



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SÄHKÖNJAKELUVERKON LASKENTAOHJELMIEN VERTAILU

TEKIJÄ: Jari Pirinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Jari Pirinen			
Työn nimi Sähköjakeluverkon laskentaohjelmien vertailu			
Päiväys	12.11.2016	Sivumäärä/Liitteet	59/2
Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Timo Savallampi			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyön aiheena oli tutkia ja vertailla kolmea eri sähköjakeluverkon laskentaohjelmaa. Ohjelmat olivat ABB:n DMS600NE-verkkotietojärjestelmä eli Integra, ABB:n DOC ja DIgSILENTin PowerFactory. Ohjelmistojen suunnitteluominaisuudet, joita työssä tutkittiin, olivat säteittäisen ja rengasverkon oikosulkuvirtojen ja tehonjaon laskenta sekä relesuojauksen suunnittelu. Työn tilaaja oli Savonia-ammattikorkeakoulu. Tavoitteena oli saada lisää tietoa ohjelmien toiminnasta sekä niiden soveltuvuudesta opetukseen.</p> <p>Työssä pyrittiin luomaan jokaisella ohjelmalla mahdollisimman samankaltainen sähköverkko, jolle suoritettiin edellä mainitut toiminnot. DOC käyttää suunnittelussa vain ABB:n omia komponentteja, joten sillä saadut tulokset eroavat kahdella muulla ohjelmalla saaduista tuloksista. Integralla ja PowerFactoryllä tulokset olivat melko lähellä toisiaan.</p> <p>Kaikki tarkasteltavat ominaisuudet toimivat jokaisella ohjelmalla, vaikkakin jokaisen ohjelman toiminnassa oli eroja. Esimerkiksi PowerFactory ja DOC eivät ota laskennassa kantaa verkon muotoon, vaan ne suorittavat laskennan samalla tavalla sekä säteittäiselle että rengasverkolle, kun taas Integralla nämä lasketaan eri toiminnoilla. Toinen merkittävä ero on se, että DOC suorittaa suunnittelun lisäksi myös verkon mitoituksen ja valitsee automaattisesti tilanteeseen sopivat komponentit. Muut ohjelmat hoitavat ainoastaan suunnittelun.</p> <p>Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin ja jokaisen kolmen ohjelman ominaisuuksista ja toiminnasta saatiin paljon lisätietoa. Työn tulosten perusteella saatiin selville, kuinka hyvin ohjelmat soveltuvat opetukseen ja milloin mitään ohjelmaa kannattaa käyttää.</p>			
Avainsanat sähköjakelu, laskentaohjelma, rengasverkko, oikosulkuvirta, tehonjako, relesuojaus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Jari Pirinen			
Title of Thesis Comparison of Electric Distribution Network Calculation Programs			
Date	12 November 2016	Pages/Appendices	59/2
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer and Mr. Timo Savallampi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The subject of the thesis was to study and compare three different electric distribution network calculation programs. These programs were ABB's DMS600NE also known as Integra, ABB's DOC and DIgSILENT's PowerFactory. The planning features of these programs that were studied were the calculation of short circuit current and load flow of the radial network and circle network and the planning of relay protection. The main objective of the thesis was to get more information about how the programs work and how suitable they are for teaching purposes.</p> <p>The aim was to create a similar electrical grid with every program and subject it to the functions mentioned earlier. In this way it was easy to compare the results. DOC uses only ABB's own components so the calculation results differ from the results of the two other programs. Integra's and PowerFactory's results were very close to each other.</p> <p>All features that were studied worked in each program although there were differences between the operations of the programs. For example PowerFactory and DOC perform the calculations for the radial network and the circle network with the same functions, while Integra calculates them with different functions. Another significant difference is that DOC does also the dimensioning of the network, which means that it chooses automatically the right components for the situation.</p> <p>All the objectives set for the thesis were accomplished and a lot of new information about the characteristics of each three program was obtained. The results of this thesis show how well the programs are suitable for teaching purposes and when to use each program.</p>			
Keywords electric distribution, calculation program, circle network, short circuit current, load flow, relay protection			

ESIPUHE

Tein opinnäytetyöni Savonia-ammattikorkeakoululle. Aiheen sain yliopettaja Juhani Rouvalilta. Hän toimi myös työn ohjaajana ja hänelle kuuluu suuret kiitokset hyvästä ohjauksesta ja neuvoista. Työn aihe oli todella mielenkiintoinen ja sitä tehdessä pääsin hyödyntämään osaamistani sekä opiskeluissani oppimia asioita.

Erityiskiitokset kuuluvat perheelleni tuesta, jota sain koko opiskelujeni ajan.

Kuopiossa 12.11.2016

Jari Pirinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU	8
3	SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ	9
3.1	Sähköjakeluverkkojen laskenta	10
3.1.1	Oikosulkulaskenta	10
3.1.2	Tehonjakolaskenta	11
3.2	Relesuojaus	11
4	RENGASVERKKO	12
4.1	Laskenta	12
4.1.1	Esimerkki	13
4.1.2	Kolmivaiheisen oikosulun laskenta	14
4.2	Tehonjakolaskenta	14
4.2.1	Newton-Raphsonin menetelmä	15
5	DMS600NE-VERKKOTIETOJÄRJESTELMÄ	17
5.1	Verkon mallinnus	17
5.2	Oikosulkuvirran laskenta	18
5.2.1	Laskenta käytännössä	19
5.2.2	Tulosten tulkinta	20
5.3	Tehonjakolaskenta	21
5.3.1	Laskenta käytännössä	22
5.3.2	Tulosten tulkinta	22
5.4	Rengasverkon oikosulkulaskenta	22
5.4.1	Laskenta käytännössä	22
5.4.2	Tulosten tulkinta	25
5.5	Rengasverkon tehonjakolaskenta	25
5.6	Generaattorin lisääminen verkkoon	26
5.7	Relesuojaus	30
6	POWERFACTORY	32
6.1	Verkon mallinnus	32
6.2	Oikosulkuvirran laskenta	34
6.3	Tehonjakolaskenta	37

6.4	Relesuojaus.....	39
6.5	Verkon väritys	43
7	ABB DOC	44
7.1	Projektin aloitus.....	44
7.2	Verkon mallinnus	47
7.3	Laskenta	47
7.4	Relesuojaus.....	49
8	VERTAILUN TULOKSET	53
9	YHTEENVETO.....	55
	LÄHTEET	57
	LIITE 1: DMS600NE OIKOSULKULASKENTALISTAUKSEN SARAKKEIDEN SELITYKSET	58
	LIITE 2: DMS600NE TEHONJAKOLASKENTALISTAUKSEN SARAKKEIDEN SELITYKSET	59

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on sähköjakeluverkon laskentaohjelmien vertailu. Työn tilaajana on Savonia-ammattikorkeakoulu.

Sähkötekniikan koulutusohjelmassa käytetään pienjännite- ja keskijänniteverkkojen suunnitteluohjelmana ABB:n DMS600NE-verkkotietojärjestelmää, josta käytetään myös nimeä Integra. Integran lisäksi pienjännite- ja keskijännite-verkkojen suunnitteluohjelmana käytetään ABB:n DOC:ia. Kolmas käytössä oleva laskentaohjelmisto on DIGSILENTin PowerFactory, joka soveltuu kaikkien sähköjakeluverkkojen suunnitteluun. PowerFactorystä on kuitenkin käytössä oppilaitosversio, joka tarkoittaa rajoituksia ohjelmiston käytössä. Näitä ovat mm. solmupisteiden rajallinen määrä.

Työssä on tarkoitus selvittää, miten tutkittavat ohjelmistot sopivat verkostosuunnitteluun. Oleellisena osana työssä on rengasverkkojen ja säteittäisten verkkojen kuvaaminen ja vertailu. Työssä myös selvitetään, kuinka oikosulkuvirtojen ja tehonjaon laskenta onnistuu kullakin ohjelmalla. Suojauksen suunnittelu on myös osana työtä. Työssä keskitytään etenkin keskijänniteverkon relesuojaukseen. Opinnäytetyössä selvitetään myös, kuinka lähtötietoja ja laskentatuloksia tulkitaan. Saatujen tulosten perusteella voidaan tutkia, kuinka ohjelmistot soveltuvat opetukseen ja koulun projekteihin.

2 SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Savonia-ammattikorkeakoulu on yksi Suomen suurimmista ja monipuolisimmista ammattikorkeakouluista. Opetusta on kuudella eri koulutusalueella. Koulutusyksiköt sijaitsevat Kuopiossa, Iisalmissa ja Varkaudessa. Yhteensä Savoniassa työskentelee n. 500 työntekijää, opiskelijoita on lähes 6000. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2016.)

Savonia palvelee aktiivisesti ympäröivää työelämää. Tutkimus- ja kehitystoiminta tarjoaa osaavaa palvelua ja yksilöllisiä ratkaisuja yritysten ja työyhteisöjen kehittämistarpeisiin. Toiminnan profiili tiivistyy painoaloihin, jotka ovat Alkutuotanto ja elintarvikkeet, Energia, Ympäristö ja turvallisuus, Integroitu tuotekehitys sekä Käyttäjälähtöiset hyvinvointipalvelut. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2016.)

Sähköinsinöörin opintojen laajuus on 240 opintopistettä ja kesto 4 vuotta. Opinnot koostuvat perusopinnoista, ammattiopinnoista, harjoittelusta, opinnäytetyöstä ja valinnaisista opinnoista. Sähkötekniikan opinnot sisältävät myös perehdytyksen ja osallistumisen sähköturvallisuustutkintoon. Tutkinnosta saatava osaaminen vastaa Euroopan unionin alueella yhteisesti määriteltyä korkeakoulutustasoa. Opiskeluissa voi suuntautua talotekniikkaan ja sähköjakeluun, sähkökäyttöihin ja automaatioon tai laiteläheiseen tietotekniikkaan. Tämä työ kuuluu sähköjakelun alueeseen. Sähköjakelutekniikan opinnoissa keskitytään sähköjakeluverkkojen suunnitteluun, mitoittamiseen, käyttöön ja rakentamiseen. Sähköjakeluyritykset ja rakennuttajat tarvitsevat sähköinsinöörejä erilaisiin työtehtäviin. Näitä ovat mm. sähköverkon kehittäjä, ylläpitäjä, rakennuttaja, tekninen asiantuntija ja myyjä. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2016.)

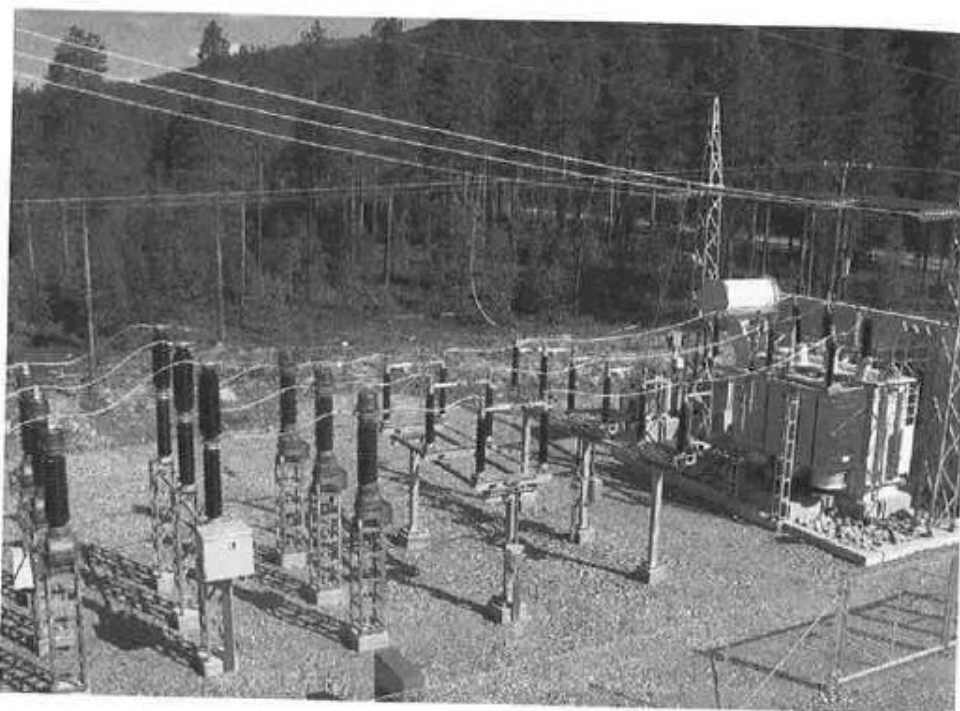
3 SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ

Sähkönjakelujärjestelmän tehtävänä on siirtää sähkövoimasiirtojärjestelmästä tuleva tai jakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähkö loppukäyttäjille. Sähkönjakelujärjestelmä koostuu useista eri osista. Näitä ovat alueverkko (110 kV ja 45 kV), sähköasemat (110/20 kV, 45/20 kV), keskijänniteverkko (20 kV), jakelumuuntamot (20/0,4 kV) ja pienjänniteverkko (0,4 kV). (Lakervi ja Partanen 2012, 11.)

Sähkönjakelujärjestelmä rakentuu useista erilaisista yksittäisistä komponenteista ja johdoista. Suomen jakelujärjestelmään kuuluu noin 800 sähköasemaa, 100 000 jakelumuuntamoaa, 200 000 km pienjännitejohtoa ja 150 000 km keskijännitejohtoa. Jakeluverkoista valtaosa on ilmajohtoverkkoa. Pienjänniteverkoissa on käytössä sekä AMKA-ilmakaapeli että AXMK-maakaapeli, jota käytetään etenkin kaupungeissa ja taajamissa. Kuvassa 1 on esitelty erilaisia johdinten asennustapoja. Ensimmäisenä kuvassa on avorakenteinen keskijännitejohto, toisena pienjänniteilmajohto ja viimeisenä pienjännitemaakaapeli. Kuvassa 2 nähdään 110/20 kV:n sähköaseman 110 kV:n syöttö ja päämuuntaja. (Lakervi ja Partanen 2012, 11.)



KUVA 1. Johdinten asennustapoja (Lakervi ja Partanen 2012, 12.)



KUVA 2. 110/20 kV:n sähköasema (Lakervi ja Partanen 2012, 120.)

Edellä mainittujen komponenttien lisäksi sähköjakelujärjestelmään kuuluu paljon erilaisia sekundäärilaitteita ja järjestelmiä. Näihin kuuluvat esimerkiksi sähköasemien suojareleet ja apujännitejärjestelmät. (Lakervi ja Partanen 2012, 11.)

Jakeluverkot voivat olla rakenteeltaan joko säteittäisiä tai silmukoituja eli renkaita. Säteittäisen verkon etuna rengasverkkoihin verrattuna ovat pienemmät oikosulkuvirrat, häiriöiden helpompi rajoittaminen, jännitteensäätö ja yksinkertaisempi suojauksen suunnittelu verrattuna rengasverkkoon. Rengasverkkoon perehdytään tarkemmin luvussa 4. Yleensä pienjänniteverkot rakennetaan säteittäisinä. Keski- ja alijänniteverkot taas yleensä rakennetaan keskeisiltä osiltaan silmukoiduksi, mutta renkaita käytetään avoimina. Erottimet toimivat normaalisti jakorajoina. (Lakervi ja Partanen 2012, 13.)

3.1 Sähköjakeluverkkojen laskenta

Verkon sähkötekniseen tilaan ja käyttövarmuuteen liittyvät laskennat ovat keskeisiä sähköjakeluverkkojen kehittämisessä ja käyttöön liittyvissä tehtävissä. Etenkin vikatilanteiden tutkiminen on tärkeää. Yleisimpiä vikoja ovat oikosulut ja ylikuormitus. (Lakervi ja Partanen 2012, 25.)

3.1.1 Oikosulkulaskenta

Oikosulku voi tapahtua kahden tai kolmen vaihejohtimen välillä tai vaiheen ja maan välillä. Oikosululle on tyypillistä kuormitusvirtaa suurempi virta. Viat voivat aiheuttaa henkilövahinkoja, komponenttien ylikuumentumista tai sähköjakelun keskeytyksiä. Tämän takia oikosulkuvirtojen laskeminen on todella tärkeää. Jotta oikosulkuvirta voidaan laskea, tulee tietää vikapaikan jännite ja

siitä näkyvä verkon impedanssi. Kun tiedetään verkon oikosulkuvirrat, voidaan määrittää verkon johdinten oikosulkukestoisuus ja oikosulkusuojauksen asetteluarvot. Oikosulkuvirtalaskentaa tarvitaan myös, kun käytetään laskennallista vianpaikannusta verkossa tapahtuvien oikosulkujen vikapaikkojen löytämiseen. (Lakervi ja Partanen 2012, 28 - 30.)

3.1.2 Tehonjakolaskenta

Tehonjakolaskennalla selvitetään, kuinka paljon johdoilla siirretään sähkötehoa ja paljonko johdoilla syntyy tehohäviöitä. Tämän lisäksi tehonjakolaskennalla saadaan selvitettyä kiskojen jännitteet ja loistehot. (Zhang 2012.)

Sähkönjakelun kannalta johdon ja muuntajan tehohäviöillä on suuri merkitys, koska ne voivat aiheuttaa korkeita lämpötiloja, jotka vahingoittavat eristyksiä. Kuormitusvirralla on keskeinen merkitys, kun lasketaan häviöitä. (Lakervi ja Partanen 2012, 33.)

3.2 Relesuojaus

Suojareleen tehtävänä on suojattavasta järjestelmästä saadun mittaustuloksen perusteella suorittaa ennalta määritelty ohjaus samassa tai toisessa sähköjakelujärjestelmässä. Kun suojareleen tarkkailema sähkönjakelujärjestelmän suure saavuttaa releeseen asetetun toiminta-arvon, releen tulee havahtua ja suorittaa sille määrätty kytkentätoimenpide asetellun toiminta-ajan mukaan. (Opiks-Tiimi Oy 2016.)

Relesuojaukselle on asetettu tiettyjä vaatimuksia. Relesuojauksen pitää olla mahdollisimman kattava, eli sen on suojattava koko sähkönjakeluverkkoa. Sen toiminnan tulee olla riittävän tarkkaa ja nopeata. Relesuojauksen toteutuksen täytyy olla mahdollisimman varmakäyttöinen. Toiminnan on oltava selektiivistä, eli vain tarvittavan osan verkosta tulee jäädä käyttökeskeytyksen piiriin. Releen pitää olla itsetoimiva eli sen on toimittava vikatilanteessa ilman käyttöhenkilökunnan apua ja valvontaa. Suojareleen itsevalvontatoiminnon on ilmoitettava käyttöhenkilökunnalle, jos releessä ilmenee vikaa, joka voi aiheuttaa suojauksen toimimattomuuden. Viimeinen vaatimus on, että relesuojaus pitää pystyä huoltamaan ilman käyttökeskeytyksiä. (Opiks-Tiimi Oy 2016.)

Erilaisia suojareletyyppejä on useita. Näitä ovat ensiö- ja primäärireleet, sähkömekaaniset toisioreleet, tasasuuntaajareleet, staattiset releet, mikroprosessorireleet ja numeeriset releet. (Opiks-Tiimi Oy 2016.)

4 RENGASVERKKO

Rengasverkosta voidaan käyttää myös nimitystä silmukkaverkko. Rengasverkossa sähköllä on useita kulkuteitä, minkä vuoksi yhden johdon vikaantuminen ei aiheuta sähkökatkoa. Tämä lisää verkon käyttövarmuutta. Lisäksi rengasverkon etuina ovat pienet jännitteenalenemat ja tehohäviöt. Huonoina puolina taas ovat suuret oikosulkuvirrat ja monimutkainen suojaus. (Korpinen 2016, 1 - 2.)

Silmukoinnilla johtovian vaikutukset voidaan rajoittaa yhteen erotinväliin. Taajamien maakaapeliverkoissa pyritään aina siihen, että jakelumuuntamolle tulisi vähintään kaksi keskijännitesyöttöä. Haja-asutusalueilla johdot jätetään yleensä säteittäisiksi, koska rengasjohtojen kustannukset tulisivat kalliimmaksi kuin jakelun keskeytyskustannusten pienenemisestä saatava hyöty. (Lakervi ja Partanen 2012, 13.)

4.1 Laskenta

Silmukoidun verkon laskennassa sovelletaan solmupistemenetelmää tai silmukkamenetelmää. Silmukkamenetelmää käytettäessä virtahaarojen virrat jaetaan silmukkavirtoihin. Näitä silmukkavirtoja käyttäen laaditaan jänniteyhtälöt soveltaen Ohmin ja Kirchhoffin jännitelakia. Näin saadaan yhtälöryhmät, joista ratkaistaan silmukkavirrat ja näiden avulla määritetään virtahaarojen todelliset virrat ja jännitteet. (Tarkka, Määttänen ja Hietalahti 2006, 104.)

Tässä työssä käydään tarkemmin läpi solmupistemenetelmää. Solmupistemenetelmässä yksi johdoista valitaan referenssipisteeksi. Kun referenssipiste on valittu, ratkaistaan muiden solmupisteiden jännitteet. Tämä suoritetaan kirjaamalla solmupisteiden jännitteille Kirchhoffin virtalain mukaiset yhtälöt. Kirchhoffin virtalain mukaan solmupisteeseen tulevien ja lähtevien virtojen summa on nolla. (Rouvali 2015.)

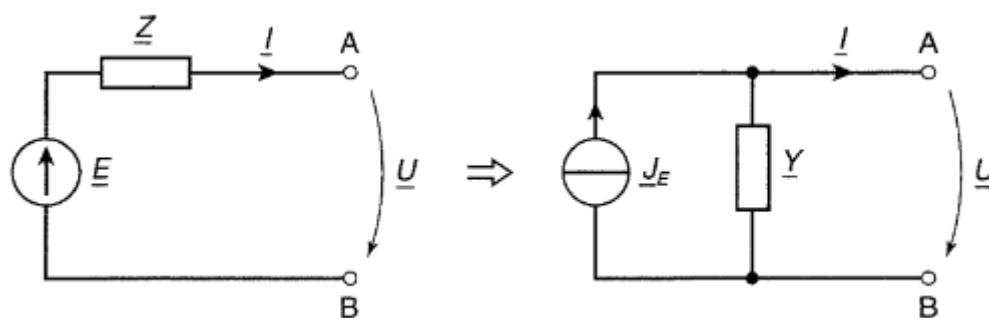
Solmupistemenetelmässä jännitelähteet kuvataan virtalähteinä ja impedanssit muutetaan admittansseiksi. Jännitelähteet muunnetaan virtalähteiksi käyttämällä seuraavaa kaavaa. (Rouvali 2015.)

$$\underline{J} = \frac{E_s}{Z_s} \quad (1)$$

jossa J on virtalähde, E_s on jännitelähde ja Z_s johdon impedanssi. Impedanssien muuttaminen admittansseiksi suoritetaan seuraavalla kaavalla. (Rouvali 2015.)

$$\underline{Y} = \frac{1}{Z} \quad (2)$$

jossa Y on admittanssi ja Z on impedanssi. Kuvassa 3 kuvataan, kuinka jännitelähteet muutetaan virtalähteiksi ja impedanssit admittansseiksi. (Rouvali 2015.)

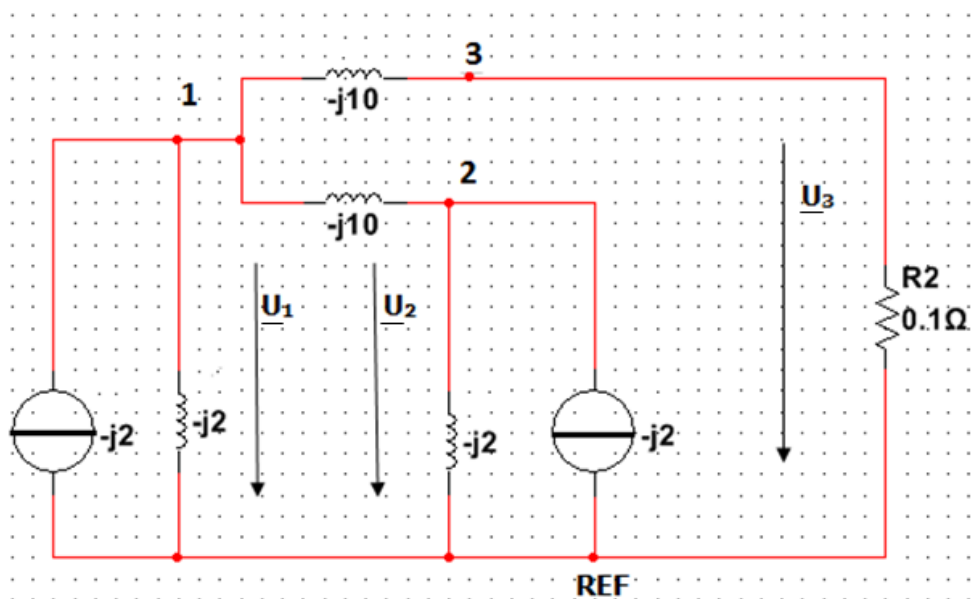


KUVA 3. Jännitelähteen muuntaminen virtalähteeksi (Rouvali 2015.)

Kun edellä esitetyt vaiheet on suoritettu, tehdään matriisimuotoinen esitys, jolla voidaan ratkaista halutut jännitteet.

4.1.1 Esimerkki

Kuvassa 4 on esitetty esimerkkitehtävä, jossa jännitelähteen ja impedanssien muuntaminen on suoritettu.



KUVA 4. Esimerkkitehtävä (Pirinen 2016.)

Kuvan perusteella solmupisteen 1 yhtälöksi saadaan:

$$-j22 * \underline{U}_1 + j10 * \underline{U}_2 + j10 * \underline{U}_3 = -j2. \quad (3)$$

Kaavassa 3 $-j22$ on solmupisteeseen 1 liittyvien admittanssien summa, $j10$ on solmupisteen 1 ja 2 välinen admittanssi (etumerkki -), $j10$ on solmupisteen 1 ja 3 välinen admittanssi (etumerkki -) ja $-j2$ on solmupisteeseen 1 liittyvä virtalähde. Tätä samaa tapaa käyttäen saadaan solmupisteiden 2 ja 3 yhtälöiksi:

$$j10 * \underline{U}_1 - j12 * \underline{U}_2 + 0 * \underline{U}_3 = -j2 \quad (4)$$

$$j10 * \underline{U}_1 + 0 * \underline{U}_2 + (0,1 - j10) * \underline{U}_3 = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} -j22 & j10 & j10 \\ j10 & -j12 & 0 \\ j10 & 0 & 0,1-j10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j2 \\ -j2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

KUVA 5. Matriisi (Pirinen 2016.)

Nyt yhtälöiden 3, 4 ja 5 avulla voidaan rakentaa matriisi. Matriisi on esitetty kuvassa 5. Tästä voidaan ratkaista jännitteet käyttämällä numeerista laskentatyökalua, esimerkiksi laskinta, jossa on matriisiominaisuus. (Rouvali 2015.)

4.1.2 Kolmivaiheisen oikosulun laskenta

Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihetta ovat galvaanisesti yhdessä ja tällöin vikapaikan jännite on sama kuin tähtipisteen jännite. Tähtipisteen jännite on sama kuin solmupistemenetelmän referenssipiste. (Rouvali 2015.)

Kolmivaiheinen oikosulku silmukkaverkossa lasketaan käyttämällä edellä mainittua laskentatapaa. Oletetaan, että kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu pisteessä 3. Tällöin kuvan 5 matriisin alkioon 3,3 sijoitetaan äärettömän suuri luku kuvaamaan vikaa. Näin saadaan laskettua jännitteet, kun kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu pisteessä 3. Laskennassa täytyy ottaa huomioon se, että kuorma ei syötä oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirta saadaan laskettua seuraavalla kaavalla. (Rouvali 2015.)

$$\underline{I}_K = \underline{Y}_{13} * (\underline{U}_1 - \underline{U}_3) \quad (6)$$

jossa \underline{I}_K kuvaa oikosulkuvirtaa, \underline{Y}_{13} pisteiden 1 ja 3 välistä admittanssia ja \underline{U}_1 ja \underline{U}_3 jännitteitä. (Rouvali 2015.)

4.2 Tehonjakolaskenta

Johtojen ja muuntajien kuormittuminen voidaan laskea silmukoidussa verkossa, kun tunnetaan asemien jännitteet, myös jännitteiden kulmat tarvitaan. Laskenta sisältää seuraavat vaiheet: johtosien ja laitteiden sähköteknillisten arvojen määrittely, verkon johto-osien ja solmupisteiden numerointi, koko verkon redusointi samaan jänniteportaaseen tai laskemalla komponenttien suhteelliset arvot, verkkoyhtälöiden muodostaminen, solmupistejännitteiden ratkaiseminen,

verkkohaarojen häviöiden ja tehojen laskenta ja tulosten palauttaminen todelliseen jänniteportaisiin. (Elovaara ja Laiho 1988, 56.)

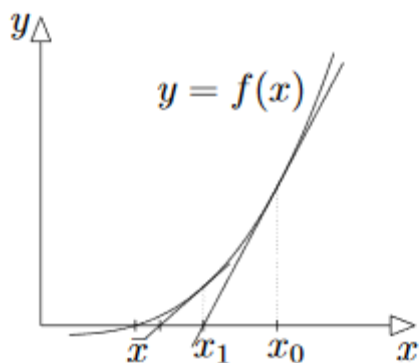
Laskenta perustuu Kirchhoffin 1. lain mukaisen yhtälöryhmän ratkaisuun. Solmupisteeseen liittyy neljä suuretta. Nämä suureet ovat pätöteho, loisteho, jännitteen itseisarvo ja kulma. Solmupisteitä on kolmea eri tyyppiä. Näitä ovat kuormituspisteet (muuntajan kautta syötetty sähkölaitoksen syöttöpiste), generaattoripisteet (voimalaitos) ja vertailupiste. Kuormituspisteissä tunnetaan pätö- ja loisteho ja niissä tulee laskea jännitteen itseisarvo ja kulma. Generaattoripisteissä tunnetaan pätöteho ja jännitteen itseisarvo. Näissä pisteissä lasketaan loisteho ja jännitteen kulma. Vertailupisteessä tulee laskea pätö- ja loisteho, kun tunnetaan jännitteen itseisarvo ja kulma. (Elovaara ja Laiho 1988, 58.)

Verkkoyhtälöt esitetään polaarisisä muodossa. Nämä ratkaistaan matriisimenetelmällä. Näin saadaan jännitteet selville ja niiden avulla lasketaan johto-osien kuormittuminen ja häviöt. (Elovaara ja Laiho 1988, 61.)

4.2.1 Newton-Raphsonin menetelmä

Menetelmä perustuu siihen, että epälineaarisen funktion ratkaisua voidaan etsiä siten, että sen kuvaajan likiarvon kohdalla korvataan tangentillaan ja lasketaan sillä tarkempi likiarvo. Tämä on yleistetty useammalle muuttujalle Newton-Raphsonin menetelmässä. Menetelmää käytetään pätötehon ja loistehon epälineaaristen yhtälöiden ratkaisemiseen. (Elovaara ja Laiho 1988, 59.)

Newtonin menetelmällä voidaan ratkaista numeerisesti muotoon $f(x) = 0$ saatettu yhtälö. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että funktion pitää olla kahdesti derivoituva etsittävän juuren ympäristössä ja $f'(x) \neq 0$. Tämän lisäksi pitää tuntea riittävän tarkka approksimaatio eli ns. iteraation lähtöarvo juurelle. Newtonin menetelmässä muodostetaan lukujono, jonka ensimmäinen luku on lähtöarvo ja seuraava luku lasketaan aina edellisen perusteella. Näin voidaan laskea juurelle niin tarkka likiarvo kuin halutaan. Menetelmällä saadaan kuitenkin vain yksi juuri kerrallaan. Mikäli yhtälöllä on useita juuria, joudutaan vaihtamaan lähtöarvoa ja laskemaan uudelleen. Menetelmää kutsutaan myös Newtonin iteraatioksi. Iteraatio tarkoittaa menettelyä joka perustuu toistamiseen. Tässä tapauksessa toistetaan samaa laskenta-askelta, jossa muodostettavan lukujonon seuraava termi lasketaan edellisen avulla. (Kivelä 2000, 167.)



KUVA 6. Tangentin kuvaaja (Kivelä 2000, 168.)

Menetelmä johdetaan seuraavasti. Sovitaan, että yhtälössä $f(x) = 0$ juurena on \underline{x} ja tämän approksimaatio eli iteraation lähtöarvo on x_0 . Tällöin käyrälle $y = f(x)$ asetetaan tangentti pisteeseen $(x_0, f(x_0))$, jonka yhtälö voidaan esittää seuraavalla tavalla. (Kivelä 2000, 168.)

$$y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) \quad (8)$$

Yhtälön 8 tangentti leikkaa x-akselin pisteessä, jossa $y = 0$ ja tällöin saadaan seuraava yhtälö (Kivelä 2000, 168).

$$x = x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (9)$$

Tangentin kuvaaja on esitetty kuvassa 6. Kaavasta 9 saadaan juurelle \underline{x} tarkempi likiarvo kuin x_0 . Tämä askel toistetaan käyttäen saattua arvoa x_1 lähtöarvona. Näin saadaan tarkempi approksimaatio x_2 . Kun askel on toistettu riittävän monta kertaa, saadaan muodostettua lukujono x_0, x_1, x_2 . Kaavan yleinen muoto esitetään seuraavasti. (Kivelä 2000, 168.)

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Kaava 10 on ns. iteeraatiokaava (Kivelä 2000, 168).

5 DMS600NE-VERKKOTIETOJÄRJESTELMÄ

DMS600NE kuuluu osana MicroScada-järjestelmään. MicroScada on järjestelmä, jolla pystytään ohjaamaan ja valvomaan sähköverkon toimintaa. DMS600NE tunnetaan myös nimellä Integra. (Rönkkö 2015.)

DMS600NE-verkkotietojärjestelmä on tarkoitettu jakeluverkon hallintaan. Ohjelmisto toimii jakeluverkon tiedon tallennus-, jalostus - ja dokumentointijärjestelmänä. Sen ominaisuuksia ovat verkostokomponenttien ominaisuuksien, sijaintien ja kuntotietojen tallennus. Ohjelmistolla voidaan suorittaa myös laskennallista analysointia sekä havainnollistaa sähköverkon tilaa. Integralla onnistuu myös suunnittelulaskenta, johon kuuluvat esimerkiksi sähköinen mitoitus, vaihtoehtojen vertailu, suunnitelmien dokumentointi ja luotettavuuslaskenta. (Rönkkö 2015.) DMS600NE sopii ainoastaan pienjännite- ja keskijänniteverkon suunnitteluun. Ohjelmasta on käytössä suomenkielinen versio.

5.1 Verkon mallinnus

DMS600NE-verkkotietojärjestelmän verkon mallinnuksen etuna on se, että verkko voidaan suunnitella suoraan karttapohjalle. Tämä helpottaa verkon suunnittelua ja näin nähdään suoraan, kuinka verkko sijoittuu maantieteellisesti. Verkon mallintamisessa käytettiin apuna kurssin "Tietokoneavusteinen verkostosuunnittelu" materiaaleja.

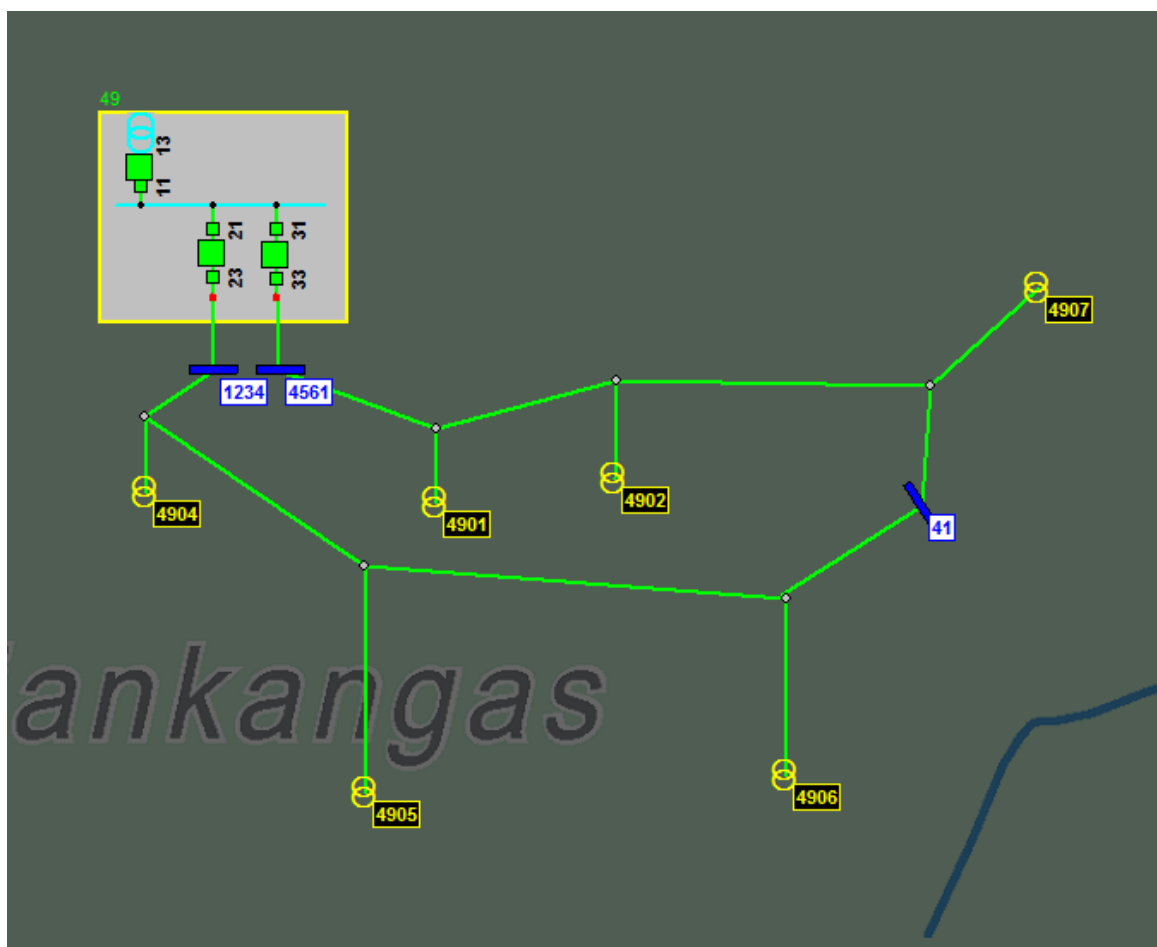
Verkon mallinnus aloitetaan valitsemalla Suunnittelu-valikosta Uusi suunnitelma. Näin varmistetaan se, että ei sekoiteta demoverkkoa. Jotta verkkoon voidaan lisätä komponentteja, tulee Muokkaa-valikosta olla Verkkotietojen syöttö käytössä.

Komponenttien lisääminen aloitetaan valitsemalla Muokkaa-valikosta johtojen lisäys. Ensimmäisenä verkkoon lisätään sähköasema. Lisäys onnistuu klikkaamalla karttapohjaa hiiren vasemmalla näppäimellä ja valitsemalla kohta Asema. Tämän jälkeen valitaan jännitetaso. Tässä tulkitussa verkossa käytettiin jännitetasona 20 kV:a. Kun jännitetaso on valittu, säädetään aseman koko, minkä jälkeen päästään aseman laitekortille. Sinne kirjataan mm. aseman tunnus ja nimi.

Seuraavaksi asemalle lisätään tarvittavat komponentit. Komponenttien lisäys aloitetaan lisäämällä kiskot. Ensimmäiseksi lisätään vaakakisko, johon liitetään päämuuntajahaara sekä 20 kV lähdöt. Päämuuntajan haaraan tulee lisätä kaksi erotinta, katkaisija ja päämuuntaja. Lähtöhaaroihin lisätään erottimet, katkaisija ja johtolähtöpiste. Viimeinen erotin sijoitetaan sähköaseman (kaavion) ulkopuolelle.

Sähköaseman rakentamisen jälkeen aloitetaan tekemään sähköasemalta lähtevää verkkoa. Verkon rakennus suoritetaan Johdon lisäys -toiminnolla. Johdon rakennuksessa käytetään apuna välipisteitä eli haaroja. Johtoja lisättäessä kannattaa syöttää johdon laitekortille sen pituus sekä valita johtimen tyyppi. Muuntamo ei saa olla koskaan välipisteenä, vaan se on aina päätepiste. Muuntamon tietoihin tulee täyttää ainakin tunnus, nimellisteho ja jännitteet. Tämän lisäksi muuntamon energiatiedot

tulee täyttää. Muokkaa-painikkeella voi lisätä muuntamolle haluamansa kuormitustyyppin, käyttäjien lukumäärän ja kuormituksen määrän. Tällä samalla tavalla jatketaan ja lisätään verkkoon kaikki loput kulutuspaikat. Kuvasta 7 nähdään valmis rengasverkko.



KUVA 7. DMS600NE:llä suunniteltu rengasverkko (Pirinen 2016.)

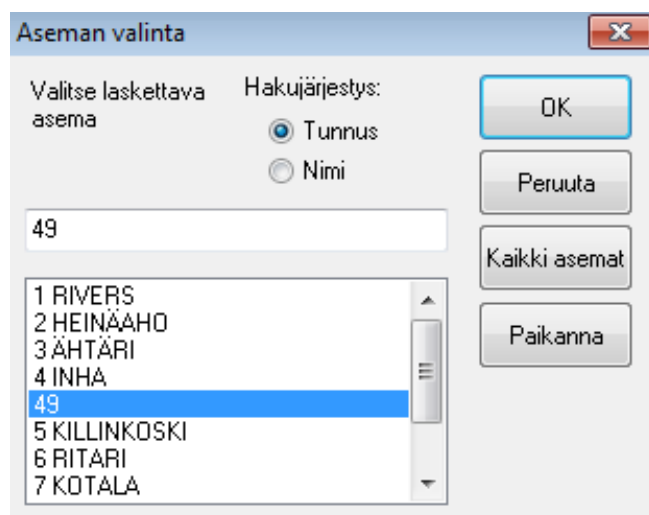
5.2 Oikosulkuvirran laskenta

DMS600NE:n oikosulkulaskenta perustuu Theveninin menetelmään sekä symmetristen komponenttien käyttöön epäsymmetrisissä vikatilanteissa. Oikosulkuvirrat lasketaan tehonjaon yhteydessä, koska tällöin tietoon saadaan verkossa mm. jännitteet ja impedanssit. Laskenta aloitetaan sähköasemalta syöttöpisteestä, josta se etenee kohti lähdön häntää käyttäen Theveninin menetelmää. (ABB 2016, 16 - 17.)

Ennen laskentaa muodostetaan Theveninin impedanssi. Siihen kuuluvat taustaverkon impedanssi, 110/20 kV sähköaseman päämuuntajan impedanssi ja 20 kV johtojen impedanssi laskettuna 40 °C lämpötilassa. Asemakaavion laitekortille syötetään taustaverkon parametrit. Laitekortille tulee määrittellä oikosulkuvirta, oikosulkuresistanssi sekä oikosulkureaktanssi. Näiden lisäksi päämuuntajan oikosulkuimpedanssiarvo määritellään päämuuntajan laitekortilla. 20 kV johtojen oikosulkuimpedanssiarvot säädetään johdinlajien omilta laitekorteilta. Laskennassa käytetään oletuksena standardin IEC 60909-0 määrittämiä johdon nimellisjännitteen varmuuskertoimia. (ABB 2016, 17 - 21.)

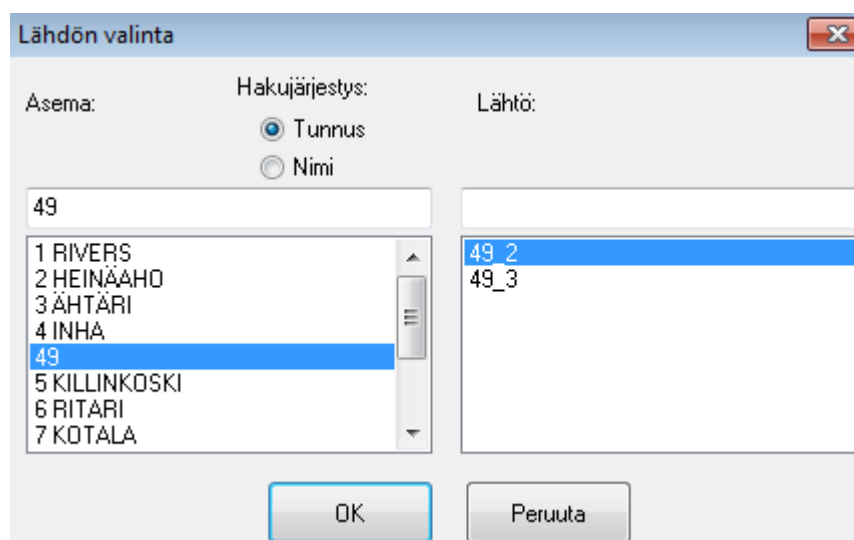
5.2.1 Laskenta käytännössä

Oikosulkulaskenta suoritetaan Laskenta-valikon kautta. Valikosta löytyy kohta Laskenta, jota painamalla avautuu uusi valikko, josta valitaan sähköasema, jolle laskenta halutaan suorittaa. Kaikki asemat -painikkeella laskennan voi suorittaa kaikille asemille yhtä aikaa. Tämä valinta on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Aseman valinta (Pirinen 2016.)

Laskennan tuloksia voidaan tarkastella solmuvälidialogeilla tai laskentalistauksilla. Laskentalistaukset löytyvät Laskenta-valikosta. Oikosulkulaskentalistaus kohdasta avautuu valikko, josta tulee valita haluttu sähköasema sekä lähtö, jonka laskenta halutaan nähdä. Kuvasta 9 nähdään lähdön valinta.



KUVA 9. Lähdön valinta (Pirinen 2016.)

Lähdön valinnan jälkeen ohjelmaan avautuu kyseisen lähdön oikosulkulaskennan tulokset. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 10. Sarakkeiden tarkemmat selitykset ovat nähtävissä liitteessä 1.

Oikosulkutulokset											
OIKOSULKUVIR RAT - Savonia-amk Sähkötekniikka											
SÄHKÖASEMA:											
LÄHTÖ: 49_2											
Maasta erotettu verkko											
Laskentaparametrit:											
Jännite (kV) = 20.000											
Releen havahtumisvirta aikalaukaisulla (kA) = 0.800											
Releen havahtumisvirta pikalaukaisulla (kA) = 4.000											
Oikosulun kesto aika aikalaukaisulla											
ennen aikajälleenkytkentää (s) = 0.500											
Oikosulun kesto aika pikalaukaisulla											
ennen aikajälleenkytkentää (s) = 0.200											
Pikajälleenkytkentä ei ole käytössä											
Aikajälleenkytkentä ei ole käytössä											
AJK:n jännitteetön aika (s) = 0.000											
Oikosulun kesto aika aikalaukaisulla											
AJK:n jälkeen (s) = 0.500											
Oikosulun kesto aika pikalaukaisulla											
AJK:n jälkeen (s) = 0.200											
Syöttöpisteen oikosulkuresistanssi (ohm) = 0.127											
Syöttöpisteen oikosulkureaktanssi (ohm) = 4.153											
	JOHTO					VIKAVIR RAT					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			km		km	kA	§	§	kA	§	
1 S	49_2 E	1234	0.02	MA120	0.02	3.37	***	19	2.65	331	
2 E	1234 X	1229	0.20	AF40	0.22	3.37	***	74	2.59	323	
3 X	1229 M	4904	0.20	AF40	0.42	3.29	***	72	2.53	316	
4 X	1229 X	9183	1.00	AF40	1.22	3.29	***	72	2.27	283	
5 X	9183 X	9173	3.00	AF40	4.22	2.89	***	63	1.50	187	
6 X	9173 M	4906	0.50	AF40	4.72	1.90	***	42	1.41	175	
7 X	9173 E	41	0.50	AF40	4.72	1.90	***	42	1.41	175	
8 X	9183 M	4905	1.00	AF40	2.22	2.89	***	63	1.97	245	

KUVA 10. Oikosulkulaskennan tulokset (Pirinen 2016.)

5.2.2 Tulosten tulkinta

Laskentalistauksesta nähdään kaikki oikosulkulaskentaan liittyvät oleelliset asiat solmuväleittäin. Kuvan 10 sarakkeelta 4 nähdään solmuvälin pituus kilometreinä ja sarakkeelta 5 nähdään kyseisen solmuvälin johdinlaji. Esimerkiksi solmuvälillä 1234 - 1229 johdinlajeina on AF40 ja solmuvälin pituus on 0,20 kilometriä. Sarakkeelta 7 nähdään itse kolmivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin alkusolmussa. Edellä mainitulla solmuvälillä se on 3,37 kA. Tällä kyseisellä solmuvälillä on verkon suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta on solmuvälillä 9173 M - 4906, joka on 1,90 kA. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin loppusolmussa nähdään sarakkeelta 10. Tämä on suurimmillaan ensimmäisellä solmuvälillä eli 49_2 E - 1234, joka on 2,65 kA. Pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta löytyy solmuväleiltä 9173 - 4906 ja 9173 - 41, joka on 1,41 kA.

5.3 Tehonjakolaskenta

DMS600NE suorittaa verkon laskentaa vuoden huippukuormilla. Tehonjakolaskennan voi määrittää haluttuun ajanhetkeen. Laskentaa varten tarvitaan tiettyjä lähtötietoja, näitä ovat kuormitustiedot, verkkotiedot ja verkon kytkentätila. (ABB 2016, 4.)

Laskennan mallinnusmenetelmä tulee määritellä ennen laskennan aloittamista. DMS600NE:llä vaihtoehtoina ovat Velanderin kaavat tai kuormituskäyrät. Nämä muuttavat vuosittaisen energian pätö- ja loistehoksi. (ABB 2016, 5.) Mallinnusmenetelmä valitaan yleensä ohjelmiston asennusvaiheessa. Sen voi kuitenkin vaihtaa myöhemminkin. Tällöin joutuu käynnistämään ohjelman uudelleen sekä päivittämään verkkotietokannan. Molempiin vaihtoehtoihin liittyy kuormituksen vakiokerroin, joka määrittelee kertoimen, jolla kaikki verkkotietokannassa olevat kuormat kerrotaan laskentoja suoritettaessa. Oletusarvona on 1. (ABB 2003, 149, 173.)

Velanderin kaavat -menetelmään liittyy kolme määriteltävää asetusta. Ensimmäinen tulee päättää halutaanko tehot vakiotehoina. Tämä määrittelee käytetäänkö syötettyjä pätötehoarvoja laskennassa sellaisenaan. Tämän lisäksi asetuksina on Velanderin kerroin 1 ja Velanderin kerroin 2. Jos tehot vakiotehoina ei ole käytössä, kerroin 1- ja kerroin 2-asetukset määrittelevät kertoimet, joita käytetään kokemusperäisessä yhtälössä laskettaessa kuormitusta vuosienenergioiden avulla. Kertoimen 1 oletusarvona on 0,28 ja kertoimelle 2 se on 0,08. Näissä yhtälössä otetaan huomioon se, että kulutuspisteille annetut pätötehot eivät tule samaan aikaan vaan niissä on hajontaa. Jos tehot vakiotehoina on käytössä, kerroin 1 määrittelee kertoimen, jota käytetään annettujen energia-arvojen muuttamiseen pätötehoarvoiksi. Kerroin 2 toimii samalla tavalla, mikäli kaikki kuormat on annettu energia-arvoina. (ABB 2003, 149 – 150.) Velanderin kaavan menetelmällä saadaan arvio kuormituksen huipputehosta, kun vuosienenergia tunnetaan. Tämä soveltuu hyvin suuren sähkökäyttäjäjoukon huipputehon määrittämiseen. Velanderin kaavan menetelmä ei kuitenkaan sovellu yksittäisen sähkökäyttäjän ja tietyn hetken tehojen määrittämiseen. (ABB 2016, 5.)

Kuormituskäyrät-menetelmään liittyy tilastollinen varmuuskerroin. Tämän avulla kuormituskäyristä määritellään tehonjaon ja jännitteenalenemien laskennassa käytettävä kuormitus. Oletusarvona on 1,6. Tällöin kuormituksen alitustodennäköisyys on 95 %. (ABB 2003, 150.) Kuormitusmallit eivät kerro mahdollista huipputehoa, vaan ainoastaan keskitehon. Kuormitusmalli oletetaan normaalijakautuneeksi, johon liittyvät tuntitehon odotusarvo ja keskihajonta määritellään. Nämä tulee määritellä DMS600NE:llä. (ABB 2016, 7.)

Savonia-ammattikorkeakoulun tietokoneilla DMS600NE käyttää kuormituskäyriä, joten työssä käytettiin laskennassa tätä menetelmää.

5.3.1 Laskenta käytännössä

Laskenta suoritetaan samalla tavalla kuin oikosulkulaskennat eli Laskenta-valikon kautta.

Laskentalistaus toimii myös samalla tavalla kuin oikosulkulaskennassa. Tehonjakolaskentalistaus on esitetty kuvassa 11. Sarakkeiden tarkat selitykset löytyvät liitteestä 2.

TEHONJAKOTULOKSET - Savonia-amk Sähkötekniikka																	
SÄHKÖASEMA:																	
LÄHTÖ: 49_2																	
10 vuoden aikajakson loppuhetken tilanne:																	
Laskettu huipunkäyttöaika = 3281 h Häviöiden huipunkäyttöaika = 1413 h																	
Näennäisteho = 238.5 kVA Pätöteho = 230.9 kW Loisteho = 59.7 KVAR																	
Häviöteho = 0.1 kW Häviöenergia = 0.1 MWh/a																	
Häviökustannukset = 86 € (koko aikajaksolta nykyarvoon diskontattuna)																	
1	2	3	JOHTO			6	KUORMITUS					JÄNNITE			MUUNTAJA		
			4	5	km		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
					km	km	A	%	MW	kW/km	%	%	€/MW	kV	kW	KVAr	
1	S	49_2	E	1234	0.02	MA120	0.02	7	3	0.23	0.0	0.00	0.00	0.0	20.00		
2	E	1234	X	1229	0.20	AF40	0.22	7	3	0.23	0.1	0.01	0.01	0.0	20.00		
3	X	1229	M	4904	0.20	AF40	0.42	2	1	0.09	0.0	0.00	0.02	0.1	20.00	91	26
4	X	1229	X	9183	1.00	AF40	1.22	4	2	0.16	0.0	0.04	0.05	0.3	19.99		
5	X	9183	X	9173	3.00	AF40	4.22	2	1	0.07	0.0	0.05	0.10	0.9	19.98		
6	X	9173	M	4906	0.50	AF40	4.72	2	1	0.07	0.0	0.01	0.11	1.0	19.98	72	21
7	X	9173	E	41	0.50	AF40	4.72	0	0	0.00	0.0	0.00	0.10	1.0	19.98		
8	X	9183	M	4905	1.00	AF40	2.22	2	1	0.09	0.0	0.02	0.07	0.5	19.99	93	27

KUVA 11. Tehonjakolaskentalistaus (Pirinen 2016.)

5.3.2 Tulosten tulkinta

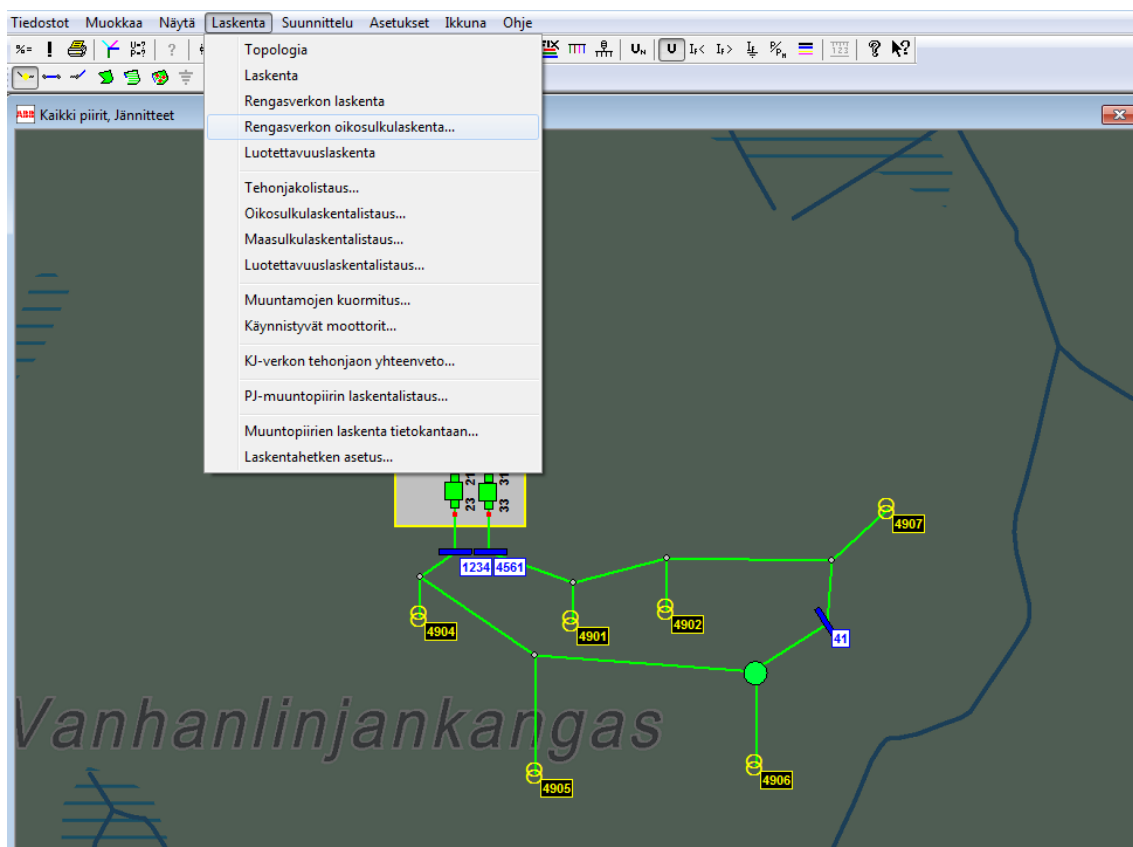
Tehonjakolaskennan tulkinta tapahtuu samalla tavalla kuin oikosulkulaskennassa, eli tuloksia tutkitaan solmuväleittäin. Kuvan 11 sarakkeesta 7 nähdään solmuvälin suurin kuormitusvirta, joka on 7 A. Tämä on suurimmillaan heti verkon alkupäässä. Sarakkeesta 9 nähdään solmuvälin enimmäisteho, myös tämä on suurimmillaan verkon alussa. Suurin solmuvälin enimmäisteho on 0,23 MW. Solmuvälin jännitteenalenema nähdään sarakkeelta 11.

5.4 Rengasverkon oikosulkulaskenta

DMS600NE-verkkotietojärjestelmä pystyy laskemaan rengasverkon oikosulun 3- ja 2-vaiheisissa vikatapauksissa. Ohjelmisto käyttää rengasverkon oikosulkulaskennassa impedanssimatriisia. Matriisi muodostetaan aina kun rengasverkon oikosulkulaskenta käynnistetään. 2- ja 3-vaiheisessa oikosulkulaskennassa impedanssimatriisi muodostetaan erikseen. (ABB 2016, 26.)

5.4.1 Laskenta käytännössä

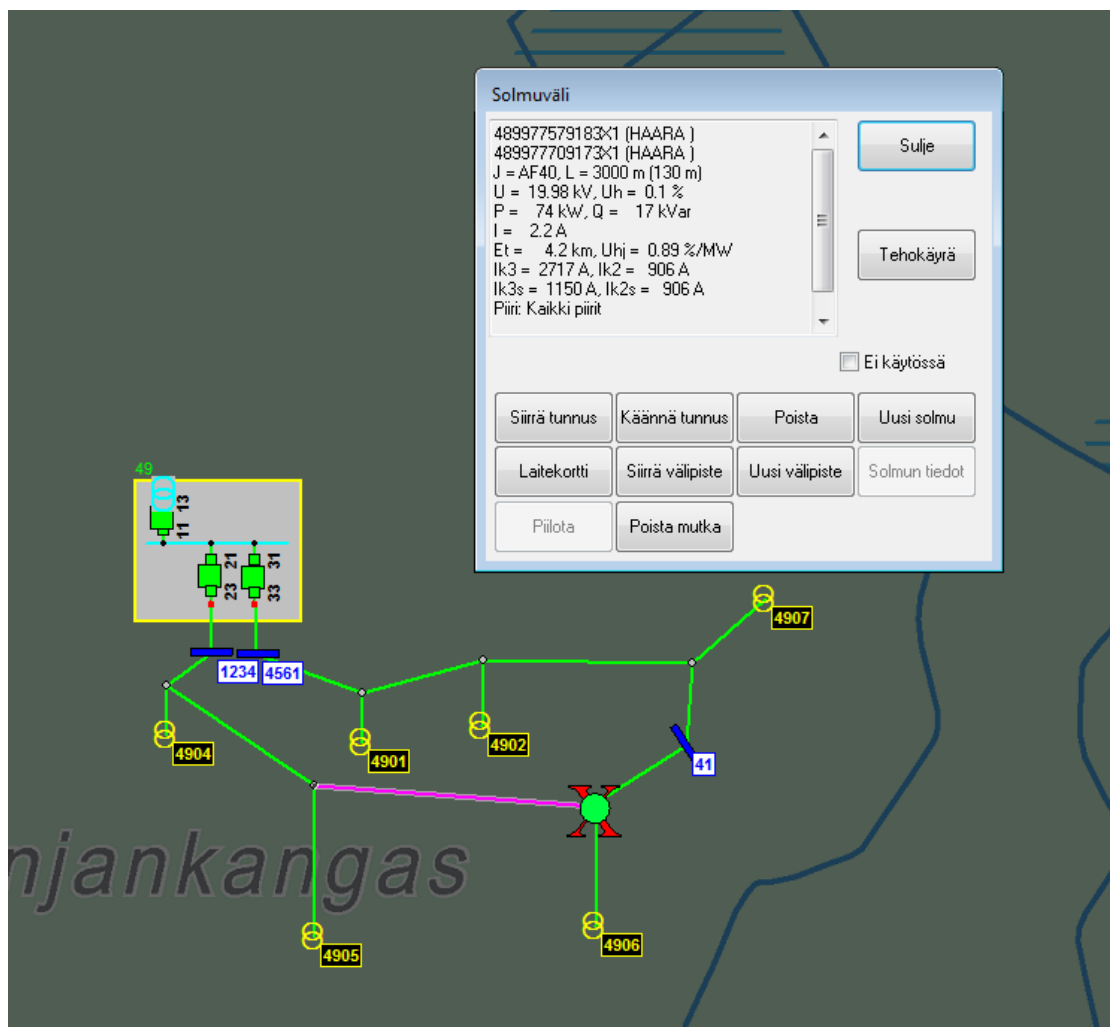
Laskenta aloitetaan Laskenta-valikon kautta. Sieltä valitaan kohta Rengasverkon oikosulkulaskenta. (ABB 2013, 6.) Tämä valikko on nähtävillä kuvassa 12.



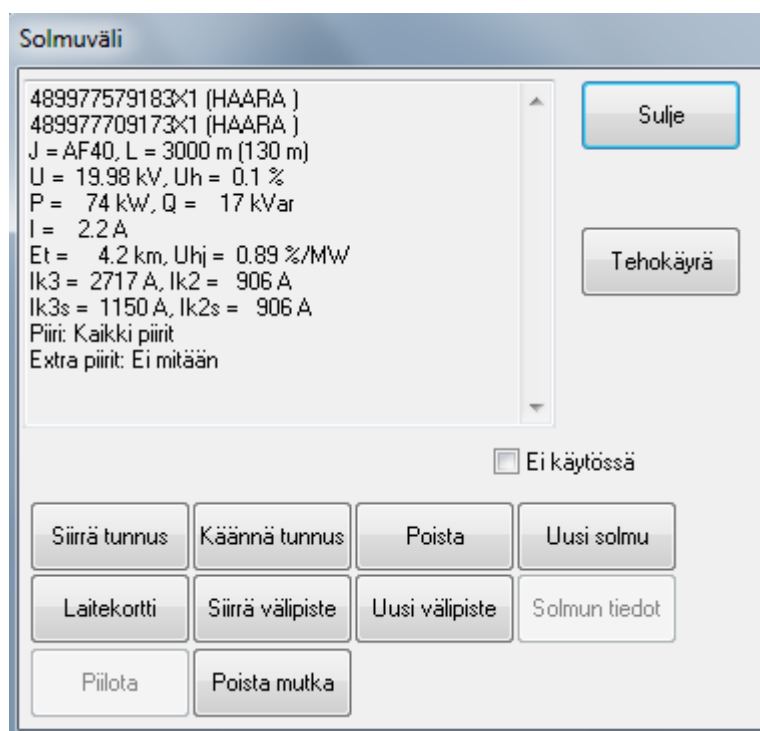
KUVA 12. Rengasverkon oikosulkulaskenta -valikko (Pirinen 2016.)

Tämän jälkeen ohjelma kääntää osoittamaan vikasolmun. Solmutyypin on oltava haara, muuntaja tai moottori. Kun solmupaikka on valittu, ohjelmisto kysyy lasketaanko vikavirrat käyttäen näytettyä vikapaikkaa. Tähän tulee vastata kyllä, jonka jälkeen ohjelmisto suorittaa laskennan. (ABB 2013, 6 - 8.)

Rengasverkon oikosulkulaskennassa ei ole käytössä Listaus-toimintoa, joten laskentaa tulee tulkita tarkastelemalla solmuvälejä. Tarkastelussa Ik3 kuvaa valitun solmuvälin 3-vaiheista oikosulkuvirtaa solmuvälin lopussa, Ik2 kuvaa valitun solmuvälin 2-vaiheista oikosulkuvirtaa solmuvälin lopussa ja Ik3s on valitusta solmuvälistä syötettävä suurin 3-vaiheinen oikosulkuvirta valittuun vikapaikkaan. (ABB 2013, 8.) Kuvassa 13 on esitetty valittu solmuväli ja vikapaikka ja kuvassa 14 on solmuväli-dialogi suurennettuna.



KUVA 13. Solmuväli ja vikapaikka (Pirinen 2016.)



KUVA 14. Solmuväli dialogi (Pirinen 2016.)

5.4.2 Tulosten tulkinta

Kuvan 14 solmuvälialdialogilta voidaan nähdä, että kyseisen solmuvälin kolmivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin lopussa on 2 717 A. Saman solmuvälin kaksivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin lopussa on 906 A. Solmuvälistä syötettävä suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta valittuun vikapaikkaan on 1 150 A.

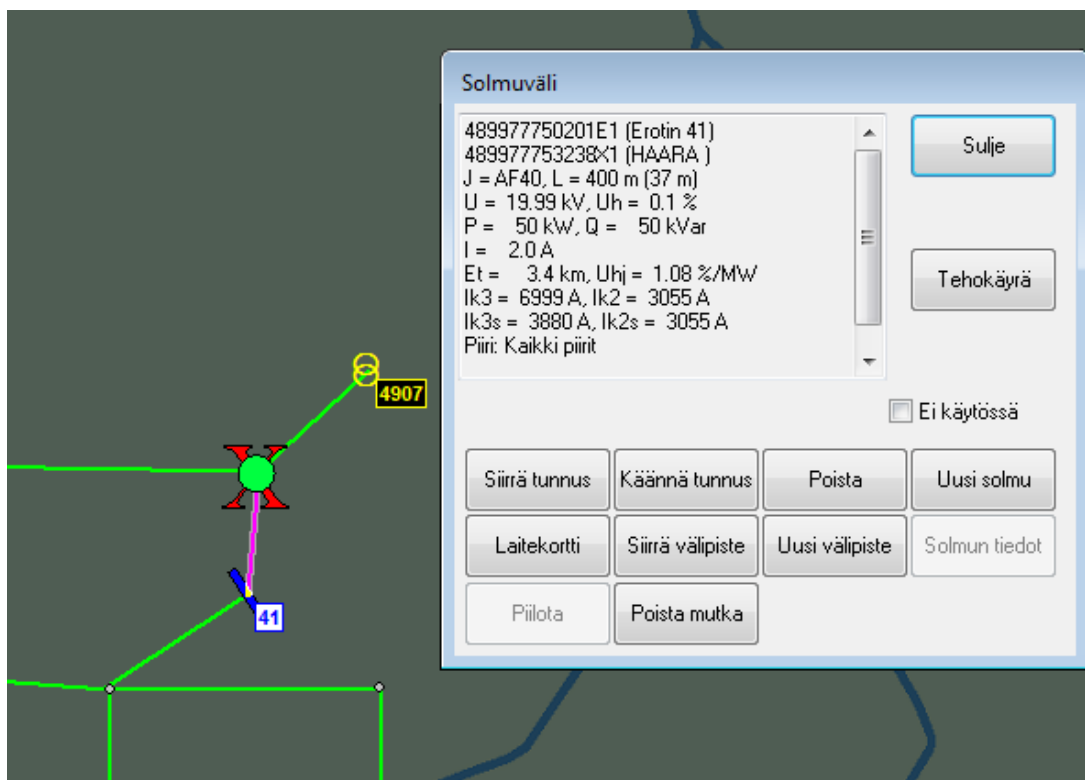
5.5 Rengasverkon tehonjakolaskenta

DMS600NE-ohjelmalla onnistuu rengasverkon tehonjakolaskenta, joka suoritetaan eri tavalla kuin tavallisessa säteittäisessä verkossa. Jos laskennan suorittaa suoraan pelkästään Laskenta-painikkeella, ohjelma ei suorita sitä oikein. Tällöin ohjelma näyttää, että lähdöt yhdistävän johdon virta olisi 0 A ja myös teho olisi 0 kW.

Laskenta tulee suorittaa Laskenta-valikon kautta Rengasverkon laskenta -painikkeella. Tämän jälkeen ohjelma näyttää rengasverkon tehonjakolaskennan tulokset oikein. Laskentatuloksia voi tarkastella solmuvälialdilojeilla tai tekemällä tehonjakolistausten. Listausta tehdessä ohjelma ilmoittaa, että lähdöllä on rengas ja kysyy, jatketaanko solmuvälituloksilla. Tähän tulee vastata kyllä. Tämän jälkeen saadaan kuvan 15 mukainen tehonjakolistaus. Kuvassa 16 on esitetty lähdöt yhdistävä johto ja sen solmuvälialdiloje.

TEHONJAKOTULOKSET															
TEHONJAKOTULOKSET - Savonia-amk Sähkötekniikka															
SÄHKÖASEMA:															
LÄHTÖ: 49_2															
Lähdöllä 49_2 Rengas															
JOHTO					KUORMITUS					JÄNNITE				MUUNTAJA	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
km					km	A	%	MW	kW/km	%	%	\$/MW	kV	kW	kVAr
1	S	49_2 E	1234	0.02	MA120	0.02	6	2	0.21	0.0	0.00	0.00	0.0	20.00	
2	E	1234 X	1229	0.20	AF40	0.22	6	2	0.21	0.1	0.01	0.01	0.0	20.00	
3	X	1229 M	4904	0.20	AF40	0.42	2	1	0.10	0.0	0.00	0.01	0.1	20.00	95 27
4	X	1229 X	9183	1.00	AF40	1.22	3	1	0.12	0.0	0.02	0.03	0.3	19.99	
5	X	9183 X	9173	3.00	AF40	4.22	1	0	0.02	0.0	0.01	0.05	0.9	19.99	
6	X	9173 M	4906	0.50	AF40	4.72	2	1	0.07	0.0	0.01	0.06	1.0	19.99	72 21
7	X	9173 E	41	0.50	AF40	4.72	2	0	0.05	0.0	0.01	0.06	1.0	19.99	
8	E	41 X	3238	0.40	AF40	3.42	2	0	0.05	0.0	0.01	0.06	1.1	19.99	
9	X	3238 X	6240	2.00	AF40	3.02	1	0	0.04	0.0	0.00	0.06	1.5	19.99	
10	X	6240 X	1225	0.50	AF40	1.02	4	2	0.15	0.0	-0.02	0.04	1.6	19.99	
11	X	1225 E	4561	0.50	AF40	0.52	7	3	0.25	0.1	-0.02	0.03	1.7	19.99	
12	E	4561 S	49_3	0.02	MA120	0.02	7	3	0.25	0.0	-0.03	0.00	1.7	20.00	
13	X	1225 M	4901	0.20	AF40	1.22	3	1	0.10	0.0	-0.01	0.03	1.7	19.99	96 28
14	X	6240 M	4902	0.30	AF40	3.32	3	1	0.11	0.0	-0.01	0.05	1.6	19.99	111 32
15	X	3238 M	4907	0.50	AF40	3.92	2	1	0.09	0.0	0.01	0.07	1.2	19.99	89 26
16	X	9173 X	0173	1.00	AF40	5.22	4	1	0.10	0.0	0.00	0.05	1.1	19.99	
17	X	0173 E	42	0.50	AF40	5.72	4	1	0.10	0.0	-0.03	0.02	1.2	20.00	
18	E	42 M	M1000	0.11	AF40	5.83	4	1	0.10	0.0	-0.01	0.01	1.2	20.00	-100 -100
19	M	M1000 S	G1000	0.09	AF40	5.92	0	0	0.00	0.0	-0.11	-0.10	1.2	20.02	
20	X	9183 M	4905	1.00	AF40	2.22	2	1	0.09	0.0	0.02	0.06	0.5	19.99	93 27

KUVA 15. Rengasverkon tehonjakolistaus (Pirinen 2016.)



KUVA 16. Rengasverkon tehonjakolaskennan solmuväliädialogi lähdöt yhdistävällä johdolla (Pirinen 2016.)

Laskennan tuloksia tulkitaan samalla tavalla kuin säteittäisen verkon tehonjakolaskennan tuloksia. Oleellista on kuitenkin se, että solmuväleillä 9173 – 41 ja 41 – 3238 virta on 2 A. Virrat voidaan nähdä kuvan 15 sarakkeelta 7. 41 tarkoittaa erotinta, joka on kahden lähdön välisellä johdolla. 9173 ja 3238 ovat solmupisteitä eri lähdöillä. Sama voidaan todeta myös kuvan 16 solmuväliädialogilta. Tämä tarkoittaa, että ohjelma suoritti rengasverkon tehonjakolaskennan oikein.

5.6 Generaattorin lisääminen verkkoon

Rengasverkoissa oleellisia osia ovat erilaiset generaattorit. Näitä generaattoreita voivat olla hajautettuun tuotantoon kuuluvat generaattorit, joilla tuotetaan pätötehoa ja loistehoa, säätelämällä generaattorin tuottamaa loistehoa. Toinen tyyppi on jännitteensäätöön käytettävät suuret generaattorit, jotka sijaitsevat voimalaitoksilla. (ABB 2003, 91.)

Keskijänniteverkossa generaattori liitetään verkkoon generaattorimuuntajan kautta (ABB 2003, 92). Muuntajan lisääminen aloitetaan valitsemalla kohta Johdon lisäys Muokkaa-valikosta. Kun haluttu johto on lisätty, valitaan solmutyypiksi muuntaja. Tämän jälkeen täytetään muuntajan tiedot. Muuntajan sähköisistä arvoista täytyy täyttää vähintään näennäisteho S_n ja nimellisjännite U_n . Molempien käämien jännitteiksi laitetaan 20 kV. Näiden lisäksi valinta Generaattorimuuntaja otetaan käyttöön. Tiedot hyväksytään Päivitä-painikkeella. Muuntajan tiedot ovat esitetty kuvassa 17.

Muuntaja ✕

Tunnus

Sijaintipaikka

Perustiedot

Valmistaja	<input type="text"/>	Portaita	<input type="text" value="0"/>
Tyyppi	<input type="text"/>	% / porras	<input type="text" value="0"/>
Kiinnitys	<input type="text"/>	Paino (kg)	<input type="text" value="0"/>
Valm vuosi	<input type="text" value="0"/>	Öljyn paino (kg)	<input type="text" value="0"/>
Sijoitus pvm.	<input type="text" value="21. 3.2016"/>		

Sähköiset arvot

Käämi	Käämi 1	Käämi 2	Käämi 3
Sn (kVA)	<input type="text" value="16"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Un (V)	<input type="text" value="20000"/>	<input type="text" value="20000"/>	<input type="text"/>
Solmuväli	<input type="text" value="4589"/>	<input type="text" value="4590"/>	<input type="text"/>
Z0 (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Kytkenä	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Maadoitettu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kelloluku	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>

Käämien väliset

	1 ja 2	1 ja 3	2 ja 3
Uk (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Pk (W)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Muuntajan P0 (W)

Kolmikäämi-muuntaja
 Generaattori-muuntaja

KUVA 17. Muuntajan tiedot (Pirinen 2016.)

Seuraavaksi lisätään itse generaattori. Tämä tehdään samalla tavalla kuten muuntajan lisääminen, paitsi nyt solmutyypiksi valitaan generaattori. Generaattorin laitekortilta tulee täyttää vähintään tunnus ja nykyinen pätöteho. Jos halutaan, että generaattori tuottaa myös pätötehoa, pitää syöttää arvo maksimi loistehon syötölle sekä nykyiselle loisteholle. Generaattorin laitekortti on esitetty kuvassa 18.

Generaattori ✕

489977883011G1 Piiritunnus

Tunnus

Nimi

Asennuspvm. 21. 3.2016

Huolto pvm. 21. 3.2016

Nimellisjännite (kV) Oikosulkures (ohm) (ym. jännitteessä)

Minimiteho (kW) Oikosulkureaktanssi (ohm)

Maksimiteho (kW) Oikosulkuvirta (kA)

Max. loistehon syöttö (kVAr) Vastaverkon resistanssi (ohm)

Min. loistehon syöttö (kVAr) Vastaverkon reaktanssi (ohm)

Nykyinen pätöteho (kW) Nollaverkon resistanssi (ohm)

Nykyinen loisteho (kVAr) Nollaverkon reaktanssi (ohm)

Paksuus Loisteho

(0,0,0) ... Jännite

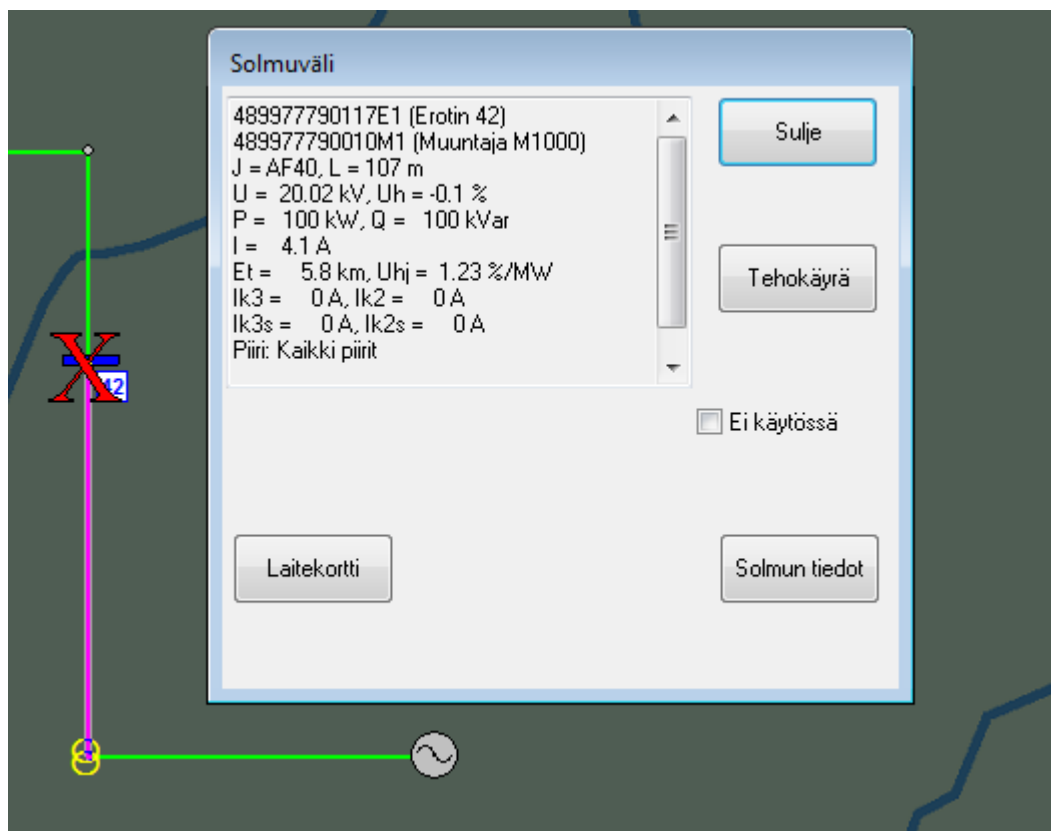
Generaattorin kynä

Vakiosäätö

Sulje
Päivitä

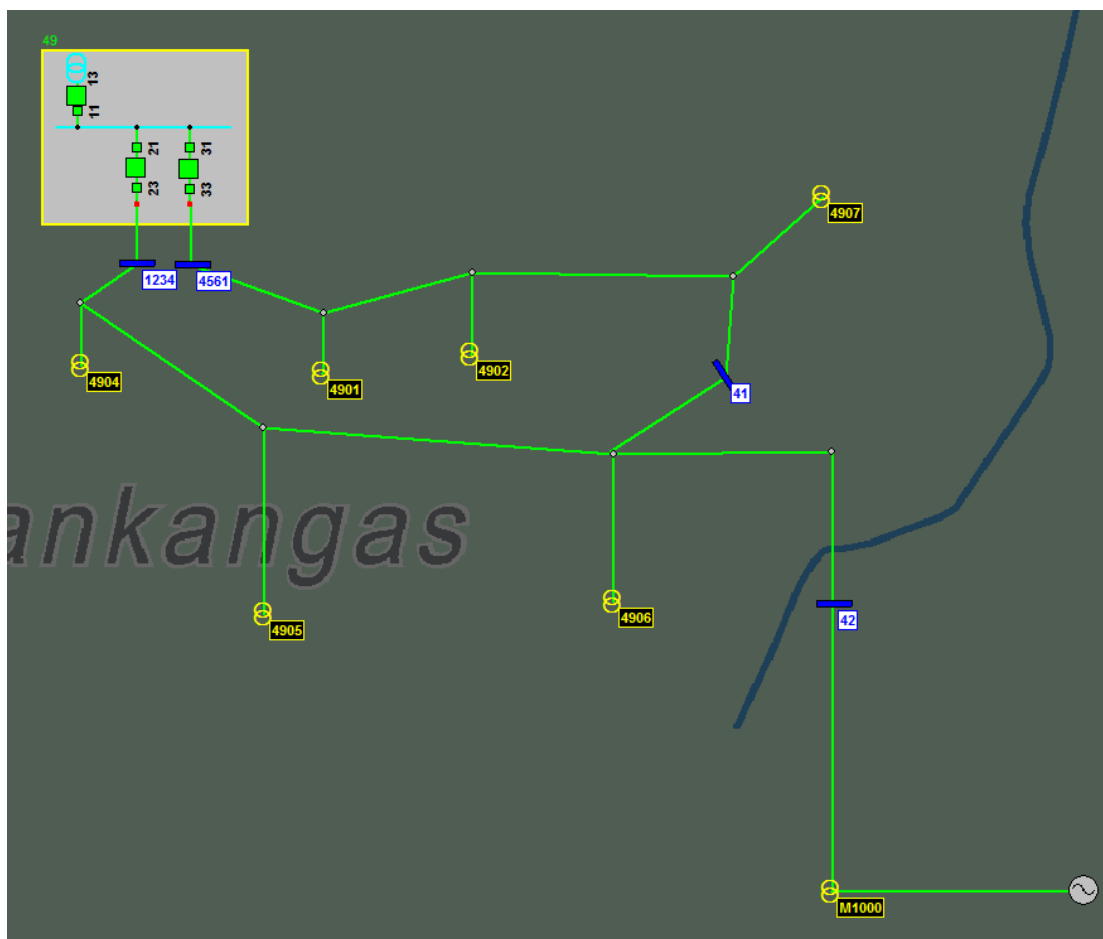
KUVA 18. Generaattorin laitekortti (Pirinen 2016.)

Valinnat hyväksytään jälleen Päivitä-painikkeella. Tämän jälkeen suoritetaan laskenta, jotta uudet tiedot päivittyvät verkkoon. Tarkistuksen voi suorittaa esimerkiksi tutkimalla muuntajalta verkon suuntaan menevää johtoa. Jos johdolla näkyy generaattorin nykyinen pätöteho P , on generaattorin lisäys onnistunut. Kuvasta 19 nähdään generaattorin tuottama pätöteho P ja loisteho Q muuntajan ja erottimen solmuvälillä.



KUVA 19. Solmuvälin tarkastelu (Pirinen 2016.)

Tarkastuksen voi suorittaa myös tutkimalla haaraan, johon liittyvät generaattori sekä joku käyttöpaikka, tulevia johtoja. Mikäli käyttöpaikalle menevän ja haaralta verkkoon päin menevien johtojen tehojen summa on sama kuin generaattorilta tuleva teho, on verkko kunnossa. Jos halutaan, että generaattorin haara voidaan sulkea pois verkosta, pitää muuntajan ja verkon välille laittaa erotin. Kuvassa 20 on esitetty verkko, johon on lisätty generaattori.



KUVA 20. Verkko, johon on liitetty generaattori (Pirinen 2016.)

5.7 Relesuojaus

Oikosulun suojauksessa käytetään standardia IEC 60909. Relesuojauksen suunnittelu aloitetaan lähdön katkaisijalta. Katkaisijan laitekortilla on valinta Reletiedot, josta voidaan muokata releen asetuksia.

Ensimmäisenä määritellään aikalaukaisun asetukset. Aikalaukaisun tulee havaita kaikki viat verkossa. Tyypillinen asettelu aika aikalaukaisulle on noin 0,5 – 1,0 sekuntia. Oikosulun kestoksi ennen aikajälleenkytkentää ja aikajälleenkytkennän jälkeen määriteltiin molemmille arvo 0,6 sekuntia. Aikalaukaisulle laitettiin myös oikosulun kestoksi 0,6 sekuntia ennen pikajälleenkytkentää. Havahtumisvirraksi releelle asetettiin arvo 200 A. Näitä arvoja käytettiin, koska ne ovat määriteltyjen rajojen mukaiset. Kuvasta 21 nähdään releasettelut.

Tämän jälkeen suoritettiin oikosulkulaskenta ja tarkastettiin toimiko suunniteltu suojaus oikein. Jos laskentalistauksen sarakkeeseen 12 tulee tähtiä tai S-kirjaimia ei suojaus toimi oikein. Tähdet sarakkeessa 12 tarkoittavat sitä, että aikalaukaisu ei havaitse vikaa verkossa. Tällöin aikalaukaisun asetuksia tulee muuttaa sellaisiksi, että se havaitsee viat. S-kirjain taas tarkoittaa sitä, että kaapelin selektiivisyys ei ole kunnossa. Tällöin kyseisen kaapelin tilalle pitää vaihtaa poikkipinta-alaltaan suurempi kaapeli, joka kestää paremmin kuormituksen.

Tässä työssä suunnitellussa verkossa laskentalistauksen sarakkeelle 12 ei tullut merkintöjä, joten suunniteltu aikalaukaisu toimi oikein.

Mikäli on tarvetta ottaa käyttöön myös pikalaukaisu, sen releasettelut tehdään välilehdeltä Ylivirta (Pika). Muuten pikalaukaisun reletiedot täytetään samalla tavalla kuin aikalaukaisun. Jos halutaan jättää pikalaukaisu pois, kannattaa sen havahtumisvirta asettaa suureksi, esimerkiksi 4000 A. Tässä työssä ei pikalaukaisua otettu huomioon.

Releasettelut - 49_2

Ylivirta (Aika) | **Ylivirta (Pika)** | Maasulku (Aika) | Maasulku (Pika) | Jälleenkytkentä

Toimintakäyrä: Constant time

Havahtumisvirta: 200 x In, 200 A

Oikosulun kesto-aika ennen PJK:ta (s): 0.6, ennen AJK:ta (s): 0.6

Oikosulun kesto-aika AJK:n jälkeen (s): 0.6

Lukitukset

Lue releasetukset: verkkomallista

OK | Peruuta | Ohje

KUVA 21. Releasettelut (Pirinen 2016.)

6 POWERFACTORY

PowerFactory on sähkönjakeluverkkojen, siirtoverkkojen ja teollisuusverkkojen laskentaan suunniteltu ohjelma. Ohjelma toimii kaikissa jänniteportaissa. Ohjelmalla voidaan rakentaa sähköverkko ja tämän jälkeen suorittaa sille haluttuja laskelmia esimerkiksi oikosulkuvirtojen ja tehonjaon laskentaa. Ohjelman on valmistanut saksalainen yritys DIgSILENT. PowerFactoryyn on saatavilla hyvät ja selkeät ohjeet, joissa on myös esimerkkiharjoitus, jonka avulla ohjelmaan pääsee sisälle helposti. Verkon mallinnuksessa käytettiin apuna näitä ohjeita. Ohjeissa jokainen vaihe on selitetty tarkasti ja apuna on myös käytetty kuvia.

6.1 Verkon mallinnus

Verkon mallinnus aloitetaan projektin nimeämisellä. Tämän lisäksi voidaan muokata muita perustietoja, kuten verkon taajuutta. Kun nämä on aseteltu päästään itse työpöydälle (Workspace) ja voidaan aloittaa komponenttien lisääminen verkkoon. Komponentti-valikko on ohjelman oikeassa reunassa. PowerFactoryssä komponentit yhdistetään toisiinsa välipisteillä (Terminal Point), joten näitä on hyvä sijoittaa muutamia piirtoverkolle (Drawing Grid). Kuvaan tulee sijoittaa myös kiskosto (Single Busbar System). Seuraavaksi aloitetaan varsinaisten komponenttien lisäämisen. Ensimmäiseksi lisätään verkon ylälaitaan systeemin ulkopuolinen verkko (External Grid) ja yhdistetään tämä ensimmäiseen välipisteeseen. Tämän jälkeen lisätään verkkoon muuntaja, joka yhdistetään edelliseen välipisteeseen sekä kiskostoon. Sitten lisätään verkkoon johtimet ja erottimet; nämäkin liitetään toisiinsa käyttämällä välipisteitä. Lopuksi verkkoon lisätään vielä kuormat. (DIgSILENT 2014, 14 - 17.)

Kun kaikki komponentit on lisätty verkkoon, tulee niiden tietoja muokata. Komponenttien muokkaaminen onnistuu tuplaklikkaamalla valittua komponenttia tai painamalla hiiren oikealla painikkeella komponentin päältä ja valitsemalla kohta Muokkaa tietoja (Edit data). Ensimmäiseksi muokataan ulkoisen verkon asetuksia. Sen voi halutessaan nimetä uudelleen. Tämän lisäksi sen kiskotyyppiä (Bus Type) voidaan muuttaa Tehonjako-välilehdeltä (Load Flow). Tässä työssä tyypiksi valittiin SL. Ulkoisen verkon valikon VDE/IEC oikosulku (VDE/IEC Short-Circuit) kautta muutetaan verkon oikosulkuvirtaa 110 kV pisteessä. Työssä käytettiin kyseisessä pisteessä arvoa 4,2 kA, sekä maksimi- että minimioikosulkuvirtana. Ohjelma laskee itse maksimi- ja minimioikosulkutehon asetetun oikosulkuvirran perusteella. Seuraavaksi säädetään 110 kV pisteen pysyvän tilan jännitteen rajoja (Steady State Voltage Limits). Maksimiarvoksi laitetaan 1,1 p.u. ja minimiarvoksi 1 p.u. Nämä asetukset säädetään 110 kV pisteen Tehonjako-välilehdeltä (Load Flow). (DIgSILENT 2014, 18.)

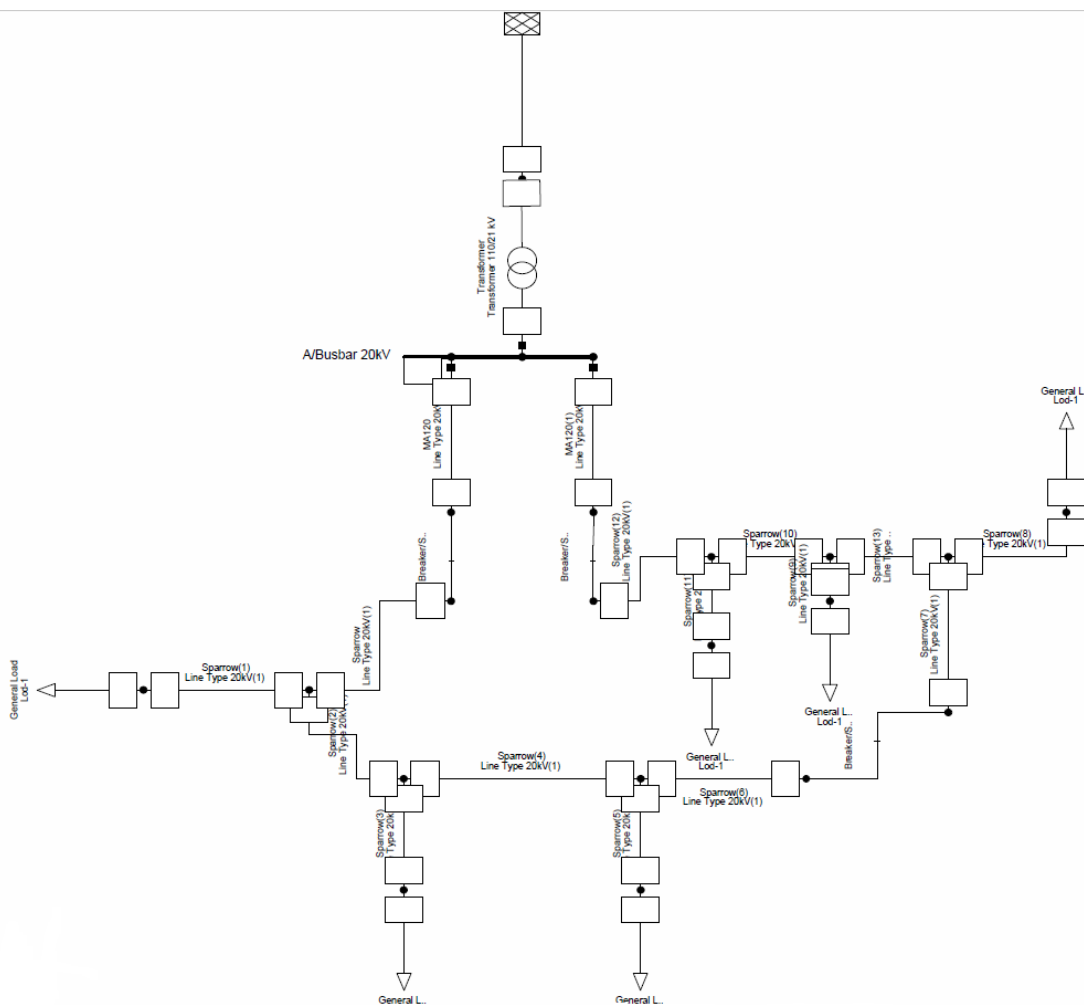
Ohjelmassa ei ole valmiina 110/21 kV muuntajaa, joten se tulee tehdä itse. Tämä onnistuu muuntajan Perustiedot-valikosta (Basic Data), josta Tyypit-kohdasta (type) valitaan Uusi projekti tyyppi (New Project Type). Tämän jälkeen nimetään muuntaja ja asetetaan muuntajan teho ja jännitteet. Työssä käytetään 16 MVA muuntajaa. Suurjännitepuolen jännitteeksi asetetaan 110 kV ja keskijännitepuolen jännitteeksi 21 kV. Muuntajan resistanssi ja reaktanssi asetetaan kohtaan Positive Sequence Impedance. 16 MVA:n muuntajalle nämä arvot ovat noin 0,004 ja 0,1. Jos määrittelyssä

haluaa käyttää resistanssia ja reaktanssia, tähän kohtaan tulee vaihtaa nuolen avulla Reactance in p.u. and Resistance in p.u.. (DIgSILENT 2014, 19.)

Ohjelmasta ei myöskään löydy valmiiksi 20 kV kiskostoa, joten tämä tulee lisätä samalla tavalla kuin muuntaja. Kiskon nimellisjännitteeksi (Nominal Voltage) ja pääjännitteeksi (Nominal Line-Line Voltage) asetetaan 20 kV. Ala-asema -valikosta (Substation) vaihdetaan kiskon nimi ja lyhenne. Tämän jälkeen muokataan kaikki loput välipisteet. Nämä nimetään ja niiden pääjännitteeksi (Nominal Voltage Line-Line) asetetaan 20 kV. (DIgSILENT 2014, 20.)

Verkossa tarvittavia johtimia ei löydy ohjelmasta, joten nekin pitää lisätä itse. Johtimien muokkaaminen onnistuu samalla tavalla kuin muidenkin komponenttien. Johtojen tiedoista kirjataan resistanssi (AC-Resistance), reaktanssi (Reactance), jännite (Rated Voltage), virta (Rated Current) ja pituus (Length of Line). Johtimet myös nimetään. Samaa tyyppiä ei tarvitse luoda aina uudestaan, vaan sitä pystyy käyttämään muissakin kohdissa Valitse projektityyppi -valikon (Select Project Type) kautta. Ainoastaan pituus tulee asettaa jokaiselle johtimelle erikseen. (DIgSILENT 2014, 21 - 23.)

Lopuksi muokataan kuormien tiedot. Kuormiin löytyy ohjelmasta valmis tyyppi Lod-1. Tämä valitaan Valitse yleinen tyyppi -valikon (Select Global Type) kautta. Jokaiselle kuormalle asetetaan syöttötilaksi (Input Mode) teho P ja loisteho Q. Toimintapiste-kohtaan (Operating Point) laitetaan haluttu kuormituspisteiden teho (Active Power) ja loisteho (Reactive Power). Tämän jälkeen kuvan 22 verkko oli valmis. (DIgSILENT 2014, 23.)



KUVA 22. PowerFactoryllä tehty valmis rengasverkko (Pirinen 2016.)

Verkon mallintamisessa käytettiin pohjana DMS600NE:llä tehtyä verkkoa, jotta saatuja tuloksia voidaan sujuvasti vertailla keskenään. Kuten aiemmin mainittiin, käytössä oli 16 MVA:n muuntaja. Johtojen resistanssi ja reaktanssi saatiin myös suoraan DMS600NE-ohjelman arvoista. Kuormille katsottiin DMS600NE:stä kuormituspisteiden teho ja loisteho.

6.2 Oikosulkuvirran laskenta

Ohjelmalla onnistuu tavallisen säteittäisen sekä rengasverkon laskenta samalla tavalla.

PowerFactoryn oikosulkuvirtojen laskenta perustuu valittuihin standardeihin. Näin voidaan olla varmoja, että tulokset ovat oikein ja ne ovat luotettavia. Laskuissa käytettiin standardia IEC60909. Laskentaa varten pitää valita vian tyyppi (Fault Type) ja vian sijainti (Fault Location). Tämän lisäksi Laskenta-valikosta (Calculate) tulee valita, halutaanko laskea maksimi- vai minimoioikosulkuvirtaa. Työssä laskettiin kolmivaiheisia maksimioikosulkuvirtoja kiskoissa sekä välipisteissä (haarapisteissä). Nämä valinnat on esitetty kuvassa 23.

Short-Circuit Calculation - Study Cases\Study Case\Short-Circuit Calculation.ComShc

Basic Options

Method: IEC 60909 Published: 2001

Advanced Options

Verification

Fault Type: 3-Phase Short-Circuit

Calculate: Max. Short-Circuit Currents

Max. Voltage Tolerance for LV-Systems: 10 %

Short-Circuit Duration

Break Time: 0,1 s Used Break Time: global

Fault Clearing Time (tth): 1, s

Fault Impedance

Enhanced Fault Impedance Definition

Resistance, Rf: 0, Ohm

Reactance, Xf: 0, Ohm

Fault Location

At: Busbars and Junction Nodes

Show Output

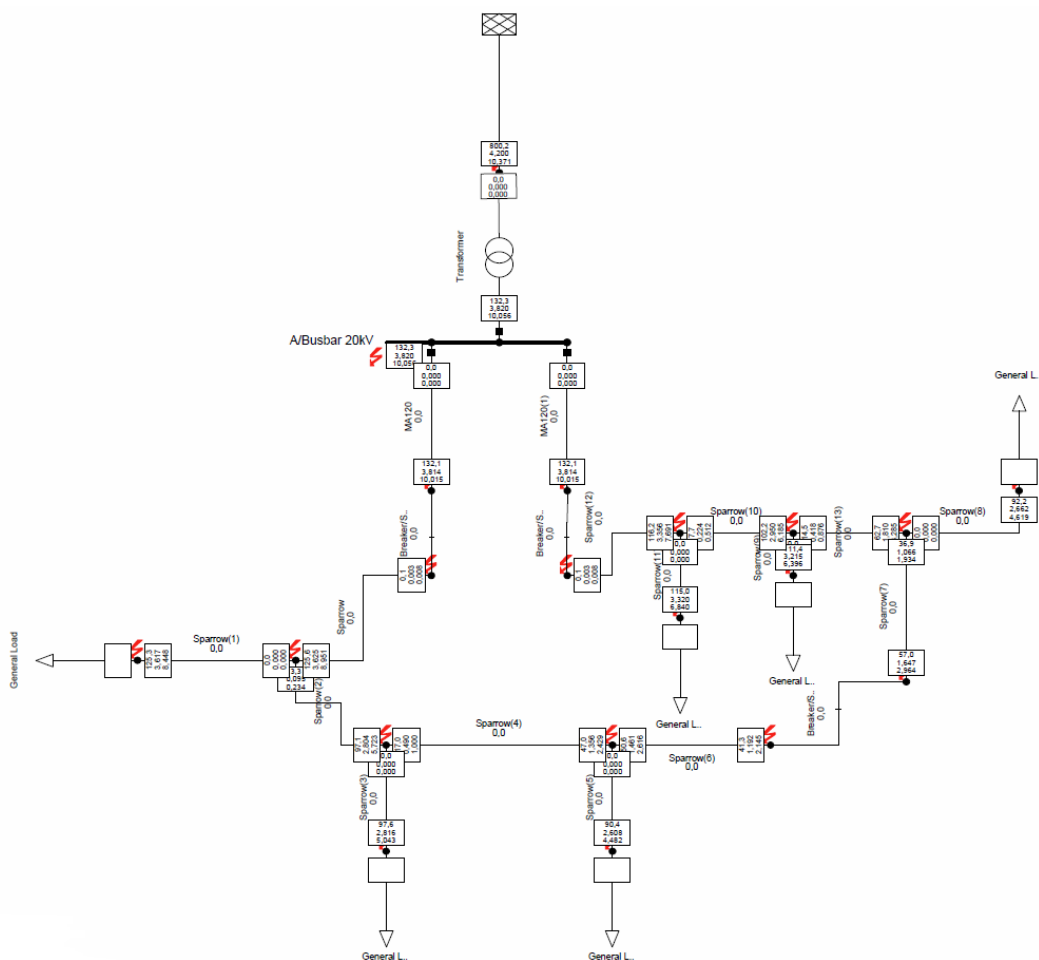
Command: Study Cases\Study Case\Output of Results

Shows: Fault Locations with Feeders

Execute Close Cancel Contents

KUVA 23. Oikosulkuvirran laskennan asetukset (Pirinen 2016.)

Suorita-painikkeella (Execute) ohjelma suorittaa laskennan. Tämän jälkeen laskennan tulokset tulevat näkyviin verkkoon. Kuvassa 24 on rengasverkko, jossa on laskettu oikosulkuvirrat.

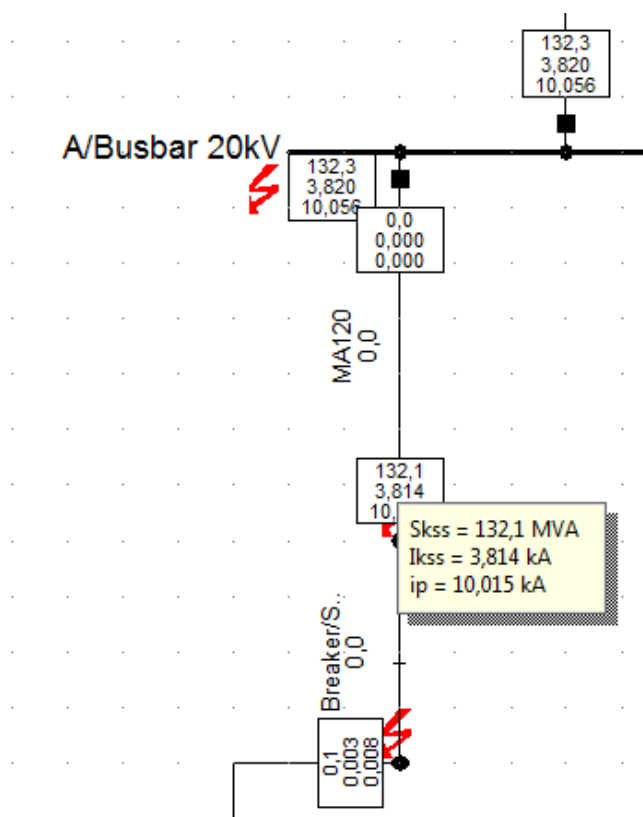


KUVA 24. Rengasverkon oikosulkuvirran laskennan tulokset (Pirinen 2016.)

Ohjelmalla onnistuu myös oikosulkulaskennan suorittaminen yhdestä tietystä verkon kohdasta. Tämä onnistuu esimerkiksi painamalla halutun kohdan päällä hiiren oikealla painikkeella ja valitsemalla avautuvasta valikosta kohdan Laskenta (Calculate), josta löytyy Oikosulkulaskenta (Short-Circuits). Tästä laskutavasta on hyötyä etenkin suojausta tarkasteltaessa.

Ohjelmisto laskee myös johdinten termisen kuormituksen. Ohjelma suorittaa laskennan vertaamalla oikosulkuvirtaa johtimen yhden sekunnin maksimioikosulkuvirtaan. Tuloksena saatu prosentuaalinen arvo tulee näkyville johdinten viereen.

Laskennan tuloksia voidaan tarkastella suoraan näytöltä. Viemällä hiiren osoittimen laskentatulostaikton päälle nähdään tulokset suurennettuna ja selitettynä (ks. kuva 25). Ikss kuvaa 3-vaiheista maksimioikosulkuvirtaa, joka on tässä solmupisteessä 3,814 kA. Laskennan tuloksia voi tutkia myös ohjelman alalaidassa olevan Tulosteet-ikkunan kautta (Output Window). Täältä laskentatulokset voi viedä myös PDF-muotoon.



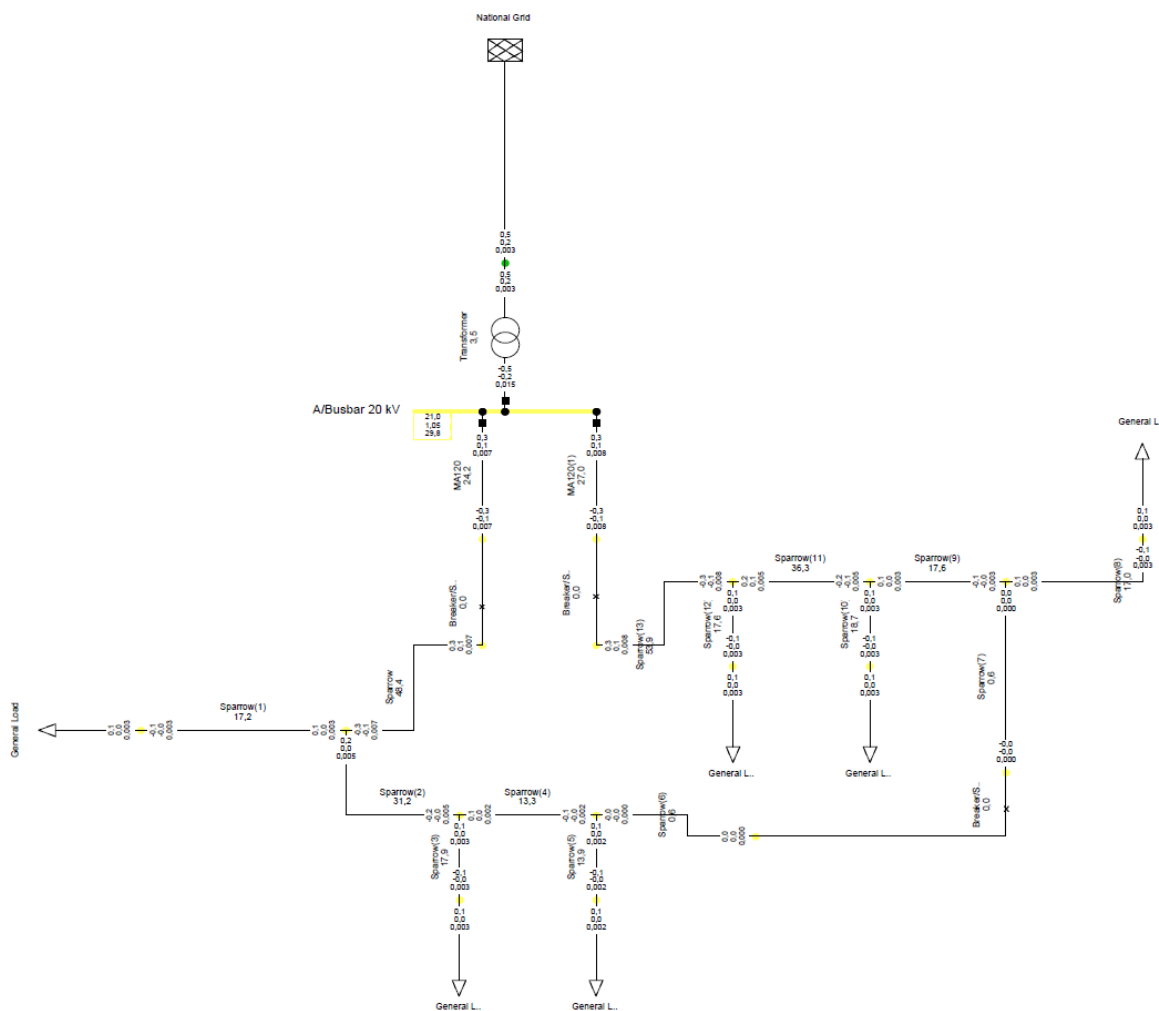
KUVA 25. Oikosulkulaskenta selityksineen (Pirinen 2016.)

6.3 Tehonjakolaskenta

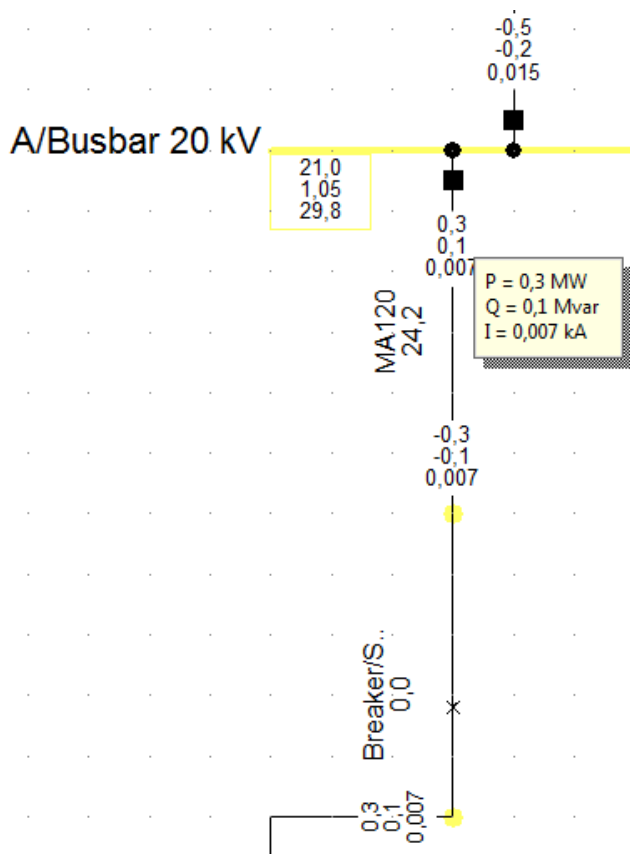
PowerFactoryn tehonjakolaskenta perustuu Newton-Raphsonin menetelmään. Valittavana on kaksi vaihtoehtoa, virtakaavat tai tehokaavat. Molemmissa menetelmissä ratkaisu saadaan käyttämällä iteratiivista menetelmää. Menetelmä valitaan laskettavan verkon mukaan. Suurille siirtojärjestelmille, etenkin jos käytössä on suuret kuormat, tehokaavat vaihtoehto toimii paremmin. Jakelujärjestelmille virtakaavat on parempi vaihtoehto. (DIGSILENT 2016, 439.)

Itse laskenta aloitetaan Laske tehonjako -painikkeesta (Calculate Load Flow). Tämä avaa valikon, josta voidaan halutessaan muokata laskennan asetuksia. Perusasetukset-välilehdellä (Basic Options) oleva Laskentatapa-kohta (Calculation Method) on tärkeä, koska koko laskenta perustuu tähän valintaan. Vaihtoehtoina on tehonjaon laskenta vaihtovirralla (AC Load Flow) symmetrisessä (Balanced) tai epäsymmetrisessä (Unbalanced) tilanteessa. Tämän lisäksi laskenta voidaan suorittaa tasasähkön puolella (DC Load Flow). Tässä työssä käytettiin laskennassa ensimmäistä vaihtoehtoa. Toinen tärkeä asetus on välilehdellä Lisäasetukset (Advanced Options.) Täältä valitaan kumpaa edellä mainituista Newton-Raphsonin menetelmistä käytetään. Vaihtoehtoina ovat siis virtakaavat (Current Equations) ja tehokaavat (Power Equations). Iteraation hallinta -välilehdeltä (Iteration control) voidaan muokata iteraation asetuksia, kuinka monta iteraatiota ja kuinka monta ulompaa silmukkaa (Outer Loop) halutaan. Työssä käytettiin 25 iteraatiota ja 20 ulompaa silmukkaa. Samalta välilehdeltä valitaan myös kuinka suuret tehonjakauman virheet sallitaan. Suppenemisen asetukset -kohta (Convergence options) on tärkeä etenkin, jos laskennassa esiintyy ongelmia. Tällä kertaa tätä valintaa ei tarvinnut käyttää. Jos kohtaan Automaattinen mallien sovitus (Automatic Model Adaptions for Convergence) laitetaan rasti ohjelma itse säätää malleja niin, että laskenta saadaan vietyä

loppuun. Kun asetukset on laitettu kuntoon, laskenta suoritetaan Suorita-painikkeella (Execute) kuten oikosulkulaskennassa. Laskennan tulokset tulevat myös näkyville samalla tavalla. Kuvassa 26 nähdään verkko, johon on suoritettu tehonjakolaskenta ja kuvassa 27 nähdään tulokset tiettyssä kohdassa selityksineen.



KUVA 26. Verkko, jossa on suoritettu tehonjakolaskenta (Pirinen 2016.)



KUVA 27. Tehonjakolaskenta selityksineen (Pirinen 2016.)

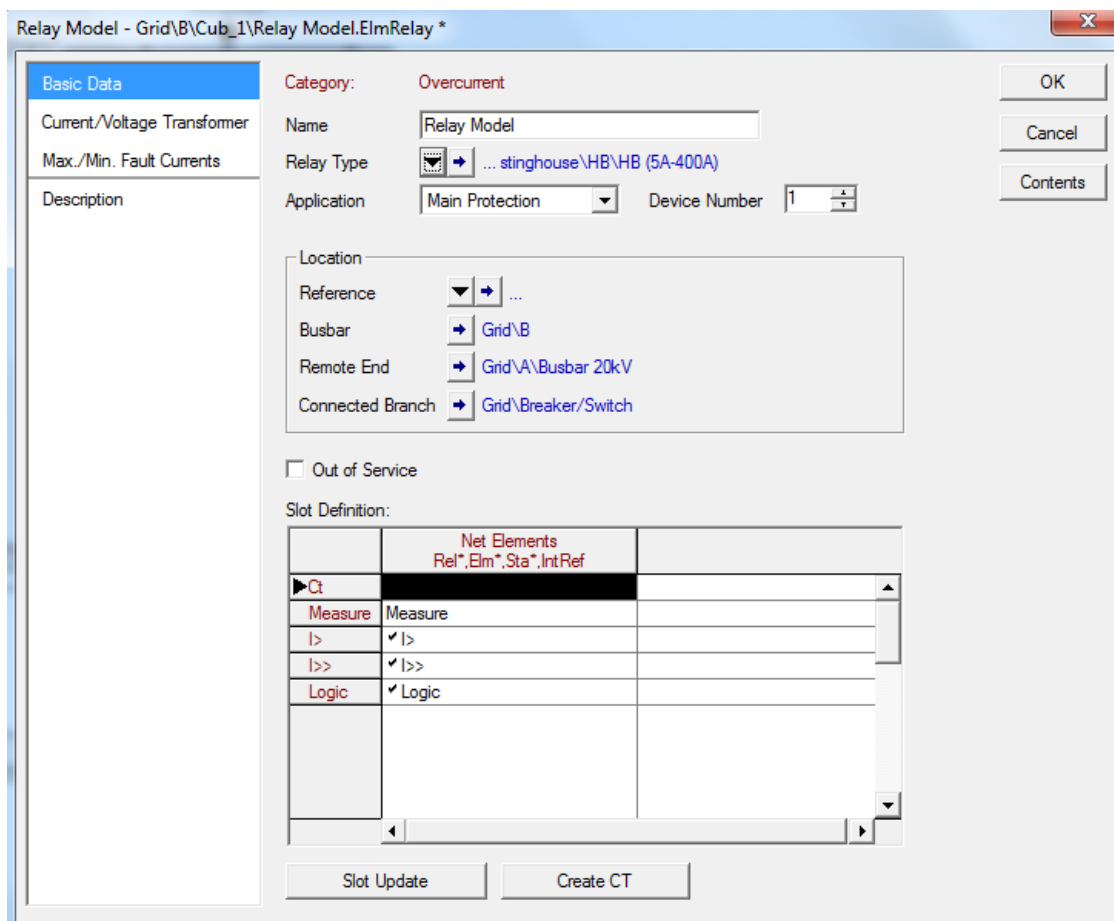
Kuvasta 27 nähdään, että kyseisen solmuvälin maksimiteho P on 0,3 MW, loisteho Q on 0,1 Mvar ja solmuvälin suurin kuormitusvirta I on 7 A. Tehonjakolaskennalla saadaan selville johdon kuormitus prosentteina. Tämä näkyy johdon nimen alle. Tässä verkossa esimerkiksi MA120 kaapelin kuormitus on 24,2 %.

6.4 Relesuojaus

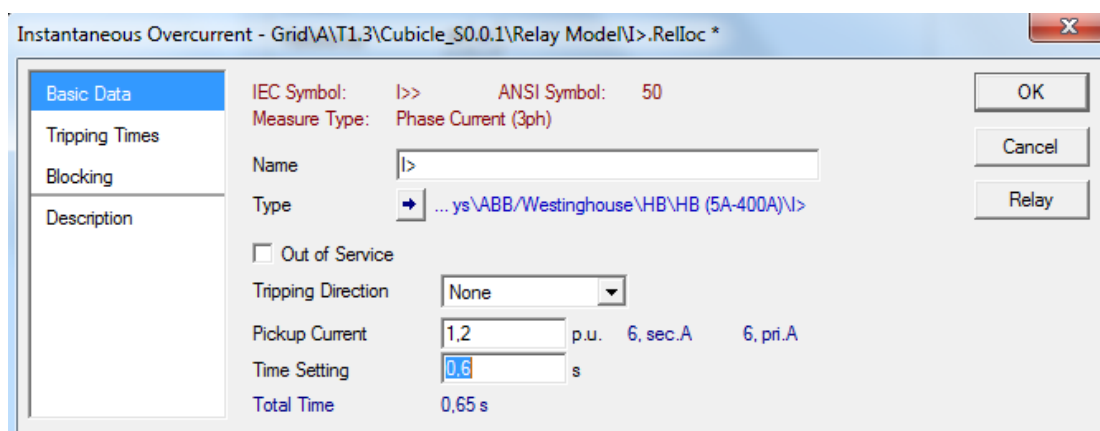
Relesuojauksen suunnittelu aloitetaan valitsemalla komponenttilistasta releen piirrosmerkki. Tämän jälkeen verkosta näytetään paikka johdon, rele halutaan sijoittaa. Kun haluttu paikka releelle on valittu, se tulee näkyvillä verkkoon osoitetun kohdan viereen. Rele voidaan lisätä verkkoon myös painamalla halutun kohdan päällä oikeaa hiiren painiketta ja avaamalla kohta Uudet laitteet (New Devices), josta valitaan Rele (Relay Model). Tämä on hyödyllinen tapa etenkin, jos rele halutaan lisätä kiskon yhteydessä olevaan lähdön katkaisijaan. Tällöin rele ei kuitenkaan tule näkyville verkkokuvaan ja sitä tulee muokata Muokkaa laitteita -valikon (Edit Devices) kautta, jonne päästään samalla tavalla kuin laitteita lisätessä.

Seuraavaksi tulee muokata reletietoja. Ohjelma sisältää paljon valmiita reletyyppjä eri valmistajilta. Halutessaan voi luoda myös oman releen. Kuvasta 28 kohdasta reletyyppi (Relay Type) päästään valitsemaan haluttu rele. Työssä käytettiin valmista ABB:n relettä. Suojauksen asetteluja päästään muokkaamaan tuplaklikkaamalla halutun suojauksen tason merkkiä kuvasta 28. Esimerkiksi avaamalla aikajälleenkytkennän asetukset päästään kuvan 29 valikkoon. Täältä kohdasta Aika-asetus (Time Setting) voidaan muokata suojauksen toiminta-aikaa suojalaitteen asetusten rajoissa.

Releen toiminta-ajaksi asetettiin 0,6 s. Jos kuvan 29 kohtaan Pois käytöstä (Out of Service) laittaa rastin voi kyseisen suojaus sulkea pois. Tällä kertaa vain aikalaukaisu otettiin käyttöön. Lopuksi releen yhteyteen tulee luoda virtamuuntaja. Tämä onnistuu reletiedoista Luo virtamuuntaja - painikkeella (Create CT). Työtä varten luotiin uusi virtamuuntaja tyyppi, jonka ensiövirtana oli 200 A ja toisiovirtana 5 A.

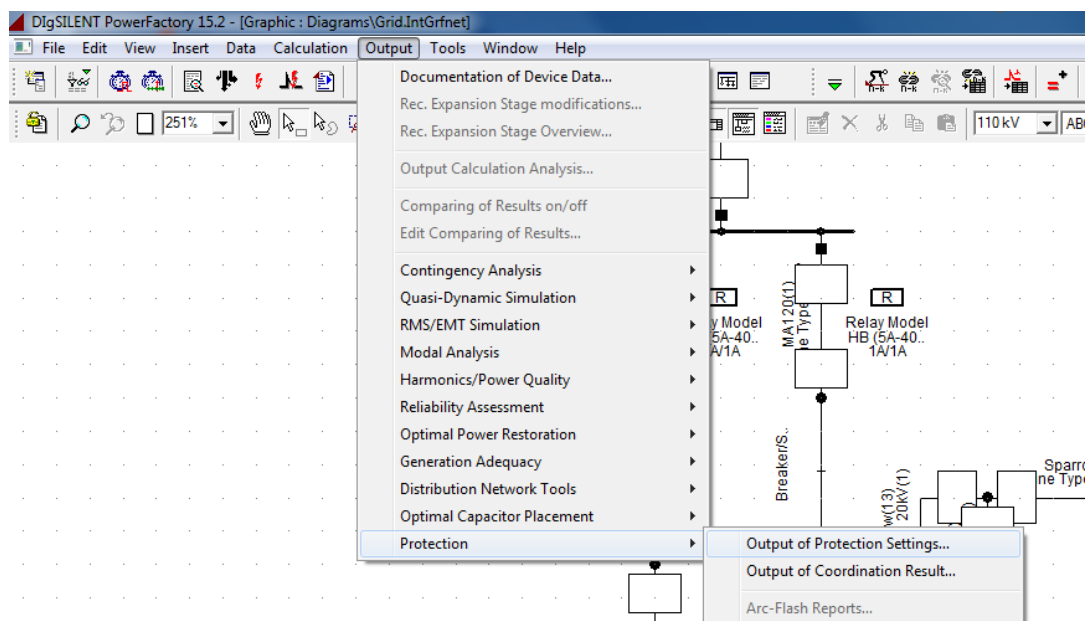


KUVA 28. Reletyyppin valinta (Pirinen 2016.)



KUVA 29. Releen aikalaukaisun asetukset (Pirinen 2016.)

Kaikkia verkon releitä pääsee tutkimaan kootusti kuvan 30 Tuloste-valikon (Output) kautta. Valikosta otetaan kohta Suojaus (Protection) ja tämän alavalikosta Suojausasetusten tuloste (Output of Protection settings). Seuraavaksi valitaan haluttu raportti, esimerkiksi ylijännitesuojaus.



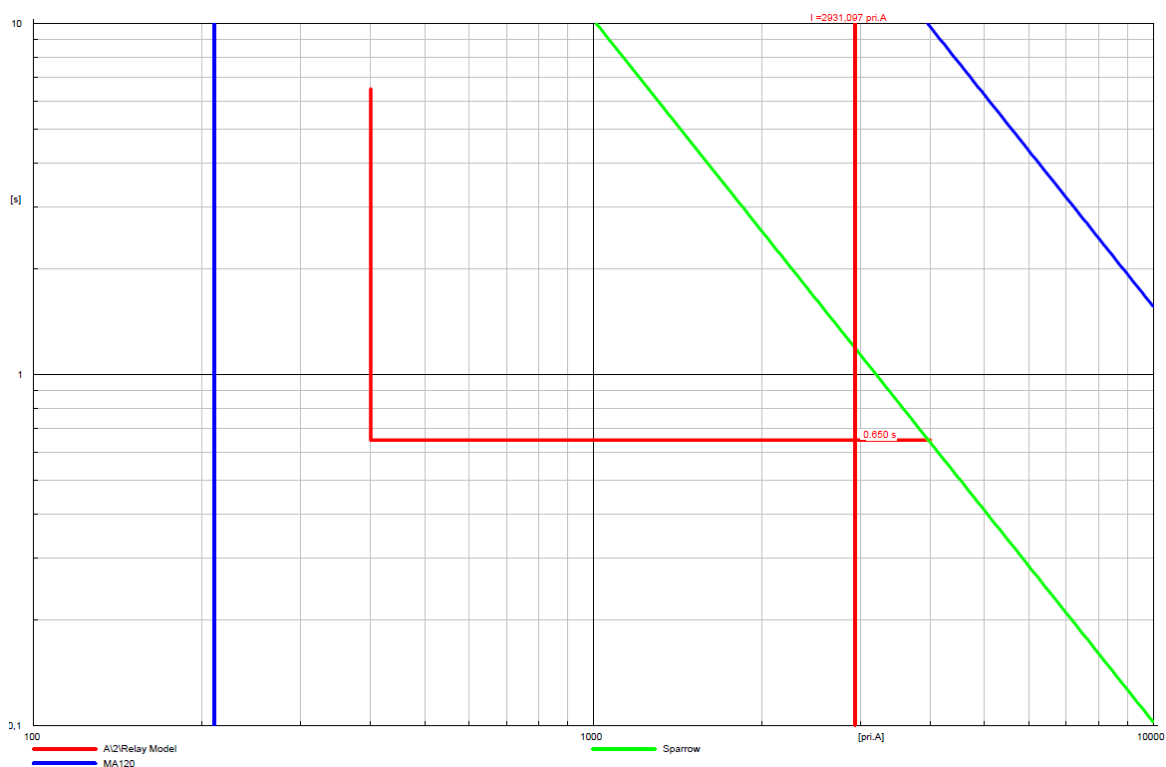
KUVA 30. Output-valikko (Pirinen 2016.)

Suorita-painikkeella (Execute) avautuu kuvan 31 lista, johon on kerätty kootusti kaikkien verkon suojalaitteiden tiedot. Listasta nähdään mm. suojan tyyppi, sijainti, valmistaja, laitemalli, suojausvaiheet, virta-asettelut sekä suojalaitteen aika-asettelut.

Protection Settings (Over-/Undercurrent)												
Project	rengas											
Study Case	Study Case											
	Protection Device	Location	Branch	Manufacturer	Model	Stage (Phase)	Current [pri.A]	Current [sec.A]	Current [p.u.]	Time	Characteristic	Directional
▶ 1	Relay Model	A/Busbar 20kV	MA120	BBC	HB (5A-400A)	I>	200	10,00	2,00	0,60	Definite	None
2	Relay Model	A/Busbar 20kV	MA120(1)	BBC	HB (5A-400A)	I>	120	6,00	1,20	0,30	Definite	None

KUVA 31. Verkon suojalaitteiden tiedot (Pirinen 2016.)

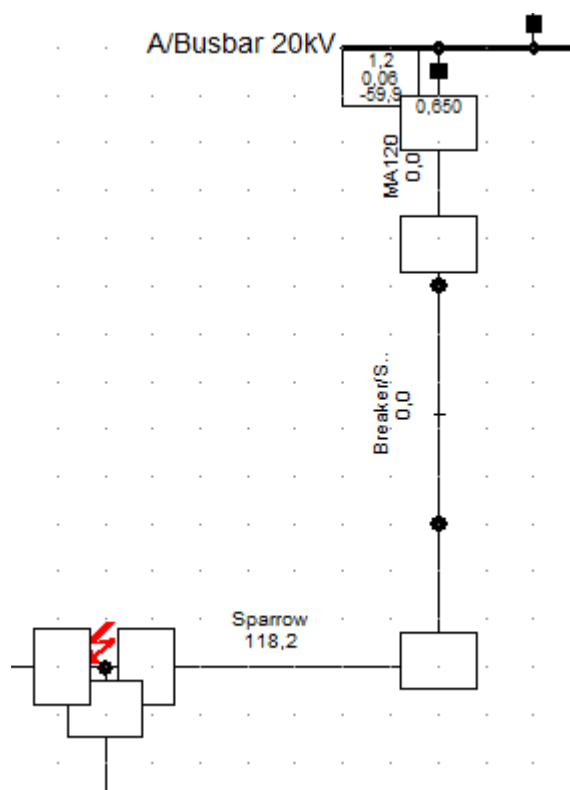
PowerFactoryssä on käytössä myös Kuvaajat-toiminto suojaus tarkastelua varten. Tämä on todella hyödyllinen ominaisuus, kun halutaan tutkia kuinka suojaus toimii. Kuvaajan saa luotua usealla eri tavalla. Yksi tapa on painaa hiiren oikealla painikkeella haluttua komponenttia ja valitsemalla avautuvasta valikosta kohta Näytä (Show) ja täältä kohta Aika-ylivirtakuvaaja (Time-Overcurrent Plot). Tämän jälkeen kuvaaja avautuu uudelle välilehdelle. Loput komponentit lisätään muuten samalla tavalla, mutta Näytä-valikosta (Show) otetaan kohta Lisää aika-ylivirtakuvaajaan (Add to Time-Overcurrent Plot). Kuvasta 32 nähdään työssä käytetyn verkon aika-ylivirtakuvaaja. Punaisella viivalla on kuvattu suojalaitteen toimintaa. Käytössä on vain aikalaukaisu, toiminta-aika on 0,65 s ja tällä ajalla havahtumisvirtana on noin 2931 A. Vihreä viiva kuvaa Sparrow-johdinta ja sininen MA120 maakaapelia. Pystyviiva kuvaa johdinten maksimi jatkuvaa kuormitusvirtaa. Tämä on molemmilla sama, joten viivat ovat päällekkäin. Kuormitusvirran arvo on 210 A. Kaksi muuta viivaa kuvaavat johdinten vahinkokäyriä (Damage Curve), johon vaikuttaa kunkin johtimen yhden sekunnin maksimioikosulkuvirta. Sparrowilla tämä on 3,2 kA ja MA120 kaapelilla 12,5 kA.



KUVA 32. Aika-ylivirtakuvaaja (Pirinen 2016.)

Jos verkko halutaan näkyviin suoraan kuvaajan viereen pitää käyttää ohjelman Data Manageria. Ensimmäiseksi tulee kuitenkin luoda polku (Path) haluamastaan verkon alueesta. Tämä onnistuu valitsemalla halutut komponentit ja painamalla hiiren oikeaa painiketta ja valitsemalla Polku-valikosta (path) kohta Uusi (New). Tämän jälkeen määritellään polun asetukset mm. väri. Kun polku on tehty voidaan avata Data Manager, josta tämä kyseinen polku etsitään. Painamalla hiiren oikealla painikkeella polun kuvan päällä avautuu valikko, josta luodaan kuvaaja samalla tavalla kuin aiemmin. Nyt kuitenkin kuvaajaan pitäisi ilmestyä kaikki polulla olevat suojalaitteet ja kuvaajan vierellä pitäisi näkyä verkko-kuva. Loput komponentit, esimerkiksi johtimet, lisätään kuvaajaan normaalisti. Nyt nähdään selkeästi, että mikä kuvaaja kuvaa mitäkin komponenttia.

Suojauksen toimintaa on paras tutkia suorittamalla oikosulkulaskenta jossain tietyssä verkon kohdassa. Oikosulkulaskennan suorittamisen lisäksi releiden asetteluajat tulee asettaa näkyville verkkoon. Tämä onnistuu esimerkiksi Näytä-valikon (View) kautta. Sieltä löytyy kohta Results for Edge Elements, jonka alavalikosta laitetaan merkki kohtaan Toiminta-ajat (Tripping Times). Nyt releiden toiminta-ajat tulevat näkyville niiden viereen tulostaatikoihin, jos releet toimivat oikein. Jos rele ei havaitse vikaa, aikana on 9999 s. Kuvasta 33 nähdään, että lähdön katkaisijan yhteydessä oleva rele havaitsee oikosulun ja sen toiminta-aika on 0,65 s.



KUVA 33. Releen toiminta-aika (Pirinen 2016.)

Kaikkien suojalaitteiden tarkempia tietoja kyseisessä vikatilanteessa voi tutkia Tulosteet-valikon kautta, josta löytyy kohta Laskennan analyysin tuloste (Output Calculation Analysis). Avautuvasta ikkunasta laitetaan merkki kohtiin Releet (Relays) ja Tarkemmat (Detailed) ja valitaan suorita. Tämän jälkeen Tulosteet-ikkunaan tulee näkyvillä releiden tarkat tiedot kyseisessä vikatilanteessa.

6.5 Verkon väritys

Laskennan tulosten tarkastelua voi halutessaan helpottaa hyödyntämällä ohjelman väritysominaisuutta. Kun haluttu laskenta on suoritettu, avataan valikosta kohta Kaavion väritys (Diagram Colouring). Tämän jälkeen tulee valikko, josta voidaan valita, mitä tuloksia värityksellä halutaan korostaa. Oikosulkulaskentaa suoritettaessa voidaan esimerkiksi valita väritys johdinten termisen kuormituksen mukaan. Tämä saadaan tehtyä laittamalla rasti kohtaan Muu (Other) ja valitsemalla ensimmäiseen tämän alla olevaan valikkoon Tulokset (Results) ja seuraavaan Terminen kuormitus (Loading of Thermal / Peak Short-Circuit Current).

Tämän lisäksi värityksellä voidaan korostaa myös tiettyjen komponenttien, esimerkiksi releiden, sijaintia. Tästä on hyötyä etenkin, jos releet on sijoitettu suoraan katkaisijoiden yhteyteen, jolloin ne eivät välttämättä näy suoraan verkkokuvassa. Tämä suoritetaan muuten samalla tavalla kuin termisen kuormituksen väritys, mutta nyt alavalikoista valitaan kohdat Toisilaitteet (Secondary Equipment) ja Releet, sulakkeet, virta- ja jännitemuuntajat (Relees, Fuses, Current and Voltage Transformers).

7 ABB DOC

DOC on ABB:n suunnittelema ja tuottama yleinen sähköverkkojen laskenta- ja suunnitteluohjelma. ABB DOC-ohjelma toimii nykyisin ABB:n e-Design alustalla. (ABB 2016.) e-Design on todella kätevä ja hyödyllinen alusta, koska sen yhteyteen voi asentaa muitakin ABB:n ohjelmistoja kuten CAT ja PDC. Näin kaikki ohjelmistot ovat helposti saatavilla samasta paikasta. Tämä helpottaa mm. ohjelmistojen hallintaa ja päivittämistä. Ohjelma toimii etenkin pienjännite- ja keskijänniteverkoissa.

Ohjelma laskee sähköverkoja seuraavilla määrityksillä. Keskijännitteellä $V_n \leq 36 \text{ kV } 50/60 \text{ Hz}$, eristetyssä tai kompensoidussa verkossa. Pienjännitteellä $V_n \leq 1 \text{ kV } 50/60 \text{ Hz}$, maadoitetussa tai maasta erotetussa verkossa. (ABB 2016, 6.)

7.1 Projektin aloitus

ABB DOC-ohjelman käynnistyessä tulee heti alussa nimetä projekti. Halutessaan voi antaa myös muita tietoja kuten asiakkaan nimen.

Tämän jälkeen valitaan projektin aihe. Vaihtoehtoina on yksiviivaesitys (Single Line Diagram) tai kytkentäkaavioiden muokkaus ja etunäkymä (Switchboards Configuration and Front View). Näistä ensimmäinen on normaali piirto-ominaisuus. Kun se on valittu, ohjelma kysyy, mitä standardeja halutaan käyttää laskennassa sekä millä standardeilla kaapeleiden mitat (Dimension) määritellään. Tässä vaiheessa valitaan myös syöttöverkon muoto. Vaihtoehtoina on pelkkä pienjänniteverkko tai yhdistetty pienjännite- ja keskijänniteverkko. Halutessaan voi valita myös pelkän generaattorisytön pienjännitteelle tai keskijännitteelle. Työssä valittiin laskentojen standardiksi IEC 60909-1 ja käyttöön otettiin yhdistetty pienjännite- ja keskijänniteverkko. Standardien ja syötön valinta on esitetty kuvassa 34.

Project wizard - Standards and power supply

Define here the standards for your calculations and the type of power supply

Calculations according to standard-method: IEC 60909-1

Cable dimensioning according to standard: IEC 60364

Power supply LV
Grid connected low-voltage installations

Power supply MV-LV
Grid connected medium and low-voltage installations

Genset LV
Standalone installations fed by low-voltage generators

Genset MV
Standalone installations fed by medium-voltage generators

Check that the default data are suitable for your installation's requisites browsing the Options

Options

ABB

< Back Next > Cancel

KUVA 34. Standardien ja syötön valinta (Pirinen 2016.)

Seuraavaksi määritellään haluttu asettelu projektille. Valinta kannattaa tehdä sen perusteella, kuinka iso verkko on kyseessä ja kuinka haluaa verkon komponenttien sijoittuvan kuvaan. Tätä asetusta voi myös muuttaa jälkikäteen Asetus-palkin kautta.

Tämän jälkeen määritellään tarkemmin syöttöverkon asetukset. Määriteltävänä on keskijännitejakelun jännite U_r , verkon tyyppi ja alkuperäinen oikosulkuvirta I''_k . Jännitteeksi asetettiin 20 kV ja oikosulkuvirraksi 4,2 kA. Näiden lisäksi valitaan myös pienjännitepuolen jännite, vaihejärjestys, verkon tyyppi ja taajuus. Pienjännitepuolen jännitteeksi valittiin 400 V ja taajuudeksi 50 Hz. Verkon tyyppinä käytettiin TN-S verkkoa. Nämä valinnat on esitetty kuvassa 35.

Project wizard - Power supply MV

Ur [V] I^k [kA]
 3I_o [A]

LV section default values

[V] [Hz]


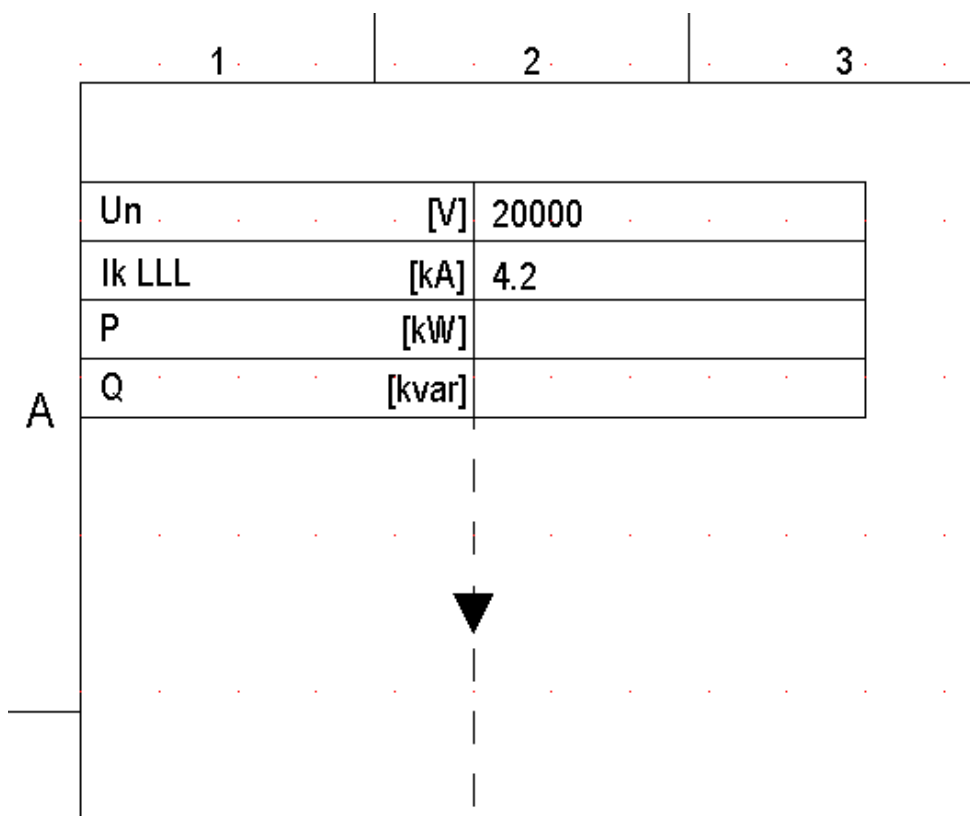

Options

ABB < Back Next > Cancel

KUVA 35. Syöttöverkon asetukset (Pirinen 2016.)

Lopuksi vielä valitaan haluttu kytkentäkaavio (Switchboard). Tämän jälkeen ohjelma asettelee syöttöverkon kuvaan. Nyt verkkoon voidaan alkaa lisäämään komponentteja. Kuvassa 36 näkyy projektiin laitettu syöttöverkko.



KUVA 36. Syöttöverkko (Pirinen, 2016)

7.2 Verkon mallinnus

Kuten PowerFactorylläkin, käytettiin DOC:illa verkon pohjana DMS600NE:llä rakennettua verkkoa, jotta tulosten vertailu olisi helpompaa. Kaikki DOC:in tärkeimmät komennot löytyvät ohjelman yläpalkista. Niitä ovat mm. asetukset, komponentit, laskenta ja muut verkon muokkaus komennot. Komponentit lisätään verkkoon yksinkertaisesti valitsemalla haluttu komponentti yläpalkista ja sijoittamalla se haluttuun kohtaan. Komponentteja voi myöhemmin siirtää Siirrä-komennolla (Move) sekä käännellä Käännä-komennolla (Rotate). Verkon suunnittelussa tulee huomioida, että samantyyppisiä komponentteja ei voi kytkeä peräkkäin suoraan, vaan näiden välillä tulee laittaa yhdistin (Connection).

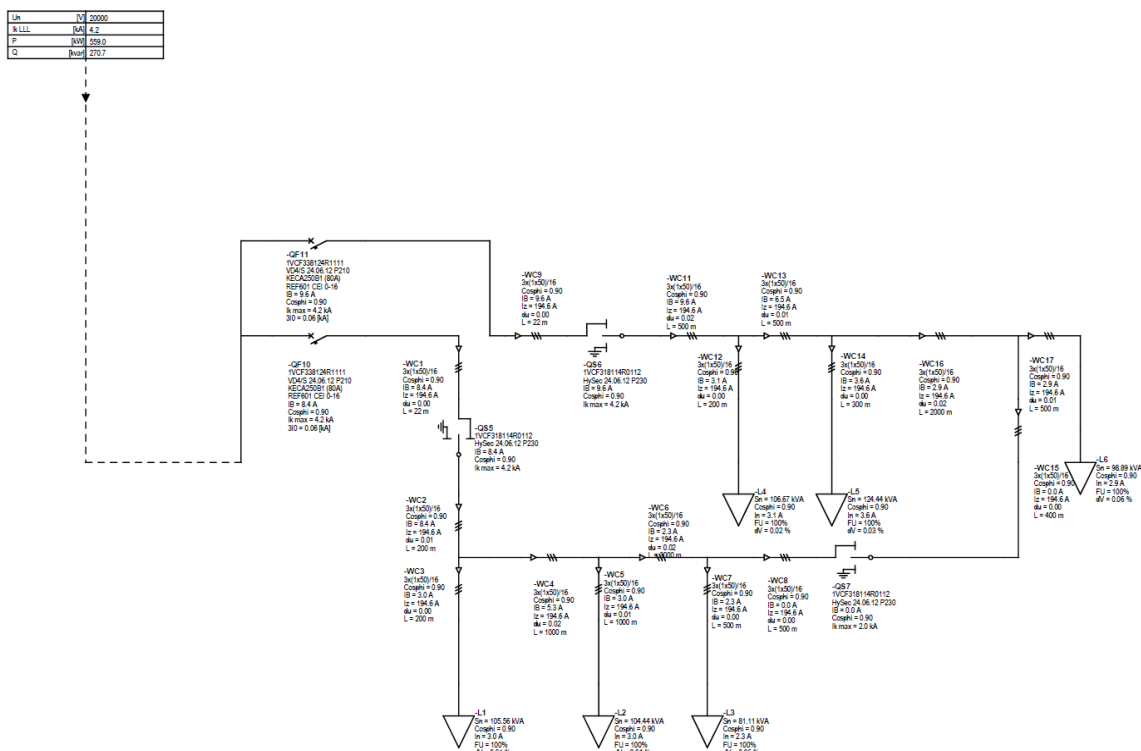
7.3 Laskenta

ABB DOC -laskentaohjelma mitoittaa ja valitsee automaattisesti muuntajat, kaapelit, jakelukiskot ja suojalaitteet. Näitä kaikkia valintoja voi kuitenkin halutessaan muokata itse. Lisäksi kohteita pystyy myös lukitsemaan, jolloin ohjelma ei vaihda niitä enää automaattisesti. Ohjelmalla voidaan laskea mm. verkon oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat kaikissa verkon kohdissa. Ohjelmalla voi määrittää jokaiselle eri kuormalle tehon, tehokertoimen ja tasauskertoimen, mikä mahdollistaa todella tarkat laskennat. (Luoto 2015.)

Mitoituksen toteutuksessa ohjelma käyttää ABB:n omia komponentteja. Kaikista verkossa käytetyistä suojalaitteista, joita ovat katkaisijat ja sulakkeet, voidaan kerätä laukaisukäyrät samaan taulukkoon ohjelman Taulukko-osiossa (Curves). Näin voidaan tutkia suojauksen selektiivisyyttä. Jos selektiivisyys ei ole kunnossa, ohjelma ilmoittaa siitä punaisella värillä. Ohjelmalla voidaan myös tutkia verkon toimintaa erilaisissa tilanteissa esimerkiksi availemalla ja sulkemalla eri katkaisijoita sekä sammuttamalla ja käynnistämällä laitteita. Verkon tarkastelut ja määrytykset ohjelma suorittaa automaattisesti Laskelmat-painikkeella (Compute). Ohjelma korjaa tällöin lukitsemattomat komponentit paremmin tilanteeseen sopiviksi ja ilmoittaa verkossa olevat virheet sekä heikot kohdat punaisella värillä. Vihreällä värillä ohjelma ilmoittaa verkon toimivat osat. (Luoto 2015.)

Ohjelman tekemät laskelmat ja mitoitukset perustuvat standardeihin. Näin varmistetaan, että kaikki laskelmat tapahtuvat määräysten mukaan. Halutut standardit valitaan samalla, kun määritellään muutkin laitoksen asetukset ja ominaisuudet. (Luoto 2015.)

Laskennan keskeiset tulokset tulevat näkyville verkkoon komponenttien viereen. Tarkempia tuloksia voi tarkastella myös suoraan komponenttien tiedoista. Komponentin tiedot voidaan avata mm. tuplaklikkaamalla kyseistä komponenttia ja tutkimalla avautuvia välilehtiä.

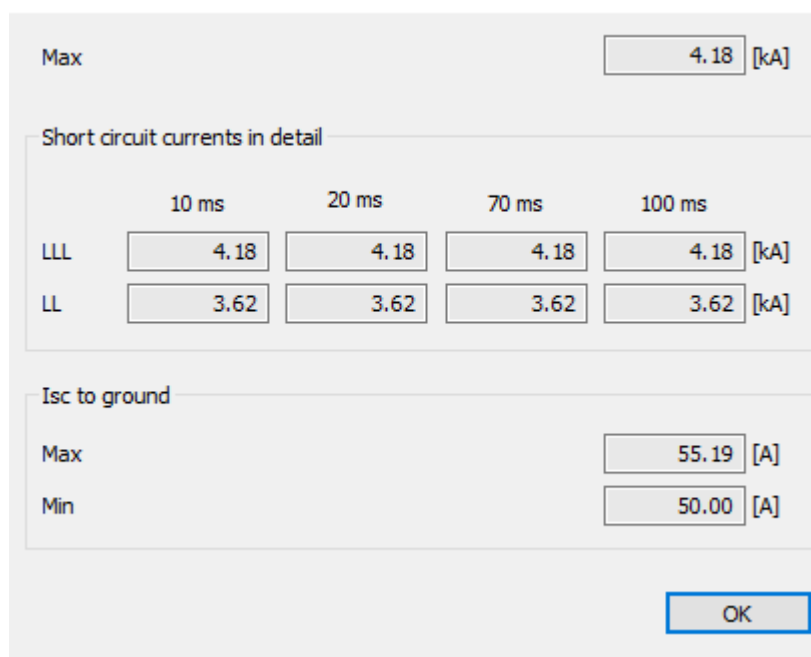


KUVA 37. Laskentatulokset verkolla (Pirinen 2016.)

Kuvassa 37 nähdään laskentatulokset verkolla. Laskentatulokset-laatikoita voi halutessaan siirrellä Siirrä-toiminnolla (Move Labels). Tämä on hyödyllistä etenkin tilanteissa, joissa joidenkin komponenttien tulokset menevät verkkokuvassa päällekkäin.

Kuvissa 38 ja 39 on kaapelin WC11 laskentatietoja. Kuvasta 38 nähdään, että kyseisen kaapelin kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta on 4,18 kA. Kaapelin jännitteenalenema (Voltage Drop) on 0,02 % ja johdon virta kyseisessä paikassa (I_s) on 9,6 A. Nämä arvot voidaan havaita kuvasta 39.

Short circuit currents



KUVA 38. Kaapelin oikosulkuvirtoja (Pirinen 2016.)

Further results X

	L1	L2	L3
I _s	9.6 [A]	9.6 [A]	9.6 [A]
cosφ	0.90	0.90	0.90

I _z	194.56 [A]
Voltage drop	0.02 [%]
Dissipated power	48.36 [W]
Working temperature	20.11 [°C]

K²S² Working temperature

Phases	6.12e+00 [A ² S]
Screen	2.75e+00 [A ² S]

Cable impedances

	Phase
R (Working Temp.)	176.077 [mOhm]
R (20 °C)	176.000 [mOhm]
R (Short Circuit Temp.)	337.920 [mOhm]
C _e	0.090 [μF]
X	114.610 [mOhm]

OK Cancel

KUVA 39. Kaapelin tietoja (Pirinen 2016.)

7.4 Relesuojaus

ABB DOC suorittaa myös suojauksen suunnittelun Laskenta-painikkeella (Compute). Tällöin ohjelma valitsee sopivat suojalaitteet katkaisijoiden yhteyteen. Se valitsee myös suojattavat kohteet. Näitä valintoja voi halutessaan myös muokata. Kuvasta 40 nähdään sellaisen katkaisijan tiedot, jonka yhteyteen on lisätty relesuojaus. Kuvan 40 kohdasta Suojatut kohteet (Protected Objects) voidaan nähdä ja muokata releen suojaamia komponentteja.

Feeder properties ×

MV cable (-WC11) MV Disconnecter (-QS6) MV cable (-WC9) **MV circuit-breaker (-QF12)**


Description


Is 9.6 [A] LLL 20000 [V]
Iz [A] IT 50 [Hz]

Switchboard1
Pattern

Isc max 4.20 [kA] Protected objects
Isc to ground 0.01 [A] Details

Family <All possibilities >
Version <All possibilities >
Icw <All possibilities >
Step <All possibilities >



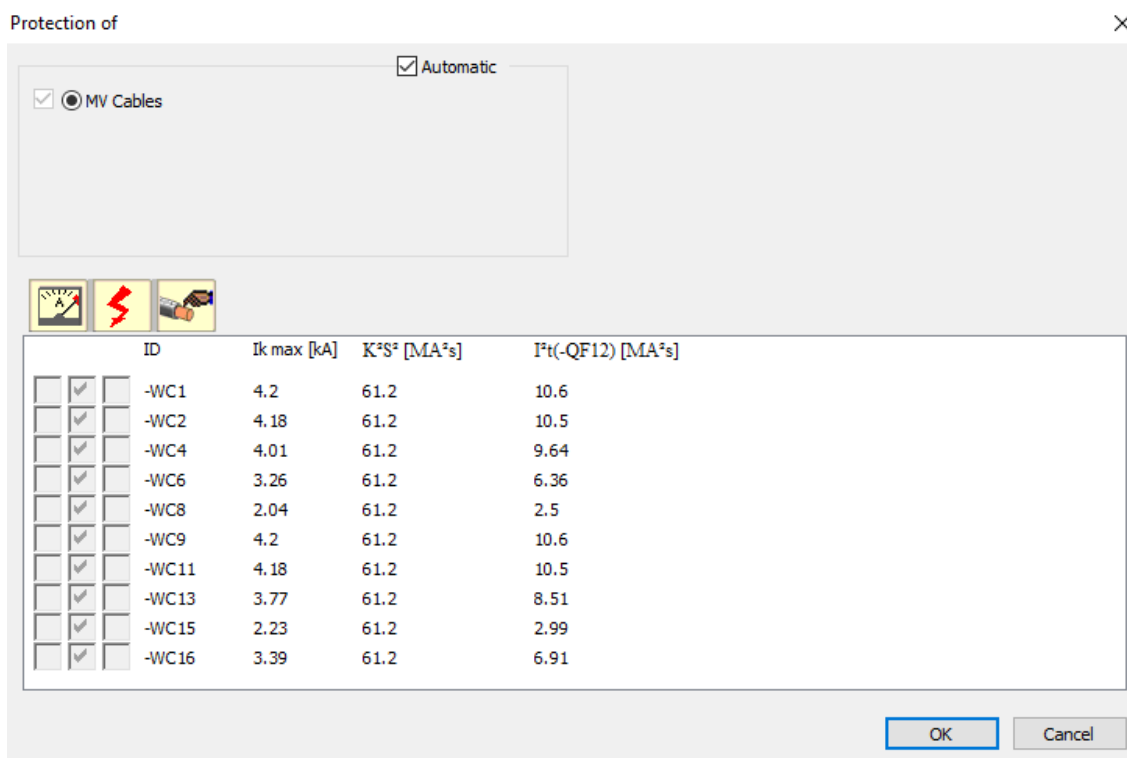
 **VD4/S 24.06.12 P210** Select

Trip unit REF542Plus
TA Combisensor 80A TO <none >
In primary 80 [A] In primary [A]
In secondary 0 [A] In secondary [A]

ABB OK Cancel

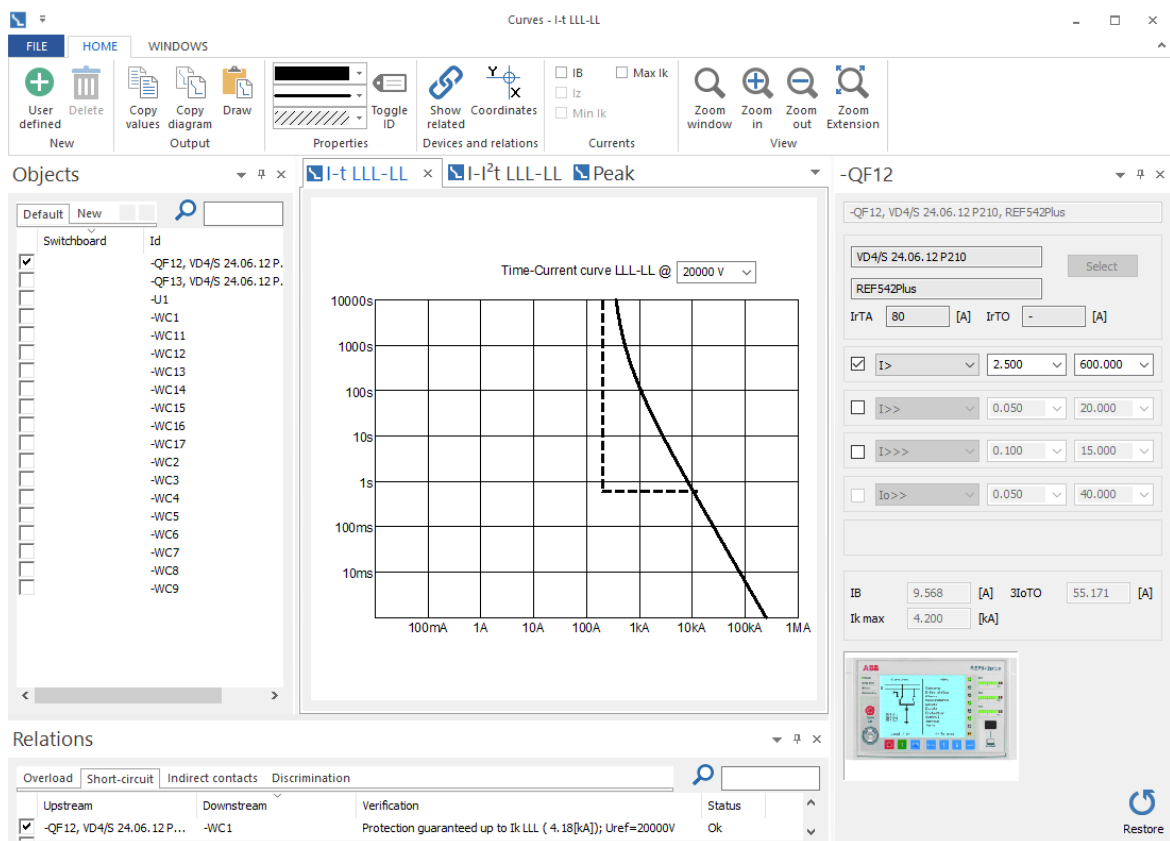
KUVA 40. Katkaisijan tiedot (Pirinen 2016.)

Kuvassa 41 on esitetty releen QF12 suojaamat kohteet. Kuvasta voidaan nähdä myös, että käytössä on oikosulkusuojaus. Tämä voidaan havaita siitä, että keskimmäisellä sarakkeella on merkintöjä. Ensimmäinen sarake kuvaa ylikuormitussuojausta ja kolmas kosketussuojausta. Kuvasta nähdään lisäksi suojattavien kohteiden maksimioikosulkuvirrat.



KUVA 41. Suojattavat kohteet (Pirinen 2016.)

Kuvaajat-toiminnolla (Curves) voidaan tutkia suojauksen toimintaa ja muuttaa suojalaitteen toiminta-aikoja sekä havahtumisvirtaa. Sieltä voidaan valita myös, halutaanko käyttää aikalaukaisua vai pikalaukaisua. Kuvasta 42, nähdään kuinka suojauksen toiminta on suunniteltu tässä työssä. Katkoviiva kuvaa suojalaitteen toimintaa. Kuvan 42 oikeasta reunasta voidaan nähdä, että käytössä on vain aikalaukaisu sekä mikä reletyyppi on käytössä. Tässä työssä käytettiin relettä REF542Plus, koska se sopii hyvin jakeluverkkoihin. Virta-asettelun kertoimena on 2,5 eli havahtumisvirraksi tulee 200 A ja suojauksen toiminta-aika on 600 ms eli 0,6 s. Kuvan alareunasta Tila-kohdasta (Status) nähdään, että suojaus toimii oikein.



KUVA 42. Suojauksen toiminta (Pirinen 2016.)

8 VERTAILUN TULOKSET

Verkon rakentaminen on jokaisella ohjelmalla melko selkeää ja helppoa. DMS600NE:llä etuna on se, että verkko voidaan suunnitella suoraan karttapohjalle. Jos kuitenkin ajatellaan pelkästään verkon rakentamista, selkein ohjelma on ABB DOC, koska se valitsee automaattisesti jokaiseen tilanteeseen sopivat komponentit. Kahdella muulla ohjelmalla pitää itse valita halutut komponentit ja tarvittaessa myös luoda ne ohjelmaan. Etenkin PowerFactoryllä jouduttiin tekemään verkkoa varten useita eri komponentteja kokonaan, esimerkiksi johtimet ja muuntajat.

Jokaisella ohjelmalla onnistuu sekä säteittäisen että rengasverkon suunnittelu ja laskenta. DOC ja PowerFactory eivät ota laskennassa kantaa verkon muotoon. DMS600NE:llä rengasverkon laskennat suoritetaan eri toiminnoilla kuin tavallisen säteittäisen verkon. Tästä syystä rengasverkkojen suunnittelu on hieman helpompaa DOC:illa ja PowerFactoryllä, koska rengasverkon toimintoja ei tarvitse opetella erikseen. Mikäli DMS600NE:llä yritetään suorittaa rengasverkon laskentaa tavallisilla laskentatoiminnoilla, ohjelma käsittelee verkkoa säteittäisenä ja laskenta menee väärin. Tämän huomaa esimerkiksi tehonjakolaskennassa siitä, että lähdöt yhdistävän johdon virta on 0 A ja teho 0 kW. Rengasverkon oikosulkulaskentaa ei voi suorittaa DMS600NE:llä ollenkaan normaaleilla laskentatoiminnoilla, vaan ohjelma ilmoittaa ainoastaan, että verkolla on rengas.

DMS600NE:llä ja PowerFactoryllä rengasverkon oikosulkulaskennan tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Esimerkiksi verkon alkupäässä oikosulkuvirrat ovat molemmilla ohjelmilla noin 3 kA. PowerFactoryn ja DMS600NE:n rengasverkon tehonjakolaskennan tulokset ovat myös hyvin samankaltaisia. Esimerkiksi verkon alkupäässä olevan johtimen virta on DMS600NE:llä 6 A ja PowerFactoryllä 7 A. Tehot samassa kohdassa ovat 0,21 MW ja 0,3 MW. Pienet erot johtuvat ohjelmien eri tavoista kuvata verkkoa sekä suorittaa laskentoja. DOC:illa laskentojen tulokset eivät täsmänneet täysin kahden muun ohjelman kanssa, koska DOC käyttää vain ABB:n omia komponentteja, mikä voi aiheuttaa melko suuriakin eroja laskennassa.

Pienjännite- ja keskijänniteverkkojen suunnitteluun ja opetukseen työn perusteella sopii parhaiten DMS600NE. Ohjelma on selkein ja helpoin käytettävä. Siitä löytyy myös hyvät listaustoiminnot joiden avulla laskentatulokset saadaan kätevästi ja kootusti esille. Listaustoiminnoista on etenkin hyötyä relesuojauksen suunnittelussa, koska niiden avulla nähdään suoraan toimiiko suojaus oikein jokaisessa verkon kohdassa ja mitä verkon kohtia joudutaan mahdollisesti vahvistamaan. Ohjelmalla on kätevää kokeilla eri havahtumisvirran ja oikosulun keston arvoja ja näin löytää ne arvot, joilla suojaus toimii oikein. Tämä on selvästi DMS600NE-ohjelmiston etu verrattuna muihin laskentaohjelmiin. DMS600NE ja DOC eivät toimi suurjännitepuolella (110 kV), joten suurjänniteverkkojen suunnittelussa ja opetuksessa tulee käyttää PowerFactoryä.

Kun vertaillaan DOC:in ja PowerFactoryn toimintoja, nousee esille muutama oleellinen asia. Mikäli verkolle tarvitaan suorittaa pelkästään peruslaskentoja, kuten oikosulkuvirtojen ja tehonjaon laskentaa, on PowerFactory siihen sopiva ohjelma. Jos verkolle halutaan suunnitella myös suojausta, työn perusteella siihen sopii paremmin DOC. DOC:illa on helppoa valita halutut suojalaitteet ja

toiminta-arvot. Ohjelma ilmoittaa myös selkeästi, että toimiiko valittu suojaus oikein. Suojauksen suunnittelu PowerFactoryllä on huomattavasti työläämpää ja hankalampaa kuin kahdella muulla ohjelmalla, etenkin ilman selkeitä ohjeita. Opinnäytetyötä tehdessä ei saatu täyttä varmuutta siitä, että miten nähdään varmasti, toimiiko PowerFactoryllä suunniteltu suojaus oikein. DOC:ssa ja PowerFactoryssä on kuitenkin apuna hyvä Kuvaaja-toiminto, joka auttaa suojausta tehdessä. Jos verkossa halutaan käyttää muita kuin ABB:n komponentteja, ei DOC:ia voi käyttää.

Työn perusteella kaikki ohjelmat sopivat hyvin verkkojen suunnitteluun sekä opetukseen. Jokaisella ohjelmalla on omat etunsa ja tilanteet, joihin ne soveltuvat parhaiten.

9 YHTEENVETO

Työssä oli tarkoituksena tutkia ja vertailla kolmen eri sähköjakeluverkon laskentaohjelmien ominaisuuksia. Nämä ohjelmat olivat DMS600NE, ABB DOC ja PowerFactory.

Oikosulkuvirtojen laskenta onnistuu kaikille ohjelmilla sekä säteittäisessä että rengasverkossa. DOC ja PowerFactory eivät ota laskennassa kantaa verkon muotoon, joten ne suorittavat säteittäisen ja rengasverkon laskennat samoilla toiminnoilla. DMS600NE-verkkotietojärjestelmällä säteittäiset ja rengasverkot lasketaan eri tavoin. Rengasverkon laskenta suoritetaan Rengasverkon oikosulkulaskenta-painikkeella, jonka jälkeen tulee osoittaa vikasolmu. Rengasverkon oikosulkulaskennassa ei ole käytössä Listaus-toimintoa kuten tavallisen säteittäisen verkon laskennassa, vaan tuloksia joudutaan tutkimaan solmuvälialiokeilla.

Tehojakolaskentaan pätevät samat periaatteet, eli DOC ja PowerFactory suorittavat laskennan samoilla toiminnoilla molemmille verkoille. DMS600NE:llä tämä joudutaan suorittamaan Rengasverkon laskenta -painikkeella. Muuten ohjelma käsittelee verkkoa normaalina säteittäisenä verkkona ja laskenta ei onnistu oikein.

Suojauksen suunnittelussa jokainen ohjelmisto on hyvin erilainen. DOC hoitaa suojauksen suunnittelun automaattisesti, samalla kun se hoitaa muutkin laskennat. Suojauksen toimintaa ja asetuksia, esimerkiksi toiminta-aikaa, havahtumisvirtaa ja reletyyppiä, voi kuitenkin halutessa muuttaa Kuvaajat-toiminnon (Curves) kautta. Sieltä voidaan myös tarkistaa, toimiiko suojaus oikein. DMS600NE:llä relesuojauksen suunnittelu on todella yksinkertaista ja helppoa. Relesuojaus suoritetaan lähdön katkaisijalta reletiedoista. Reletiedoista valitaan, mitkä suojauksen tasot otetaan käyttöön, esimerkiksi aikalaukaisu, ja asetellaan toiminta-ajat ja havahtumisvirta halutuiksi. Suojauksen toimivuutta päästään tutkimaan, kun suoritetaan oikosulkulaskenta ja tutkitaan laskentalistausta. Jos listauksen sarakkeessa 12 ei ole merkintöjä, suojaus toimii oikein. PowerFactoryllä suojauksen suunnittelu on melko hankalaa. Relesuojauksen tekeminen kannattaa aloittaa lähdön katkaisijalta, jonka yhteyteen haluttu rele voidaan lisätä. Ohjelma sisältää paljon valmiita reletyyppiä, mutta sopivan löytäminen ja oikeiden asetusten säätäminen on työlästä ja hieman sekavaa. PowerFactory sisältää kuitenkin myös Kuvaajat-toiminnon, joka auttaa suojauksen suunnittelussa.

DMS600NE:llä ja PowerFactoryllä laskentojen tulokset vastasivat hyvin toisiaan. Tämä johtui siitä, että ohjelmilla pystyi käytännössä laittamaan kaikkien komponenttien tiedot ja arvot samanlaisiksi. DOC taas käyttää vain ABB:n komponentteja, joten sen tulokset eivät täsmänneet täysin kahden muun ohjelmiston kanssa. DOC eroaa muista ohjelmistoista myös siinä, että se ei hoida pelkästään laskentaa vaan se suorittaa samalla myös mitoituksen. Mitoitus tarkoittaa sitä, että ohjelma valitsee myös automaattisesti verkkoon sopivat komponentit. Näitä valintoja voi kuitenkin haluttaessa muokata.

PowerFactory toimii kaikilla jännitetasoilla eli pien-, keski- ja suurjännitteillä. DOC ja DMS600NE toimivat ainoastaan pien- ja keskijänniteverkoissa.

Näistä ohjelmistoista opetukseen sopii parhaiten DMS600NE. Suurin syy tähän on se, että se on selkein ja helpoin käytettävä. Ohjelman etuina ovat myös hyvät listaustoiminnot, joilla laskentatulokset saadaan kootusti esille. Listaustoiminnoista on apua etenkin relesuojauksen suunnittelussa. Lisäksi ohjelmalla voidaan suunnitella verkko suoraan karttapohjalle, mikä helpottaa verkon hahmottumista. DMS600NE-verkkotietojärjestelmä oli ainut ohjelmisto, josta oli käytössä suomenkielinen versio.

LÄHTEET

- ABB 2003. Integra pääkäyttäjän ohje.
- ABB 2009. MicroSCADA Pro DMS 600 4.3 Pääkäyttäjän ohje.
- ABB 2013. Hajautetun tuotannon mallintaminen DMS600:ssa.
- ABB 2016a. DMS600 NE Verkostolaskenta ABB MicroSCADA Pro DMS600.
- ABB 2016b. DOC. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <http://new.abb.com/low-voltage/launches/selectivity/tools-support/doc>
- ABB 2016c. DOC User Manual.
- DIgSILENT 2014. User's guide - DIgSILENT PowerFactory.
- DIgSILENT 2016. User Manual.
- ELOVAARA, Jarmo ja LAIHO, Yrjö 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Espoo: Otakustantamo.
- KIVELÄ, Simo 2000. M niinkuin matematiikka. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <https://matta.hut.fi/matta/isom/isom.pdf>
- KORPINEN, Leena 2008. Sähkön siirto- ja jakeluverkot. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- LAKERVI, Erkki ja PARTANEN, Jarmo 2012. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy.
- LUOTO, Heikki 2015. Sähkönjakelun runkosuunnitelma Technopolis Microkatu 1, Kuopio. Savonia-ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/92107>
- Opiks-Tiimi Oy 2016. Relesuojaukset keskijänniteverkossa. Opintomateriaali. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- ROUVALI, Juhani 2015. Sähkönsiirtotekniikka. Opintomateriaali. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- RÖNKKÖ, Ville 2015. DMS600NE-verkkotietojärjestelmän tietokannan kokoonpano. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/103452>
- Savonia-ammattikorkeakoulu 2016. Tutusta Savoniaan. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <http://portal.savonia.fi/amk/>
- TARKKA, Pertti, MÄÄTTÄNEN, Kari ja HIETALAHTI, Lauri 2006. Piirianalyysi 1. Helsinki: Edita Prima Oy.
- ZHANG, Wen Wen 2014. Loistehon säätö ja kompensointi. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2016-10-17.] Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/100091>

LIITE 1: DMS600NE OIKOSULKULASKENTALISTAUKSEN SARAKKEIDEN SELITYKSET

Sarake	Kuvaus
1	Rivinumero
2	Solmuvälin alkusolmun tunnus
3	Solmuvälin loppusolmun tunnus
4	Solmuvälin pituus (km)
5	Johdinlaji
6	Loppusolmun etäisyys syöttöpisteestä (km)
7	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin alkusolmussa laskettuna ilman vikaimpedanssia (kA)
8	Oikosulkukestoisuus pikalaukaisua käyttäen. Tämä tarkoittaa kolmivaiheisen oikosulkuvirran suhdetta laskettuun johtimen suurimpaan sallittuun oikosulkuvirtaan prosentteina ilmaistuna. Suhteellisuuden prosenttilukema lasketaan oikosulun ekvivalenttisen keston ja johtimen oikosulkukestoisuuden (1 s.) perusteella. Jos suhdeluvun prosenttiarvo on vähemmän kuin 100 %, johdin kestää oikosulun. Jos pikalaukaisu ei toimi, arvona näkyy kolme tähtimerkkiä (%/***)
9	Oikosulkukestoisuus aikalaukaisua käyttäen (lasketaan vastaavasti kuin kohdassa 8)
10	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta solmuvälin loppusolmussa laskettuna ilman vikaimpedanssia (kA)
11	Kaksivaiheisen oikosulkuvirran ja releasetuksen suhteellisarvo prosentteina. Jos suhdeluvun prosenttiarvo on korkeampi kuin 100 %, rele laukeaa. (%)
12	Tässä näkyy tähtimerkki (*), jos johdin ei ole oikosulkukestoinen ja/tai rele ei laukea vikavirrasta.
	Nollapistemaadoitettua verkkoa tarkasteltaessa tuloksissa on lisäksi seuraavat sarakkeet:
13	1-vaiheinen oikosulkuvirta (kA)
14	Yksivaiheisen oikosulkuvirran ja maasulkureleasetuksen suhteellisarvo prosentteina. Jos suhdeluvun prosenttiarvo on korkeampi kuin 100 %, rele laukeaa. (%)

(ABB 2009.)

LIITE 2: DMS600NE TEHONJAKOLASKENTALISTAUKSEN SARAKKEIDEN SELITYKSET

Sarake	Kuvaus
1	Rivinumero
2	Solmuvälin alkusolmun tunnus
3	Solmuvälin loppusolmun tunnus
4	Solmuvälin pituus (km)
5	Johdinlaji
6	Loppusolmun etäisyys syöttöpisteestä (km)
7	Solmuvälin suurin kuormitusvirta (A)
8	Suurimman kuormitusvirran ja virrankeston välinen suhde (%)
9	Solmuvälin enimmäisteho (MW)
10	Solmuvälin suurimmat tehohäviöt (kW/km)
11	Solmuvälin jännitteenalenema (%)
12	Solmuvälin loppusolmun kokonaisjännitteenalenema (%)
13	Solmuvälin jännitejäykkyys pätötehon suhteen (%/MW)
14	Jännite loppusolmussa (kV)
15	Muuntajan pätöteho (kW)
16	Muuntajan loisteho (kVar)

(ABB 2009.)