen arvoihin vaikuttavat verkon tähtipisteiden ja maan välisten nollaimpedanssien arvot. Tuloksissa on joitain eroja, jotka voivat johtua mallinnusten eroavaisuudesta nollaverkkojen mallinnuksen suhteen.

TAULUKKO 11. Fingridin laskemat maasulkuvirrat vuodelle 2019 Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemien kiskoissa (Luojaus, 2019)

Asema	3I0 (kA)
Iloharju	2,8
Savilahti	2,7
Männistö	2,7
Vahtivuori	2,8
Haapaniemi	2,8
Levänen (syöttö Huutokoskelta)	2,8
Levänen (syöttö Iloharju-Suonenjoki)	2,6
Matkus	2,7

TAULUKKO 12. PowerFactorylla lasketut maasulkuvirrat vuodelle 2019 Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemien kiskoissa

Asema	3I0 (kA)
Iloharju	2,46
Savilahti	2,43
Männistö	2,38
Vahtivuori	2,4
Haapaniemi	2,42
Levänen (syöttö Huutokoskelta)	2,8
Levänen (syöttö Iloharju-Suonenjoki)	2,6
Matkus	2,7

## 7 KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N 110 KV ALUEVERKON SUOJAUS JA SEN MÄÄRITTELY POWERFACTORYLLA

### 7.1 Alueverkon suojauksen määrittely PowerFactorylla

PowerFactorylla alueverkon suojausta määrittäessä voidaan tehdä graafinen esitys alueverkosta, johon voidaan sisällyttää verkon releistys asetteluineen. PowerFactory mahdollistaa esimerkiksi suojauksen selektiivisyyden tarkastelun asetteluarvojen perusteella. Ohjelmistolla voidaan kuvata mm. differentiaalireleen virta-asettelu graafiseen muotoon X-Y -koordinaatistoon. Distanssireleistä on mahdollista asetteluita käyttäen mallintaa toimintakuvio, jota voidaan verrata esimerkiksi relekoestuksen yhteydessä laadittuun toimintakuviin. Ylivirtareleistä on mahdollista mallintaa toimintakäyrät virran ja ajan suhteen. Asetteluarvojen vaikutusta kuvaajiin on tutkittu verraten koestusdokumenttien, Fingridin ja relevalmistajien dokumentteihin. Arvot oikein syötettynä ohjelmalla on mahdollista piirtää vastaavat kuvaajat, kuin esimerkiksi relekoestajan tekemässä koestusdokumentissa.

PowerFactory sisältää melko laajan valikoiman eri valmistajien suojareleitä, jotka on määritelty valmiiksi. Esimerkiksi uudemmat ABB:n RE-sarjan releet löytyvät listalta helposti, sekä yleisimmät SPA-sarjan tai Siemensin Siprotec -sarjan releet. Joitain reletyyppejä on tässä työssä jouduttu määrittämään käsin. Kyseiset tyypit on toteutettu käyttäen ohjelmiston sisältämiä Generic-, eli yleistyyppisiä suojarelemalleja. Verkon suojauksen määrittelyn tukena PowerFactory on todettu toimivaksi tarkasteltavassa verkossa. Ohjelmiston graafinen käyttöliittymä on mahdollista laatia käyttäjän tarpeiden mukaiseksi ja se on helposti muokattavissa.

### 7.2 Keskijänniteverkon suojauksen selektiivisyys sähköaseman ja asiakasmuuntamon välillä

Tässä opinnäytetyössä lisäksi tilaajan kanssa palaverissa tuli ilmi tarpeesta keskijänniteverkon suojauksen selektiivisyyden tarkastelulle asiakasmuuntamoiden kannalta. PowerFactorylla on laadittu malli Matkuksen sähköaseman erästä lähdöstä ensimmäiseen asiakasmuuntamoon saakka. Ohjelmisto mahdollistaa esimerkiksi kiinteistön, johon on tulossa uusi asiakasmuuntamo, relesuojauksen graafisen tarkastelun sähkösuunnittelijan tueksi. Tällöin verkkoyhtiön edustajan on helpompi kyseisissä tilanteissa havainnollistaa verkon suojauksen kokonaisuutta ohjelmallisesti.



## 8 POWERFACTORY KUOPION SÄHKÖVERKKO OY:N KÄYTÖSSÄ

PowerFactoryn lopullinen hankinta Kuopion Sähköverkko Oy:lle tapahtuu tämän työn valmistuttua. Ohjelmistosta on saatu käyttöä varten riittävä kokonaisuus määritettyä sekä siitä on pyydetty tarjouspyyntö. Ohjelmisto tullaan hankkimaan paikallisasennuksena yhdelle tietokoneelle. Ohjelman käyttäjänä tulee toimimaan valvomoinsoööri.

Ohjelmistoa voidaan tämän hetken osaamisen ja digitoinnin ansiosta käyttää edellä mainittuihin laskentoihin ja määrittelyihin. Seuraavassa kappaleessa on esitetty ohjelmiston käyttöön liittyviä työn aikana ilmenneitä kehitysideoita ohjelmiston käyttöön tulevaisuudessa.

## 9 KEHITYSIDEOITA

PowerFactoryn tulevaa käyttöä on tarkasteltu tämän opinnäytetyön aikana ja alueverkon laskennan ja relemäärittelyn sekä keskijänniteverkon pienimuotoisen suojaustarkastelun lisäksi on mahdollista esimerkiksi mallintaa alueverkko vielä tarkemmin sisällyttäen tässä työssä pois rajatut komponentit, kuten jännite- ja taajuusreleet.

Lisäksi ohjelmistoa voidaan hyödyntää tietyissä tilanteissa keskijänniteverkon relesuojauksien tarkastelussa ulkoisen tuotannon tilanteissa. Tehonjaon osalta voidaan hyödyntää Quasi-Dynamic -ohjelmaosaa, jolla on mahdollista mallintaa verkon tehonjakoa eri tilanteissa tuntisarjojen mukaan. Ohjelmistolla voidaan lisäksi tehdä loistehotarkastelua tulevaisuuden näkökulmista. Tämän toiminnallisuuden avulla voidaan arvioida esimerkiksi loistehon kompensoinnin tarvetta.

## 10 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia PowerFactory -ohjelmiston toimivuutta alueverkon määrittelyyn. Työssä tutkittiin alueverkon laskentaa sekä relemallinnusta. Lisäksi työssä tehtiin pienimuotoinen malli keskijänniteverkon ylivirtasuojauksen selektiivisyyden tarkastelua varten. Työn tavoitteena oli saada valmis mallinnus alueverkosta, valmistella ohjelmiston käyttöönottoa yrityksessä sekä tehdä ohjelmistohankinta opinnäytetyön aikana havaittujen tulosten perusteella.

Työn aikana on tehty taustatutkimusta ohjelmistosta ja sen käytöstä, verkon komponenteista ja relesuojauksen toteutuksista. Tietoja on hankittu työn aikana ohjelmistovalmistajalta, Savonia-ammattikorkeakoululta, Kuopion Sähköverkko Oy:ltä sekä Fingridiltä. Ohjelmiston käytön suhteen perustietojen hankinta on tehty Savonia-ammattikorkeakoulun kurssin ja ohjelmiston asiakastuen avulla. Verkko- ja komponenttitietoja on hankittu Kuopion Sähköverkko Oy:n järjestelmistä ja henkilökunnalta sekä Fingridin asiantuntijoilta.

Ohjelmiston tuloksia muihin dokumentteihin ja ennakkotietoihin verraten ohjelmistolla on mahdollista rakentaa täysin toimiva malli erilaisista sähköverkoista, jotta voidaan suorittaa erilaisia eri tilanteiden laskentoja sekä esimerkiksi tarkastella relesuojauksien kokonaisuuksia helposti käsiteltävänä kokonaisuutena. Kaiken kaikkiaan ohjelmisto soveltuu tämän hetkisen käyttöosaamisen mukaan Kuopion Sähköverkko Oy:n alueverkon tarkasteluun. Voin ohjelmistoon tutustumisen ja sen käytön perusteella suositella ohjelmistoa hankittavaksi Kuopion Sähköverkko Oy:lle. Ohjelmiston eri toiminnallisuuksien opiskelun myötä on mahdollista laajentaa mallinnusta vielä tarkempaan muotoon sekä esimerkiksi syvällisemmin keskijänniteverkon tarkasteluun, jos tarvetta ilmenee.

## LÄHTEET

- DIgSILENT GmbH. (2019). *DIgSILENT Company*. Haettu huhtikuu 6, 2019 osoitteesta About DIgSILENT:  
<https://www.digsilent.de/en/company.html>
- DIgSILENT GmbH. (2019). *PowerFactory*. Haettu huhtikuu 4, 2019 osoitteesta Licensing and Software Editions:  
<https://www.digsilent.de/en/licence-and-installation-overview.html>
- DIgSILENT GmbH. (2019). *Products*. Haettu huhtikuu 3, 2019 osoitteesta Product Overview:  
<https://www.digsilent.de/en/products.html>
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot 1*. Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot 2*. Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J., & Laiho, Y. (1988). *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Helsinki: Otatieto.
- Grainger, J. J., & Stevenson, J. W. (1994). *Power System Analysis*. McCraw-Hill Inc.
- Hyvärinen, S. (2019, huhtikuu 8). Keskustelu.
- Kuopion Sähköverkko Oy. (2018). Diaesitys sähköverkosta 2018.
- Kuopion Sähköverkko Oy. (2018). Taskutieto. Kuopio.
- Kuopion Sähköverkko Oy. Sisäiset tietokannat.
- Lakervi, E., & Partanen, J. (2008). *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto.
- Luoja, M. (2019, helmikuu 6). Sähköpostikeskustelu.
- Naukkarinen, T. (2019, maaliskuu 28). Palaveri.
- Rouvali, J. (2017). Silmukoidun verkon laskenta, oikosulku pisteessä 4, tehtävän ratkaisu. *Sähkönsiirtojärjestelmät*.  
Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- Sähköturvallisuuslaki, 1135/2016. Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Haettu Maaliskuu 13, 2019 osoitteesta  
Sähköturvallisuuslaki: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>

## LIITTEET

LIITE 1: PowerFactory 2019 -ohjelmiston esite

Saatavissa: <https://www.digsilent.de/en/downloads.html?downloadkey=9DF9F3148FE30F4B61A97396210755F2>