

# **Pienjännitepuolen mitoitusyökalu moottori-, valaistus- ja alakeskusläh- döille**

Valtteri Montonen

Opinnäytetyö

Marraskuu 2016

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Sähkövoimatekniikka

Tekijä(t) Montonen, Valtteri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 9.11.2016
	Sivumäärä 38	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Pienjännitepuolen mitoitus työkalu moottori-, valaistus- ja alakeskuslähdoille</b>		
Tutkinto-ohjelma Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Puttonen Pasi		
Toimeksiantaja(t) Rejlers Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli saada Rejlers Oy:lle hyvin yksinkertainen kaapelien ja johdonsuojien laskentatyökalu, jolla mahdollistetaan standardien mukainen mitoitus. Suunnittelija, joka ei välttämättä päivittäisessä työssään mitoita kaapeleita ja johdonsuojia projekteihin, voi tällä laskentatyökalulla tehdä sen helposti ja nopeasti. Laskentatyökalulta haluttiin myös selkeää raporttia, joka saadaan lasketuista tuloksista. Sen avulla voidaan mitoitus perustella asiakkaalle.</p> <p>Toteutustapana toimi Excel-taulukkolaskentaohjelmaan tehty yksinkertainen laskentatyökalu, jossa on alas vetolaatikoita ja soluja, joihin valitaan tai syötetään tarvittavat arvot. Toteutuksen pohjana ovat standardit ja valmistajien datalehdet, nämä on annettu työkaluun, joista laskentatyökalua hakee tiedon, ja näiden arvojen perusteella sähkötekniisiä kaavoja käyttäen työkalu mitoittaa kaapelin ja johdonsuojan sekä ilmoittaa tärkeimmät tiedot raporttipohjassa.</p> <p>Työkalu ottaa huomioon eri asennustavat ja niihin liittyvät eri korjauskertoimet, johdonsuojien vikasuojauksen sekä selektiivisyyden peräkkäisillä johdonsuojilla. Moottorikaapelin laskennassa on otettu huomioon tehoportaiden kasvu ja jännitteenalenemat käynnistyksessä sekä normaalitilanteessa.</p> <p>Laskentatyökalu vastaa hyvin Rejlers Oy:n asettamia vaatimuksia. Työn tuloksia hyödynnetään yrityksessä jatkossa. Laskentatyökalu on hyödyllinen päivittäisessä mitoituksessa, sillä se palvelee hyvin yrityksen sähkösuunnittelijoita projekteissa, joissa tarvitaan kaapelien tai johdonsuojien mitoitusta.</p>		
<p>Avainsanat (<a href="#">asiasanat</a>) Mitoitus, laskenta, selektiivisyys, jännitteenalenema, moottori, sähkösuunnittelu, oikosulkuvirta, ylikuormitus</p>		
Muut tiedot		

Author(s) Montonen Valtteri	Type of publication Bachelor's thesis	Date 9.11.2016 Language of publication: Finnish
	Number of pages 38	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Title</b> LV calculation tool for motor,- lightning- and subdistribution board outputs		
Degree programme Automation engineering		
Supervisor(s) Puttonen Pasi		
Assigned by Rejlers Oy		
Abstract  <p>The background of this thesis was to create for Rejlers Oy a very simple cable and circuit breaker calculation tool based on standards. The starting point were the designers who do not necessarily in their daily work calculate the cables and circuit breakers for the projects. Thus, the designers can easily and quickly calculate the cable (s) and circuit breaker(s) using this calculation tool. The purpose of the calculation tool was also to produce a clear report based on calculated results to provide arguments to a customer who needs to know where those specific cables and circuit breakers were obtained from.</p> <p>The method used in the implementation was an Excel spreadsheet program, a simple calculation tool with drop downs and cells, in which the values can be selected or fed . The basis of the implementation were the standards and manufacturers' data-sheets where the calculation tool searches for information, and on the basis of these values, the calculation tool uses electrical engineering formulas to calculate the cable and line protection and identifies the most important information in the report.</p> <p>As a result, a very simple calculation tool was created with very complex formulas and a condition "jungle". The tool notices the different installation methods and different load factors, short-circuit resistances management of shelters, as well as selective successive for the line protection. The calculation of the motor cable notices additional power increase and voltage drops in a start-up and in a normal situation.</p> <p>The calculation tool meets the requirements set by Rejlers Oy well. The results of work will be utilized by the company in the future. The calculation tool is very useful for daily electrical design, as it serves the electrical designers working in the company's projects, where cables or circuit breakers need to be defined.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) voltage-drop, motor, electricaldesign, short-circuit, selective, calculation		
Miscellaneous		

## Sisältö

1	Opinnäytetyön lähtökohdat .....	3
1.1	Rejlers Oy.....	3
2	Kehittämis aineisto ja käytetyt kehittämismenetelmät.....	4
3	Sähkösuunnittelu.....	4
3.1	Kaapelin mitoitus.....	5
3.1.1	Mitoituksen lähtökohdat .....	5
3.1.2	Kaapelin kuormitettavuus .....	6
3.1.3	Jännitteenalenema .....	9
3.2	Kaapelin suojaus.....	13
3.2.1	Ylikuormitusuojaus .....	13
3.2.2	Oikosulkusuojaus .....	18
3.2.3	Redusointi .....	20
3.2.4	Vikasuojaus ja selektiivisyys .....	21
4	Opinnäytetyön toteutus.....	25
4.1	Aineiston keruun toteutus .....	25
4.2	Kaavojen ja ehtojen toteutus Excelissä .....	27
5	Kaapelin laskentatyökalu versio 1.0.....	29
5.1	Moottorilähtö .....	30
5.2	Valaistus ja laitelähtö .....	31
5.3	Alakeskuslähtö.....	31
5.4	Raportti.....	31
6	Johtopäätökset ja pohdinta .....	32
	Lähteet.....	33
	Liitteet .....	35

## Kuviot

Kuvio 1. Minimi oikosulkuvirran komponentit.....	20
Kuvio 2. Poiskytkentäajat eri virtapiireillä.....	22
Kuvio 3. Selektiivisyyden tarkistaminen ominaiskäyristä .....	24
Kuvio 4. Sulakkeen valinta .....	28
Kuvio 5. Kaapelin poikkipinta-alan valinta .....	29
Kuvio 6. Oikosulun rajapituuden valinta .....	29

## Taulukot

Taulukko 1. Kaapelien kuormitettavuudet eri asennustavoilla (Sähköinfo Oy 2013.) ..	9
Taulukko 2. Jännitteenalenema (SFS- Käsikirja 600-1. 2012.) .....	10
Taulukko 3. Johdonsuojakatkaisijoiden ominaisarvoja (Sähköinfo Oy 2013.) .....	15
Taulukko 4. gG-sulakkeiden ominaisuuksia (Sähköinfo Oy 2013.).....	16
Taulukko 5. gG-sulakkeilla olevien johtojen pienimmät kuormitettavuudet (Sähköinfo Oy 2013.) .....	17
Taulukko 6. Johdonsuojakatkaisijoiden minini oikosulkuvirrat (Sähköinfo Oy 2013.)	22
Taulukko 7. gG-sulakkeiden minimi oikosulkuvirrat (Sähköinfo Oy 2013.) .....	23
Taulukko 8. SFS-EN 60269-1 I <sup>2</sup> t-ominaisuudet (SFS-EN 60269-1. 2008).....	25

# 1 Opinnäytetyön lähtökohdat

## 1.1 Rejlers Oy

Rejlers Oy on ruotsalainen perheyhtiö, joka on toiminut jo vuodesta 1942. Yritys tarjoaa laadukasta suunnittelu-, konsultointi- ja projektipalveluita Pohjoismaissa. Yrityksen suurimmat asiakasryhmät ovat teollisuus, rakentaminen, energia ja infra. Yrityksellä on yli 80 toimipaikkaa Pohjoismaissa, jossa toimii noin 2100 työntekijää. Suomessa henkilöstöä on noin 500, 18 eri toimipaikassa.

Rejlers Oy:n toiminta Suomessa alkoi vuonna 1980 Mikkelissä, joka on edelleen Suomen päätoimipiste. Yrityksen tavoitteena on työllistää vuoteen 2020 mennessä 3030 työntekijää. Suomen tavoitteena on työllistää 700 työntekijää. (Rejlers Oy. n.d.) Opinnäytetyön-suorituspaikkana toimi Jyväskylän toimipiste, jossa toiminta painottuu sähkö-, automaatio- ja instrumenttiosaamiseen. Henkilöstöä Jyväskylän toimipisteessä on yhteensä 62. (Organisaatio n.d.)

Rejlers Oy:llä oli tarve saada yksinkertainen laskentatyökalu, jolla voidaan mitoittaa erilaisten pienjännitelähtöjen kaapelit, johdonsuojakatkaisijat tai sulakkeet. Työn tarkoituksena oli selventää laskentaa niin, että kaikki suunnittelijat voivat laskea kaapeleiden rajapituudet ja johdonsuojakatkaisijoiden tai sulakkeiden nimellisvirrat niin, että otetaan samalla huomioon oikosulkusuojaus, vikasuojaus, selektiivisyys sekä jännitteenalenema. Laskentatyökalun tavoitteena oli, että sillä pystytään laskemaan muutamia eri lähtötyyppejä eri lähtötietojen avulla ja se auttaa laskennassa henkilöitä, joille laskeminen ei ole tavallista rutiinityötä.

Opinnäytetyön apuna on käytetty yrityksellä jo olemassa olleita Excel-taulukkopohjia, joista on aikaisemmin tarkastettu laskelmia. Laskentaa varten löytyy vastaavia kaupallisia ohjelmia eri valmistajilta, mutta tässä opinnäytetyössä tarkoituksena on yksinkertaisesti mitoittaa kaapeli, johdonsuojakatkaisija tai sulake muutaman lähtötiedon avulla. Työhön kuului Excel-pohjien muuttaminen ja kokoaminen yhdeksi toimivaksi laskentatyökaluksi, josta saadaan raportti ulos.

Laskentatyökalun osatarkoituksena on kertoa raportin avulla yrityksen asiakkaille mistä laskentatulokset on saatu ja minkä perusteella tulokset on laskettu. Opinnäytetyön laskentatyökalu on osa suurempaa kokonaisuutta. Laskentatyökalulla on mahdollista tehdä laskelmia kaikissa eri toiminta-ympäristöissä, kuitenkin pääasiallisesti työkalua tullaan käyttämään teollisuuden kaapeleiden ja sulakkeiden mitoituksessa.

## **2 Kehittämisaineisto ja käytetyt kehittämismenetelmät**

Opinnäytetyössäni käytettiin kvalitatiivista tutkimusmenetelmää. Työssä haettiin laadullista tutkimusotetta. Työssäni käytetyt materiaalit standardit SFS-600-1 ja SFS-EN 60269-1 ovat laadullisia ja luotettavia, kaikki työssäni olevat tiedot pohjautuvat suoraan näihin standardeihin. Tähän menetelmään päädyttiin siitä syystä, että opinnäytetyössä on myös käytetty suoraan valmistajalta saatuja tietoja heidän laitteistaan sekä standardeistaan. Excel-taulukot, joita käytettiin työssä ovat tarkastettu standardien pohjalta, että niissä olevat taulukot ovat paikkansa pitäviä.

Aineistona käytettiin yrityksen hallussa olevia standardeja liittyen aiheeseen sekä ABB:n moottorinmitoitus-ohjelmaa MotSize, josta kyselin tarkempia tietoja ABB:n moottoreiden ja generaattoreiden tuotepäälliköltä, Jarno Kinnuselta. Opinnäytetyön aikana keskustelin myös Rejlersin henkilökunnan kanssa siitä, mitä seikkoja mitoituksessa kannattaisi ottaa huomioon, jotta työkalu saataisiin toimivaksi.

## **3 Sähkösuunnittelu**

Sähkösuunnittelu on hyvin laaja alue, jossa on monta eri osa-aluetta. Keskeisimpiä niistä ovat kaapelin mitoitus ja suojausten suunnittelu. Tässä luvussa käsitellään vain työni kannalta tärkeimpiä osa-alueita sähkösuunnittelussa, kuten pienjänniteverkon kaapelin ja sen suojausten mitoitusta.

### 3.1 Kaapelin mitoitus

#### 3.1.1 Mitoituksen lähtökohdat

Kaapelin mitoituksessa on tärkeää ottaa huomioon seuraavat asiat: kuormitusvirta, vikasuojaus, jännitteenalenema ja sen pysyminen sallituissa rajoissa, verkon mahdollinen laajentuminen, kaapelin terminen ja dynaaminen oikosulkukestoisuus, mekaaninen ja kemiallinen kestävyys sekä taloudellisuus. Kaapelin valinnassa on erittäin tärkeää, että kaikki sen tekniset minimivaatimukset täyttyvät. Kaapelia valittaessa on otettava huomioon, että poikkipinta on varastotyypiksi vakioitua kokoa. Tällä on etuna lyhyet toimitusajat ja varastointikulut. (Sähköinfo Oy. 2013; ST-30. 2014.)

Kaapelin poikkipinta määräytyy alustavasti kuormitusvirran mukaan, jonka laskeminen kuuluu perusmitoitukseen. Kuormitusvirta lasketaan kuorman näennäistehosta, 3-vaiheinen kuormitusvirta kaavalla 1, ja 1-vaiheinen kuormitusvirta kaavalla 2.

$$I_B = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (1)$$

$$I_B = \frac{S}{U_V} \quad (2)$$

missä

$I_B$  = Kuormitusvirta

$S$  = Näennäisteho

$U$  = pääjännite

$U_V$  = vaihejännite

Kaapelin johdinmateriaalina toimivat pääasiallisesti kupari (Cu) sekä alumiini (Al), kaapelin vaipan materiaalina ovat muovi ja kumi, jotka voidaan eritellä PVC, PE ja PEX- materiaaleihin. PVC on materiaalina notkeaa ja sillä on hyvä pakkasenkesto. PE on jäykkää, mutta sillä on suuri eristysresistanssi. PEX-eristeisellä kaapelilla on korkeampi lämmönkesto kuormitettavuuden kannalta kuin PVC:llä. Kaapelin mitoitukseen



otetaan huomioon aina pahin mahdollinen reitti, jota pitkin kaapeli mahdollisesti kulkee. Näin saadaan oikeat korjauskertoimet mitoitusta varten. (Sähköinfo Oy. 2013.; ST-30. 2014.)

Esimerkiksi kaapelin poikkipinta määritetään seuraavasti:

- a) Lasketaan kuormitusvirta tai valitaan sulakkeen nimellisvirta, joka on yhtä suuri tai suurempi kuin kuormitusvirta.
- b) Valitaan taulukon viisi (5), sivulla 17, toisesta sarakkeesta sulaketta vastaava kuormitusvirta, jonka kaapelin on minimissään kestettävä.
- c) Määritetään asennusolosuhteet ja niiden perusteella saadut korjauskertoimet. Kaapelille vaadittu kuormitettavuus saadaan laskettua jakamalla sulaketta vastaava kuormitusvirta korjauskertoimilla.
- d) Etsitään taulukosta yksi (1), sivulla 9, poikkipinta-ala, jonka kuormitettavuus on yhtä suuri, tai suurempi kuin edellisessä kohdassa laskettu vaadittu kuormitettavuus. (Sähköinfo Oy. 2013)

Esimerkiksi sulakkeen koko kaapelille määritetään seuraavasti

- a) Määritetään asennusolosuhteet ja niiden perusteella korjauskertoimet
- b) Etsitään taulukosta yksi (1), sivulla 9 johdon poikkipinta-alaa vastaava kuormitettavuus ja kerrotaan se asennustavasta johtuvilla korjauskertoimilla.
- c) Etsitään taulukosta viisi (5), sivulla 17, toisesta sarakkeesta edellisessä kohdassa laskettua virtaa lähimpänä oleva pienempi arvo.
- d) Kaapelin saa suojata taulukon viisi (5), sivulla 17, ensimmäisessä sarakkeesta saatavalla edellisessä kohdassa laskettua virtaa vastaavalla sulakkeella.
- e) Sulakkeen nimellisvirta on samalla suurin sallittu kuormitusvirta. (Sähköinfo Oy. 2013)

### 3.1.2 Kaapelin kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat ympäristön lämpötila, johdinmateriaali, eristemateriaali, muiden kaapeleiden ja virtapiirien läheisyys sekä asennustapa. Kaapelissa kulkeva virta aiheuttaa siinä tehohäviöitä, jotka muuttuvat lämmöksi ja haih-

tuvat kaapelin vaipan kautta ympäristöön. Johtimen suurinta sallittua lämpötilaa jatkuvassa käytössä ei saa ylittää, sillä se synnyttää tulipalon vaaran ja samalla ylittyvä lämpötila lyhentää kaapelin elinikää. Jatkuvassa käytössä PVC-eristeisellä kaapelilla suurin sallittu lämpötila on +70° C ja PEX-eristeisellä +90 ° C.

Kaapelille on annettu myös korjauskertoimet, jotka löytyvät standardista SFS-6000. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat laajalti eri asennustavat, jotka määrittävät tarvittavat korjauskertoimet kaapelille:

- asennustapa A, eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli lämpöeristetyssä putkessa seinän sisällä
- asennustapa B, eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli putkessa seinän pinnalla
- asennustapa C, yksi tai monijohdinkaapeli seinän(puu/kivi) pinnalla
- asennustapa D, monijohdinkaapeli maassa, asennettuna suoraan maahan tai putkeen (muovi, keraaminen tai metallinen)
- asennustapa E, yksi tai monijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, rei'itetty kaapelihylly, tikashylly tai pienat ja ripustimet (SFS-Käsikirja 600-1- 2012.)

Liitteessä yksi (1) ja liitteessä kaksi (2) on kerrottu selkeästi, miten eri korjauskertoimet tulevat mukaan eri asennustavoissa. Kaavoissa kolme (3) ja neljä (4) on käytetty vain paria peruskerrointa, jotka tulevat laskentaan mukaan. Kun tiedetään kaapelin poikkipinta-ala ja sitä vastaava peruskuormitettavuus, voidaan laskea kyseisen kaapelin todellinen kuormitettavuus kaavalla

$$I_Z = I_{ZP} * k_1 * k_2 * (k_3) \quad (3)$$

missä

$I_Z$  = kaapelin todellinen kuormitettavuus

$I_{ZP}$  = kaapelin peruskuormitettavuus (saadaan taulukosta 1.)

$k_1$  = korjauskerroin ympäristön lämpötila

$k_2$  = korjauskerroin vierekkäiset kaapelit

$k_3$  = korjauskerroin maanlämpöresistiivisyys

Kun asennustapana on D, eli kaapelin asennustapa on maahan, on silloin ympäristön lämpötilana maan lämpötila ja kolmantena kuormituskertoimena on otettava huomioon maan lämpöresistiivisyys. Kun tiedetään kaapelin kuormitusvirta, voidaan laskea kaapelin tarvittava peruskuormitettavuus kaavalla neljä (4). (SFS-Käsikirja 600-1-2012.)

$$I_{ZP} \geq \frac{I_B}{k_1 * k_2 * (k_3)} \quad (4)$$

missä

$I_B$  = näennäistehosta laskettu kuorman virta

$I_{ZP}$  = kaapelin peruskuormitettavuus

$k_1$  = korjauskerroin ympäristön lämpötila

$k_2$  = korjauskerroin vierekkäiset kaapelit

$k_3$  = korjauskerroin maanlämpöresistiivisyys

Laskentatyökalussa on otettu myös huomioon korjauskertoimet, jotka ottavat huomioon kaapelin sijainnin. Eli sen esimerkiksi: onko kaapeli hyllyllä, kuinka monta hyllyä on päällekkäin ja koskettavatko kaapelit toisiaan asennuksessa.

Suomessa on annettu kaapeleiden eri asennustavoille kuormitettavuus-arvot (A), kun ilman lämpötilana on +25 °C, maan lämpötilana +15 °C ja maan lämpöresistiivisyytenä 1,0 km/W. Lämpöresistiivisyydellä tarkoitetaan maaperän laatua eli sitä, millaista materiaalia maaperä on, tai kuinka kostea se on. Maaperä voi olla esimerkiksi savea, hiekkaa tai soraa. Taulukosta yksi (1) voi suoraan katsoa, paljonko kaapelin peruskuormitettavuus on missäkin eri asennustavassa. (SFS-Käsikirja 600-1-2012 ; Sähköinfo Oy 2013.)

Taulukko 1. Kaapelien peruskuormitettavuudet eri asennustavoilla (Sähköinfo Oy 2013.)

Johtimen nimellispoikki- pinta (mm <sup>2</sup> )	SFS 6000:n mukaiset asennustavat			
	A	C	D	E
<b>Kupari</b>				
1,5	14	18,5	26	19
2,5	19	25	35	26
4	24	34	46	36
6	31	43	57	45
10	41	60	77	63
16	55	80	100	85
25	72	102	130	107
35	88	126	160	134
50	105	153	190	162
70	133	195	240	208
95	159	236	285	252
120	182	274	325	292
150	208	317	370	338
185	236	361	420	386
240	278	427	480	456
300	316	492	550	527
<b>Alumiini</b>				
16	43	62	78	65
25	56	77	100	83
35	69	95	125	102
50	83	117	150	124
70	104	148	185	159
95	125	180	220	194
120	143	209	255	225
150	164	240	280	260
185	187	274	330	297
240	219	323	375	350
300	257	372	430	404

### 3.1.3 Jännitteenalenema

Kun kuormitusvirta I kulkee johtimessa, syntyy johtimen impedanssissa jännitteenalenema. Tämä on käytännössä sitä, että kaapelin loppupäässä on pienempi jännite kuin kaapelin alkupäässä. Jännitteenalenema on kaapelin alkupään ja loppupään jännitteiden itseisarvojen erotus. Jännitteenalenemalla on suuri vaikutus kaapeleiden mitoitukseen: se määrittää kaapelin koon kasvun varsinkin, jos jännitteenalenema ei ole sallituissa rajoissa. Standardin SFS-6000 mukaan kuormituspisteen ja minkään liittymäpisteen välillä ei pitäisi olla suurempi arvo, kuin taulukon kaksi (2) arvot verrattuna asennuksen nimellisjännitteeseen. (SFS- Käsikirja 600-1. 2012.)

Taulukko 2. Jännitteenalenema (SFS- Käsikirja 600-1. 2012.)

Asennuksen tyyppi	Valaistus %	Muu käyttö %
A-Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B- Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä teholähteestä	6	8

Siirtötäisyyden ollessa pienjänniteverkossa muutamia satoja metrejä, saadaan likiarvoinen jännitteenalenema riittävällä tarkkuudella yhtälöistä 5, 6 ja 7

3-vaiheinen vaihtojännite

$$U_h'(V) = I * (R_j * \cos\varphi + X_j * \sin\varphi) \quad (5)$$

1-vaiheinen vaihtojännite

$$U_h'(V) = 2 * I * (R_j * \cos\varphi + X_j * \sin\varphi) \quad (6)$$

ja suhteellinen jännitteenalenema yhtälöstä 9

$$U_h'(\%) = \frac{U_h'(V)}{U_v(V)} * 100\% \quad (7)$$

missä

$U_h'$  = vaihejännitteen alenema

$I$  = johtimen virta (A)

$\varphi$  = vaihejännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma

$R_j$  = johtimen resistanssi ( $\Omega$ ) =  $r_j * s$

$X_j$  = johtimen reaktanssi ( $\Omega$ ) =  $x_j * s$

$r_j$  = johtimen ominaisresistanssi

$x_j$  = johtimen ominaisreaktanssi

$U_v$  = vaihejännite (V)

(Sähköjohtojen mitoittaminen. 2000. ; Puttonen. P. 2014.)

Kaapelilehdissä vaihe-, nolla- ja PE-suojajohtimen resistanssi on ilmoitettu +20 °C lämpötilassa, joten kaapelin maksilämpötilan mukaiset resistanssit saadaan kaavasta kahdeksan (8). (Sähköinfo Oy. 2013. ; D1-2012. 2013.)

$$R_j = R_{T20}(1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})) \quad (8)$$

missä

$R_j$  = resistanssi lämpötilassa  $T$

$R_{T20}$  = resistanssi lämpötilassa 20 °C

$\alpha$  = ominaisvastuksen lämpötilakerroin

$T$  = lämpötila (°C)

Alumiinin ominaisvastuksen lämpötilakerroin on 0,00403 °C ja kuparilla 0,00393 °C.

Kaapelilehdissä on myös ilmoitettu kaapelin johtimen induktanssi, joka pitää muuttaa reaktanssiksi mitoitus varten. Kaapelin johtimen reaktanssilla alkaa olla suurempi merkitys, kun mennään kaapelin poikkipinta-alassa yli 70 mm<sup>2</sup>:n kaavassa 9 on selvennetty, kuinka kaapelin johtimen reaktanssi lasketaan. (Sähköinfo Oy 2013.)

$$x_j = 2 * \pi * f * L \quad (9)$$

missä

$x_j$  = johtimen reaktanssi

$\pi$  = 3,14....

$f$  = taajuus

$L$  = johtimen induktanssi

Seuraavissa esimerkkilaskuissa on käytetty ABB:n 3 kW, 3000 rpm prosessimoottorin tietoja. Moottorin käyntitilan jännitteenaleneman raja-arvona käytetään 3 %: a.

Esimerkkilasku 1. Moottorin jännitteenalenema käyntitilanteessa: Moottorin päätöteho  $P = 3,0 \text{ kW}$ ,  $\cos\varphi = 0,87$ , virta  $I_n = 5,8 \text{ A}$  pääjännite  $U = 0,4 \text{ kV}$ . Kaapelina on MCMK 3x2.5+2.5, jonka ominaisresistanssi  $r_j$  on  $70^\circ \text{ C}$  lämpötilassa  $8.87 \text{ } \Omega/\text{km}$  ja ominaisreaktanssi  $x_j$   $0.101 \text{ } \Omega/\text{km}$ , sekä kaapelin pituus  $s = 100 \text{ m}$ .

Valmistaja ilmoittaa moottorin virran moottorien arvotaulukoissa.

$$I = I_n = 5,8 \text{ A}$$

Muutoin jos valmistaja ei anna virta-arvoa tai kyseessä on muu kuorma, voi virran laskea kaavasta 10.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi} \quad (10)$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos\varphi^2} = \sqrt{1 - 0.87^2} = 0.49$$

Johtimen resistanssi

$$R_j = r_j * s = \frac{8.87 \Omega}{\text{km}} * 0.1 \text{ km} = 0.887 \Omega$$

Johtimen reaktanssi

$$X_j = x_j * s = \frac{0.101 \Omega}{\text{km}} * 0.1 \text{ km} = 0.0101 \Omega$$

Likiarvollinen jännitteen alenema

$$U'_h(\text{V}) = I * (R_j * \cos\varphi + X_j * \sin\varphi) =$$

$$5.8 \text{ A} * (0.887 \Omega * 0.87 + 0.0101 \Omega * 0.49) = 4.5 \text{ V}$$

Suhteellinen jännitteenalenema

$$U'_h(\%) = \frac{U'_h(\text{V})}{U_V(\text{V})} * 100\% = \frac{4.5 \text{ V}}{\frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3}}} * 100\% = 0.65\%$$

Vastaukseksi saatiin 100 metrin matkalle 0,65 %:n suhteellinen jännitteenalenema.

Suurempi jännitteenalenema on hyväksyttävää joissain tilanteissa, kuten moottorin käynnistyksen yhteydessä, tai muilla laitteilla, joilla on suuri käynnistysvirta. Tämä kuitenkin edellyttää, että jännitteen vaihtelut pysyvät arvoissa, jotka on määritelty asianomaisissa laitestandardeissa. Moottorin käynnistystilanteessa moottorin liittimiin vaikuttavan jännitteenaleneman on hyvä olla enintään 10 %. ABB:n moottorien liitinjännitteen alenema saa olla normaalitilanteessa enintään 5 % ja käynnistyksessä enintään 15 %. Tähän on laskettu muuntajan jännitteenalenema sekä kaapeleiden jännitteenalenema. Kaapeleita mitoitettaessa moottoreille on otettava huomioon

moottorin käynnistystilanteessa moottorin käynnistysvirta  $I_{start}$  sekä käynnistyksen tehokerroin  $\cos\varphi_{start}$ . Nämä arvot saadaan suoraan moottorivalmistajan taulukoista. (Puttonen P. 2014.)

Esimerkkilasku 2. Jännitteenalenemasta käynnistystilanteessa: Moottorin pätöteho = 3,0kW,  $\cos\varphi_{star} = 0,61$ , virta  $I_n = 5.8A$ ,  $I_s/I_n = 9.1$ ,  $U = 0.4kV$  kaapeli pysyy samana kuin esimerkkilaskussa 1.

Valmistaja ilmoittaa moottorin käynnistysvirtasuhteen taulukoissaan

$$I_{start} = I_n * \frac{I_s}{I_n} = 5.8A * 9.1 = 52.8A$$

$$\sin\varphi_{start} = \sqrt{1 - \cos\varphi_{start}^2} = \sqrt{1 - 0.61^2} = 0.79$$

Johtimen resistanssi

$$R_j = r_j * s = \frac{8.87\Omega}{km} * 0.1km = 0.887\Omega$$

Johtimen reaktanssi

$$X_j = x_j * s = \frac{0.101\Omega}{km} * 0.1km = 0.0101\Omega$$

Likiarvollinen jännitteen alenema

$$U'_h(V) = I * (R_j * \cos\varphi + X_j * \sin\varphi) = 52.8A * (0.887\Omega * 0.61 + 0.0101\Omega * 0.79) = 28.9V$$

Suhteellinen jännitteenalenema

$$U'_h(\%) = \frac{U'_h(V)}{U_V(V)} * 100\% = \frac{28.9V}{\frac{400V}{\sqrt{3}}} * 100\% = 12.5\%$$

Vastaukseksi saatiin 100 metrin matkalle 12.5 %:n suhteellinen jännitteenalenema.

Tämä ei enää ole sallituissa rajoissa, joten kaapelin poikkipintaa on suurennettava tai mahdollisesti sen rinnalle on lisättävä toinen kaapeli. Näin saadaan resistanssia ja reaktanssia pienemmäksi. (Puttonen. P. 2014. ; Sähköjohtojen mitoittaminen 2000.)

## 3.2 Kaapelin suojaus

### 3.2.1 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitusvirralla tarkoitetaan virtaa, joka ei johdu vian aiheuttamasta, vaan virtaa joka on mitoitusvirtaa suurempaa. Mitoitusvirralla tarkoitetaan kaapelin kuormitettavuutta. Tämä on esitetty luvussa 3.1.2. Jokainen virtapiiri täytyy varustaa ylikuormi-



tussuojalla. Tällöin katkaistaan ylikuormituksesta johtuva virran kasvu ja estetään ylivirran aiheuttamat vahingot. Kasvaessaan ylikuormitusvirta nostaa komponenttien lämpötilaa, mikä vahingoittaa eristystä, liitoksia, jatkoksia tai mahdollisesti johtimen ympäristöä. Yleisimpiä ylikuormitussuojia ovat sulake, johdonsuojakatkaisija tai katkaisija, joilla on kyky katkaista ylikuormitettu kaapeli johtolähdöstä. Standardin SFS-6000 mukaan kaapelia suojaavan ylikuormituslaitteen on täytettävä alla olevat kaksi ehtoa kaavoista 11 ja 12. (Sähköinfo Oy 2013.)

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (11)$$

$$I_2 \leq 1,45 * I_Z \quad (12)$$

missä

$I_B$  = virtapiirin mitoitusvirta (kuormitusvirta)

$I_Z$  = johtimen jatkuva kuormitettavuus

$I_n$  = suojalaitteen nimellisvirta

$I_2$  = virta, joka varmistaa suojalaitteen toiminnan suojalaitteelle määritellyssä toiminta-ajassa.

Johdonsuojakatkaisija ylikuormitussuojana on määritelty standardissa SFS-EN 60898. Standardissa on kolme eri suojalaitetyyppiä: B-, C- ja D-tyyppin johdonsuojakatkaisijat. Ylikuormitusasetukset näissä kaikissa ovat samat, mutta oikosulkuominaisuudet ovat jokaisessa johdonsuojakatkaisijassa erilaiset. Terminen toimintarajavirta johdonsuojakatkaisijoissa on 1,45-kertainen verrattuna suojalaitteen nimellisvirtaan. Tämä arvo kertoo sen, että suojalaite toimii 1,45-kertaisen nimellisvirralla tunnin ajan. Johdonsuojakatkaisijan oikosulkukatkaisukyky on 6 kA. Tämä kertoo vain sen, kuinka suuren virran suoja voi katkaista, jolloin se toimii myös samalla oikosulkusuojana. Johdonsuojakatkaisijan toiminta oikosulkusuojana perustuu magneettiseen laukaisuun. Tämä kertoo, kuinka suuren virran johdonsuojakatkaisija kestää alle 0,1 sekunnin aikana. B-tyyppin johdonsuojakatkaisijan magneettinen laukaisu on viisi (5) kertaa nimellisvirta ja C-tyyppin johdonsuojakatkaisijalla se on kymmenen (10) kertaa nimellisvirta. Nämä arvot on kerrottu taulukossa kolme (3). (Sähköinfo Oy 2013.)

Taulukko 3. Johdonsuojakatkaisijoiden ominaisarvoja (Sähköinfo Oy 2013.)

Laukaisukäyrä ja nimellisvirrat		Terminen laukaisu		Laukaisu-aika	Magneettilaukaisu	Laukaisu-aika
B	≤ 63 A	1,13 I <sub>n</sub>		> I <sub>h</sub>	3 I <sub>n</sub>	≥ 0,1 s
			1,45 I <sub>n</sub>	< I <sub>h</sub>	5 I <sub>n</sub>	< 0,1 s
C	≤ 63 A	1,13 I <sub>n</sub>		> I <sub>h</sub>	5 I <sub>n</sub>	≥ 0,1 s
			1,45 I <sub>n</sub>	< I <sub>h</sub>	10 I <sub>n</sub>	< 0,1 s
D	≤ 63 A	1,13 I <sub>n</sub>		> I <sub>h</sub>	10 I <sub>n</sub>	≥ 0,1 s
			1,45 I <sub>n</sub>	< I <sub>h</sub>	20 I <sub>n</sub>	< 0,1 s

Sulakkeet ovat perinteisiä ylikuormitussuojia, niitä on käytetty ennen johdonsuojakatkaisijoiden ilmestymistä markkinoille. Sulake toimii myös samalla oikosulkusuojana. Sulakkeen rakenteena toimii kahva- tai tulppasulake. Tässä opinnäytetyön laskentatyökalussa on käytetty ainoastaan gG ja aM-tyyppin kahvasulakkeita. gG-tyyppin sulake on yhdistetty ylikuormitus- ja oikosulkusuoja, aM-sulake on ainoastaan oikosulkusuoja ja aM-sulakkeita käytetään pääsääntöisesti moottorilähdöissä. Sulakkeilla on ylempi sulamisrajavirta, eli virta, jonka sulake kestää laukeamatta tunnin ajan. (Sähköinfo Oy. 2013)

Sulamisrajavirta johdetaan kaavoista 13 ja 14

$$I_2 \leq 1.45 * I_Z \quad (13)$$

$$I_2 = K * I_n \quad (14)$$

missä

K = sulakkeen nimellisvirran ja ylemmän sulamisrajavirran suhde

I<sub>Z</sub> = johtimen jatkuva kuormitettavuus

I<sub>n</sub> = suojalaitteen nimellisvirta

I<sub>2</sub> = virta, joka varmistaa suojalaitteen toiminnan suojalaitteelle määritellyssä toiminta-ajassa.

Esimerkkilasku 3. Johdon kuormitettavuus I<sub>Z</sub> = 38 A, lasketaan kuinka suuri gG-sulake saa olla kaapelin suojana. Valitaan taulukosta neljä (4) nimellisvirta sarakkeesta rivi,

johon 38A virta osuu väliin ja sen jälkeen valitaan ylemmän toimintarajavirran sarakeesta samalta riviltä oikea k-kerroin.

$$I_n \leq \frac{1.45}{K} * I_z = \frac{1.45}{1.6} * 38A = 34A$$

Arvoksi saatiin 34A, joten sulakkeeksi valitaan seuraavaksi pienempi arvo 32A, joka löytyy taulukosta viisi (5). Taulukossa viisi (5) on esitetty johdon sallittu kuormitus vähintään, kun käytetään gG- sulaketta ylikuormitussuojana.

Taulukko 4. gG-sulakkeiden ominaisuuksia (Sähköinfo Oy 2013.)

Nimellisvirta	Alempi toimintarajavirta	Ylempi toimintarajavirta	Aika
$I_n \leq 4 \text{ A}$	$1,5 I_n$	$2,1 I_n$	1 h
$4 \text{ A} < I_n < 16 \text{ A}$	$1,5 I_n$	$1,9 I_n$	1 h
$16 \text{ A} \leq I_n \leq 63 \text{ A}$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	1 h
$63 \text{ A} < I_n \leq 160 \text{ A}$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	2 h
$160 \text{ A} < I_n \leq 400 \text{ A}$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	3 h
$400 < I_n$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	4 h

Taulukko 5. gG-sulakkeilla olevien johtojen pienimmät kuormitettavuudet (Sähköinfo Oy 2013.)

gG-tyyppisen sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta A	Johdon sallittu kuormitus vähintään A
6	8
10	13,5
16	18
20	22
25	28
32	35
35	39
40	44
50	55
63	70
80	88
100	110
125	138
160	177
200	221
250	276
315	348
400	441
500	552
630	695
800	883
1000	1103
1250	1379

Ylikuormitussuojan pois jättäminen on myös mahdollista tapauksissa, missä kaapeli ei pääse ylikuormittumaan, kaapelia ei ole haaroitettu tai sen perässä ei ole pistorasioita. Ylikuormitussuojat suositellaan jätettäväksi pois virtapiireistä, joissa se voi aiheuttaa vaarantilanteen, esimerkiksi tapauksissa joissa virtapiiri pääsee ylikuormituksen ansiosta avautumaan. Tällaisia ovat esimerkiksi: Pyörivien koneiden magneetti-  
piirit, nostomagneettien syöttöpiirit, virtamuuntajien toisiopiirit ja palosammutuslaitteistoja syöttävät virtapiirit. Kuitenkaan oikosulkusuoja ei voi jättää pois tällaisista kyseisistä tapauksista. (Sähköinfo Oy. 2013)

### 3.2.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulku on hyvin pieni impedanssinen vika eri potentiaalissa olevien jännitteisten osien välillä, oikosulkuvirta on paljon suurempi kuin ylikuormitusvirta ja ylikuormitustilaan verrattaessa oikosulun sattuessa suojalaitteiden on toimittava huomattavasti nopeammin. Oikosulkusuojalaite sijoitetaan aina kaapelin alkupäähän, jokainen virtapiiri pitää varustaa oikosulkusuojalla ja suojauksen toimivuus on hyvä tarkastaa jo suunnitteluvaiheessa. Oikosulkusuojalaitteella on oltava kyky katkaista oikosulkuvirta, joka syntyy vikatilanteessa ennen kuin se ehtii aiheuttamaan johtimissa ja liitoksissa lämpö- ja mekaanisista vaikutuksista johtuvaa vaaraa. Kaapelivalmistajat ilmoittavat kaapeilleen oikosulkukestoisuuden yhden sekunnin ajalle. Kaapelin oikosulkukestoisuus riippuu sallitusta lämpötilasta ja käytettävästä johdineristeestä. (Sähköinfo Oy. 2013; Sähköjohtojen mitoittaminen. 2000.)

Oikosulkusuojan on täytettävä seuraavat vaatimukset:

- Suojalaitteella ei saa olla pienempi oikosulun katkaisukyky kuin, mikä on oikosulkuvirta, joka on suojalaitteen asennuspaikalla, paitsi jos suojalaitteen syötävällä puolella on jo suojalaite, jonka katkaisukyky riittää. Tällaisessa tilanteessa molemmat suojalaitteet on sovitettava niin, että läpi kulkeva energia I<sub>2t</sub> ei pääse ylittämään kuormituspuolen suojalaitteen ja suojattavien johtimien vahingoittumatta kestäväää arvoa.
- Kaikki oikosulkuvirratt on katkaistava viimeistään silloin, kun johtimet saavuttavat suurimman sallitun lämpötilan jokaisessa virtapiirin kohdassa.

(Sähköinfo Oy. 2013)

Minimi oikosulkuvirran laskua käytetään sähköverkon suojausten asetteluun ja henkilösuojausten toiminnan tarkistukseen, minimi oikosulkuvirta muodostuu 1-vaiheisessa oikosulussa. Minimi oikosulkuvirran laskentaan on yksinkertainen kaava, jossa virhe on kymmenen prosenttia 10%, kun lasketaan suoraan verkon komponenttien impedansseilla. Kaavaa voidaan kuitenkin käyttää, koska se laskee aina turvallisempaan suuntaan. Osaimpedanssit lasketaan tässä tapauksessa aritmeettisesti yhteen,

joten tässä tapauksessa todellinen impedanssi on laskettua pienempi ja vikavirta suurempi. Johtimien reaktanssit voidaan jättää huomioimatta, jos johtimen poikkipinta-ala on alle 70mm<sup>2</sup>. Likimääräistä laskentaa voi käyttää poikkeustapauksissa, mutta laskenta tehdään muuten tarkoilla komponenteilla. Alla olevassa kaavassa 15 on yksinkertainen tapa laskea verkon minimi-oikosulkuvirta (D1-2012. 2013)

$$I_{K1MIN} = \frac{c*U}{\sqrt{3}*Z} \quad (15)$$

missä

$I_{K1MIN}$  = minimi oikosulkuvirta (A)

$c_{min}$  = kerroin 0.95, joka ottaa huomioon jännitteenaleneman sulakkeissa, johdoissa, liittimissä, kytkimissä, jne...

U = pääjännite (V)

Z = virtapiirin kokonaisimpedanssi, joka muodostuu edeltävän verkon komponenteista ( $\Omega$ )

Tarkassa minimi oikosulkuvirran laskentakaavassa on otettava huomioon kaapelin vaihejohtimen sekä suojajohtimen resistanssi, että reaktanssi komponentit. Nämä on esitetty kaavoissa 16, 17 ja 18.

$$I_{K1MIN} = \frac{c_{min}*U}{\sqrt{3}*\sqrt{R_T^2+X_T^2}} \quad (16)$$

$$R_T = R'_Q + R_K + R_{jL} + R_{jPE} \quad (17)$$

$$X_T = X'_Q + X_K + X_{jL} + X_{jPE} \quad (18)$$

missä

$I_{K1MIN}$  = minimi oikosulkuvirta (A)

$c_{min}$  = kerroin 0.95, joka ottaa huomioon jännitteenaleneman sulakkeissa, johdoissa, liittimissä, kytkimissä, jne.

U = pääjännite (V)

$R_T$  = kokonaisresistanssi ( $\Omega$ )

$X_T$  = kokonaisreaktanssi ( $\Omega$ )

$R'_Q$  = verkon resistanssi redusoituna ( $\Omega$ )

$R_K$  = syöttävän muuntajan resistanssi ( $\Omega$ )

$R_{jL}$  = kaapelin vaihejohtimen resistanssi ( $\Omega$ )

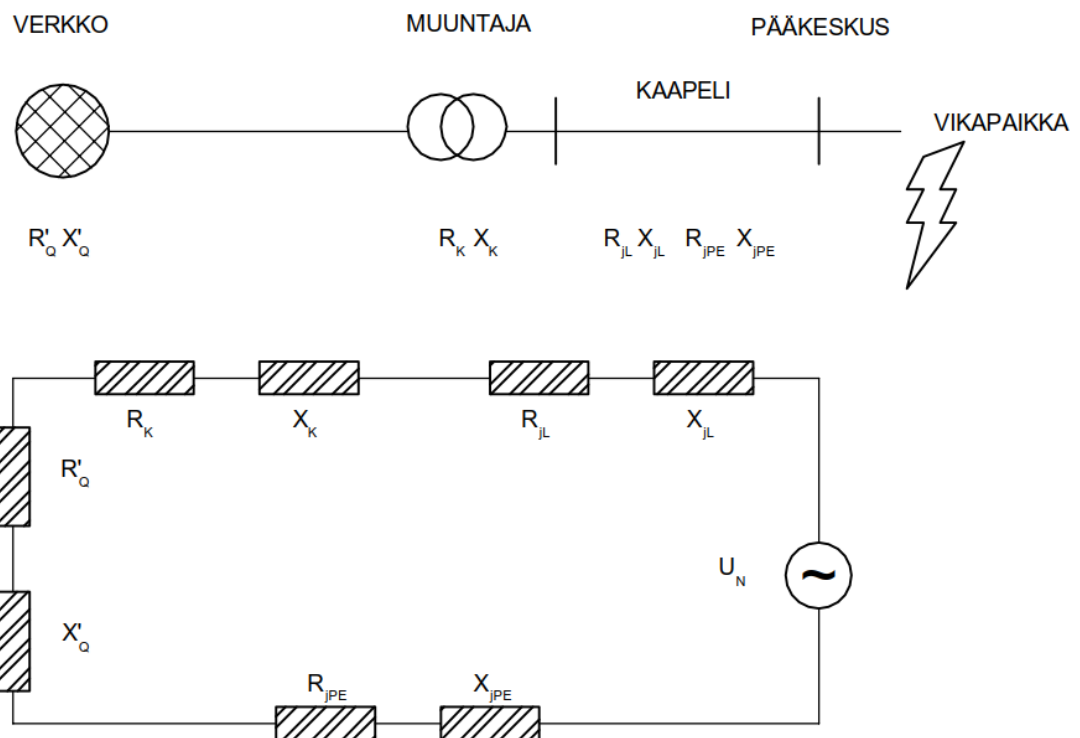
$R_{jPE}$  = kaapelin suojajohtimen resistanssi ( $\Omega$ )

$X'_Q$  = verkon reaktanssi redusoituna ( $\Omega$ )

$X_K$  = syöttävän muuntajan reaktanssi ( $\Omega$ )

$X_{jL}$  = kaapelin vaihejohtimen reaktanssi ( $\Omega$ )

$X_{jPE}$  = kaapelin suojajohtimen reaktanssi ( $\Omega$ )



Kuvio 1. Minimi oikosulkuvirran komponentit

(Puttonen. P. 2014.)

### 3.2.3 Redusointi

Redusointi on huomioitava laskennassa, kun kyseessä on eri jänniteportaata.

Redusoinnilla tarkastellaan kaikkia laskettavia suureita samassa jänniteportaassa.

Kun on valittu haluttu jänniteporras, jossa tarkastellaan suureita, on valittava muiden jänniteportaiden suureet tähän jänniteportaaseen. Heittomerkki on maininta redusoidusta suureesta. Jännitteet redusoidaan kertomalla jännite muuntajan muuntosuhteella (kaava 19). Virrat redusoidaan kertomalla muuntosuhteen käänteis-

arvolla (kaava 20). Eli toisio ja ensiöjännite vaihtavat paikkaa ja impedanssit kerrotaan muuntosuhteen neliöllä (kaava 21). Yleensä joudutaan redusoimaan keskijännitteestä pienjännitteeseen.

$$U'_1 = \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}}\right) * U_1 \quad (19)$$

$$I'_1 = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right) * I_1 \quad (20)$$

$$Z'_1 = \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}}\right)^2 * Z_1 \quad (21)$$

missä

$U'_2$  = redusoitu jännite

$U_{1n}$  = muuntajan ensiöjännite

$U_{2n}$  = muuntajan toisiojännite

$U_2$  = valitun jänniteportaan jännite

$I'_2$  = redusoitu virta

$I_2$  = valitun jänniteportaan virta

$Z'_2$  = redusoitu impedanssi

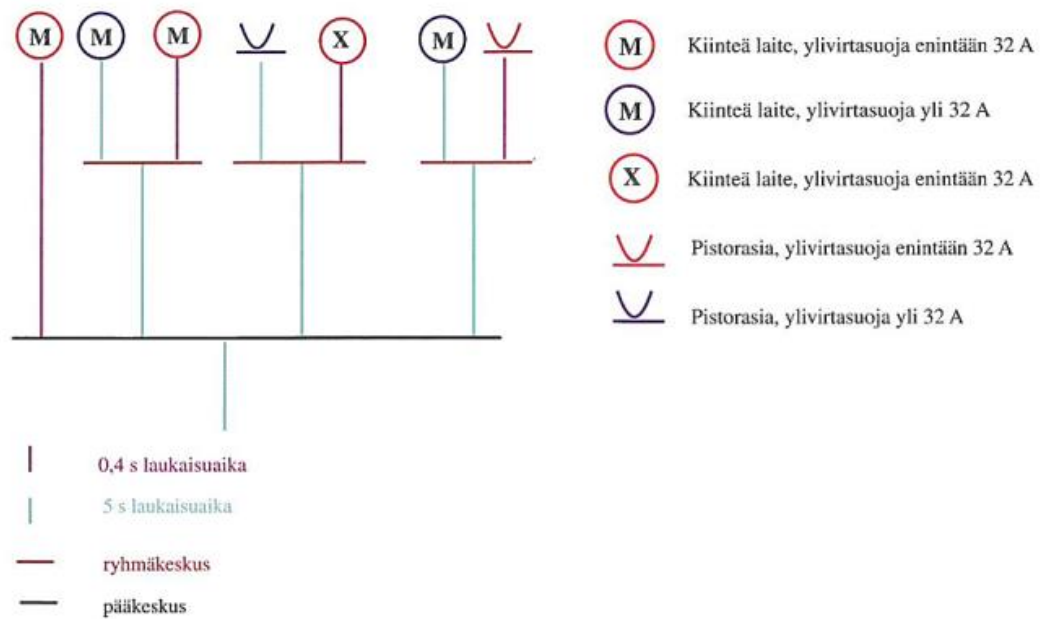
$z_2$  = valitun jänniteportaan impedanssi

(Elovaara; Laiho 2007.)

### 3.2.4 Vikasuojaus ja selektiivisyys

Yleisimpänä vikasuojauksena asennuksissa käytetään syötön automaattista poiskytkentää. Suljetun vikavirtapiirin ja suojalaitteen valinta perustuu siihen, että kosketusjännite, mikä syntyy vian aikana, kytkeytyy pois ennen kuin se aiheuttaa vaaran. Kun suojalaite on valittuna, täytyy myös vikavirtapiirin loputkin osat mitoittaa oikein, ettei suojajohdin pääse vaurioitumaan oikosulun seurauksesta ennen kuin suojalaite toimii. Standardissa SFS-6000 ryhmäjohtoon ylivirtasuojan ollessa enintään 32A, vika joka on vaihejohtimen ja jännitteelle alttiin osan välillä on kytkettävä pois 0.4 sekunnissa, yli 32A ryhmäjohtoilla sekä kaikilla pääjohtoilla poiskytkentäaika on 5.0 sekuntia. Esimerkki kuviossa 3. (Sähköinfo Oy 2013.)





Kuvio 2. Poiskytkentäajat eri virtapiireillä

(Sähköinfo Oy. 2013)

Mitoituksessa on käytännössä selvitettävä minimi oikosulkuvirta liittymäpisteessä. Tämän tiedon saa jakeluverkkoyhtiöltä. Alla olevissa taulukoissa kuusi (6) ja seitsemän (7) on pienimmät vaaditut oikosulkuvirrat käytettäessä johdonsuojakatkaisijoita tai gG-sulakkeita.

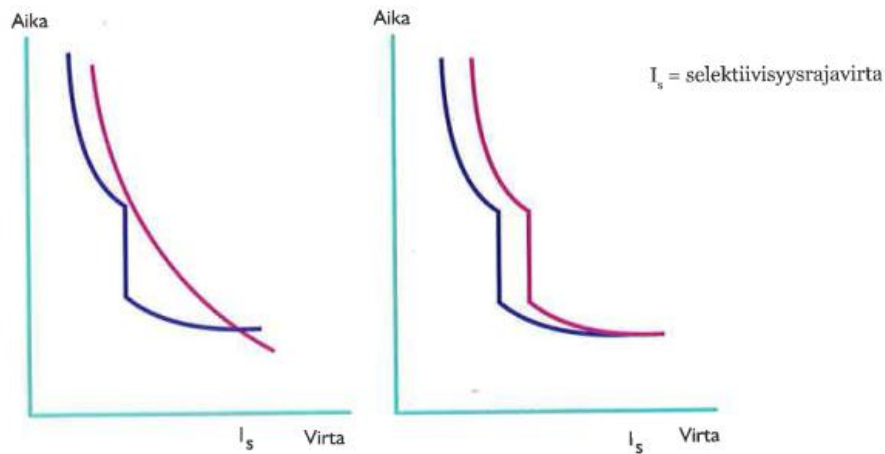
Taulukko 6. Johdonsuojakatkaisijoiden minimi-oikosulkuvirrat (Sähköinfo Oy 2013.)

Pienimmät toimintavirrat johdonsuojakatkaisijoille ja vaadittu mitattu arvot				
Nimellisvirta	B-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo	C-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo
A	A	A	A	A
6	30	37,5	60	75
10	50	62,5	100	125
13	65	81,3	130	162,5
16	80	100	160	200
20	100	125	200	250
25	125	156,3	250	312,5
32	160	200	320	400
50	250	312,5	500	625
63	315	393,8	630	787,5
80	400	500	800	1 000
125	625	781,3	1 250	1 562,5

Taulukko 7. gG-sulakkeiden minimi oikosulkuvirrat (Sähköinfo Oy 2013.)

Pienimmät toimintavirrat gG-sulakkeille ja vaadittu mitatut arvot				
Nimellisvirta	gG-sulake	Vaadittu mitattu	gG-sulake	Vaadittu mitattu
A	0,4 s	arvo	5,0 s	arvo
A	A	A	A	A
2	16	20	9	11,3
4	32	40	18	22,5
6	46,5	58,2	28	35
10	82	102,5	46,5	58,2
16	110	137,5	65	81,3
20	145	181,3	85	106,3
25	180	225	110	137,5
32	270	337,5	150	187,5
35			165	206,3
40			190	237,5
50			250	312,5
63			320	400
80			425	531,3
100			580	725
125			715	893,8
160			950	1187,5
200			1250	1562,5
250			1650	2062,5
315			2200	2750
400			2840	3550
500			3800	4750
630			5100	6375

Selektiivisyys on sitä, kun suojalaite toimii ainoastaan sille tarkoitetulla suojausalueella, mikä kattaa ylikuormitus ja oikosulkutilanteet. Suojalaitteiden selektiivisyys ei ole aina mahdollista toteuttaa, sillä sen toteuttaminen voi johtaa kohtuuttomiin ylimitoituksiin. Selektiivisyyden voi varmistaa tarkastamalla valmistajan ohjeissa olevasta omaiskäyrästä. Selektiivisyyden voi varmistaa valmistajan ohjeiden ominaiskäyrästä. Tavoitteena on, että suojalaitteiden ominaiskäyrät eivät leikkaa keskenään millään oikosulkuvirran arvolla ja että lähimpänä vika-aluetta olevan suojalaitteen ominaiskäyrä virta-aika koordinaatistossa on alempana kuin edeltävän suojalaitteen ominaiskäyrä. (Sähköinfo Oy 2013.)



a) Sulake ja johdonsuojakatkaisija sarjassa b) Kaksi johdonsuojakatkaisijaa sarjassa

Kuvio 3. Selektiivisyyden tarkistaminen ominaiskäyristä

(Sähköinfo Oy 2013.)

Kahden sulakkeen selektiivisyyden saa selville, kun ensimmäisen sulakkeen sulamispiste on suurempi kuin jälkimmäisen sulakkeen toimintapiste. Tämä on esitetty kaavassa 22

$$I^2 t_{\min(a)} > I^2 t_{\max(b)} \quad (22)$$

missä

$I^2 t_{\min(a)}$  = etu-sulakkeen sulamispiste

$I^2 t_{\min(b)}$  = lähtö-sulakkeen sulamispiste

$I^2 t_{\max(b)}$  = lähtö-sulakkeen toimintapiste

Taulukko 8. SFS-EN 60269-1 I<sup>2</sup>t-ominaisuudet (SFS-EN 60269-1. 2008)

HUOM. Tämä taulukko oli aiemmin taulukko 6 tämän standardin edellisessä painoksessa

$I_n$ gG-sulakkeille $I_{ch}$ gM-sulakkeille <sup>a</sup> A	$I^2t_{min}$ $10^3 \times (A^2s)$	$I^2t_{max}$ $10^3 \times (A^2s)$
16	0,3	1,0
20	0,5	1,8
25	1,0	3,0
32	1,8	5,0
40	3,0	9,0
50	5,0	16,0
63	9,0	27,0
80	16,0	46,0
100	27,0	86,0
125	46,0	140,0
160	86,0	250,0
200	140,0	400,0
250	250,0	760,0
315	400,0	1 300,0
400	760,0	2 250,0
500	1 300,0	3 800,0
630	2 250,0	7 500,0
800	3 800,0	13 600,0
1 000	7 840,0	25 000,0
1 250	13 700,0	47 000,0

<sup>a</sup> gM-sulakkeet, ks. 5.7.1.

Esimerkkilasku 3, johdonsuojien selektiivisyyden määrittäminen.

Etu-sulake 315 A sen  $I^2t_{min(a)} = 400 \cdot 10^3 A$ , lähtösulake on 160 A sen  $I^2t_{min(b)} + I^2t_{max(b)} = 250 \cdot 10^3 A = 250000 A$

$400000 A > 250000 A$ , näin olleen selektiivisyys toimii tässä tapauksessa.

Nyrkkisääntönä voidaan pitää sulakkeiden kahden portaan mittainen ero, jotta ne toimivat selektiivisesti.

(SFS-EN 60269-1. 2008)

## 4 Opinnäytetyön toteutus

### 4.1 Aineiston keruun toteutus

Opinnäytetyön toteutus alkoi siitä, kun sain käyttööni aikaisemmin kaapelin rajapi-tuuden ja mitoituksen tarkastamisessa käytetyt Excel-taulukot. Aloin tutkimaan oli-siko taulukoita mahdollista hyödyntää jatkossa. Taulukoista löytyi paljon hyödyllistä tietoa ja erilaisia tekniikoita siitä, miten Excelistä saadaan haettua arvoja eri välileh-diltä. Seuraavaksi aloin rakentamaan omaa versiotani mitoitusyökalusta, joka laskee arvon suoraan, eikä haluttua arvoa tarvitse erikseen tarkastaa taulukosta. Laskenta-

työkalun ulkoasun toivottiin olevan hyvin selkeä, sellainen että se näyttäisi lähes pääkaavion tapaiselta. Ensimmäiseksi muokkasin ulkoasun suunnilleen lopullisen ulkoasun näköiseksi helpottamaan loogisuutta laskennan edetessä.

Seuraavana vuorossa oli moottorivalmistaja ABB:n moottoreiden tietojen haku. Tämä ei kuitenkaan onnistunut aivan helposti. ABB:n moottoriluetteloista ei suoraan löytynyt tietoa  $\cos\phi$ start-arvoa eli tehokertoimesta käynnistystilanteen aikana. Sain esimieheiltäni yhteystiedot henkilöön, joka on erikoistunut moottoreihin sekä generaattoreihin. Häneltä sain lisätietoa ABB:n moottoreista. Hän suositteli asentamaan koneelle MotSize-ohjelman, josta löytyisivät kaikki tiedot ABB:n moottoreista. Asensin ohjelman koneelleni, sillä pystyin määrittämään suoraan tulostusasetuksista mitä tietoa halusin moottoreista. Keräsin ohjelman avulla ABB:n kolmesta eri moottoriluokasta ja jokaisesta IE3-IE4-luokan moottorista tarvittavat tiedot kaapeleiden mitoistusta varten. Näitä tietoja ovat: Moottorin teho, käyttöjännite, käyntivirta,  $\cos\phi$ , pyörimisnopeus, käynnistysvirta,  $\cos\phi$ start. Näiden avulla sain tehtyä laskentatyökaluun yhdelle välilehdelle taulukon, jossa on eroteltu moottorit eri luokkiin.

Käytin työssäni ABB:n räjähdysvaaralliseen tilaan käyviä moottoreita Ex d IIB/IIC T4 Gb, prosessimootoreita sekä vakiomootoreita. Näitä moottoreita käytetään teollisuudessa yleisimmin. Valitsin vain IE3-IE4-hyötysuhdeluokan-moottorit ohjelmaani, koska laskentatyökalussa on käytössä ainoastaan suora käynnistys.

EU-direktiivin 2005/32/EY viimeinen vaihe tulee käytäntöön 1.1.2017. Tällöin kaikkien EU-alueella valmistettujen, markkinoitujen ja käyttöön otettujen moottoreiden tulee täyttää IE3-luokan energiatehokkuus ja hyötysuhdekriteerit. Vaihtoehtona tietenkin on käyttää vielä IE2 luokan moottoria, mutta vain taajuusmuuttajaohjattuna. (Moottorien uusi hyötysuhdeluokitus n.d)

Moottoreiden tietojen jälkeen keräsin seuraavalle välilehdelle tiedot kaapelin valmistajan kaapelilehdistä. Valitsin kaapelivalmistajaksi Prysmian Group:n. Tältä kaapelivalmistajalta löytyivät helpoiten tarvittavat tiedot kaapeleista. Kaapeleiksi ohjelmaani valitsin alumiini- sekä kuparijohdinkaapelit AMCMK, MCMK ja MMJ. Kaapeleiden tärkeimpinä tietoina mitoituksen kannalta ovat sen resistanssi sekä reaktanssi.

Kaapeleiden korjauskertoimet ovat suoraan standardista SFS-6000. Laskentatyökälussa on otettu huomioon eri asennustapoihin liittyvät korjauskertoimet, kuten ympäristön lämpötila, maan lämpötila, maan lämpöresistiivisyys, vierekkäisten kaapeleiden lukumäärä, kaapeleiden sijoitus sekä kaapeleiden välinen etäisyys. En ottanut huomioon kertoimia jotka koskevat eristyksen paksuutta tai harmonisten yliaaltojen vaikutusta. En nähnyt niitä tarpeelliseksi tähän versiooni, mutta ne on helppo lisätä ohjelmaan jälkeinpäin.

Ylikuormitus ja oikosulkusuojina käytin työssäni gG-sulakkeita sekä B-, C-tyyppin johdonsuojakatkaisijoita. Näille on standardissa SFS-6000 suoraan annetut minimi-oikosulkuarvot, ja ne on standardoitu tietyille nimellisvirroille.

Käytin pääsääntöisesti työssäni standardi SFS-6000. Näin aineisto on luotettavaa ja se helpottaa huomattavasti mitoitusta, samoin kuin moottorivalmistajan ohjelman avulla saamani tieto. Työssä oli selvät raamit, joiden mukaan etenin. Tarkkaa aikataulua ei työnantajaltani tullut, mutta pyrin mahdollisuuksien mukaan muiden töiden ohessa tuottamaan opinnäytetyötä eteenpäin. Pyysin kommentteja laskentatyökälusta jo siinä vaiheessa, kun olin saanut pohjan työlleni. Halusin tietää millaisia asioita ja komponentteja halutaan laskentatyökälussa käytettävän.

## 4.2 Kaavojen ja ehtojen toteutus Excelissä

Kaavojen ja eri ehtojen toteuttaminen Excel-ohjelmassa ei ollut millään tavalla helppoa. Kaapelinmitoituksessa täytyy ottaa niin monta eri korjauskerrointa huomioon ja kaikki nämä pitää huomioida samassa lauseessa. Alkuun tein pitkiä kaavoja, kunnes huomasin, että kaavojen sisältöön on työläämpää ja vaikeampaa päästä perille jälkeinpäin. Niinpä päätin tehdä järjestelmällisesti jokaiseen eri vaiheeseen selvät kohdat ja paloittelin lauseet pienempiin osiin. Siinä vaiheessa, kun lauseessa mahdollisesti on virhe, on se huomattavasti helpompi paikantaa. Excelissä sulkujen sijoittaminen on erittäin tärkeää oikeisiin kohtiin lauseessa. Tarkastinkin jokaisen tekemäni lauseen erikseen laskimella, jotta sain oikean lopputuloksen. Käytin todella paljon

JOS-ehtoista lausetta kaavoissa ja hakutoimintoa PHAKU, joka hakee arvon matriisiin määritetystä sarakkeesta. Suurinta päänvaivaa ja harmaita hiuksia aiheutti sulakkeen valinta ja vielä niin, että se hakee oikean arvon. On kuitenkin huomioitava ohjelmaa käytettäessä, että tiedetään mitä ollaan mitoittamassa. Yksinkertaisen ohjelman rakenne on hyvin monimutkainen. Tein ohjelmaa kasatessa sille pieniä koeponnistuksia, jotta näin onko arvot oikeat, kun on mitoittanut kaapelin.

Ehdot ja kaavat pääsääntöisesti näyttävät kuvioiden 4, 5 ja 6 kaltaisilta. Osa kaavoista ja ehdoista olivat todella lyhyitä tai sitten todella pitkiä. Joitakin ehtoja ei voinut pilkkoa pienempiin palasiin johtuen siitä, että ehto ei olisi enää pitänyt paikkaansa pilkottuna. Kuten kuvioista viisi (5) voi nähdä, ovat kaavat paisuneet hyvinkin pitkiksi. Virheen korjaaminen tällaisesta on huomattavasti vaikeampaa kuin lyhyestä kaavasta.

=VALITSE.INDEKSI(VASTINE[Q\$Q19;'Sulakkeiden data'!\$M\$31:\$M\$52;-1];'Sulakkeiden data'!\$A\$52;'Sulakkeiden data'!\$A\$51;'Sulakkeiden data'!\$A\$50;'Sulakkeiden data'!\$A\$49;'Sulakkeiden data'!\$A\$48;'Sulakkeiden data'!\$A\$47;'Sulakkeiden data'!\$A\$46;'Sulakkeiden data'!\$A\$45;'Sulakkeiden data'!\$A\$44;'Sulakkeiden data'!\$A\$43;'Sulakkeiden data'!\$A\$42;'Sulakkeiden data'!\$A\$41;'Sulakkeiden data'!\$A\$40;'Sulakkeiden data'!\$A\$39;'Sulakkeiden data'!\$A\$38;'Sulakkeiden data'!\$A\$37;'Sulakkeiden data'!\$A\$36;'Sulakkeiden data'!\$A\$35;'Sulakkeiden data'!\$A\$34;'Sulakkeiden data'!\$A\$33;'Sulakkeiden data'!\$A\$32;'Sulakkeiden data'!\$A\$31)

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
	<b>Valaistus</b>											
J		SAADUN KAAPELIN MUKAAN LASKETAAN SILLE KAAPELI PITUUS					HALUTUN KAAPELIN MUKAAN LASKETAAN SILLE KAAPELI PITUUS				Asennustapa A	1
		SULAKKEEN OIKOSULKU ARVO					RAJAPITUUS	HALUTTU JÄNNITTEI	3,00 %		Asennustapa B	2
	gG-sulake	2200A								Asennustapa C	3	
JUL	gG-Sulake 315A	RAJAPITUUS	HALUTTU JÄNNITTEENALENEM	3,00 %		334,2m	SAATU RAJAPITUUS	258,13m	258	Asennustapa D	4	
		188 2m	SAATU RAJAPITUUS		147 47m	147	142 0m	142 0m	258 0V/1	Asennustapa F	6	

Kuvio 4. Sulakkeen valinta

Johdonsuojan valinta tapahtuu kuorman virran perusteella, josta laskentatyökalu valitsee virta-arvoa suuremman johdonsuojan arvon.





## 5 Kaapelin laskentatyökalu versio 1.0

Jokaiseen lähtöön ilmoitetaan erikseen sähköverkkoyhtiöltä saatu oikosulkuvirta lähdön alkupäässä, jännitetaso sekä laskentakerroin. Laskentakerroin on 1, mikäli tiedetään asennustapa ja siihen liittyvät kertoimet, tai 0,6 jolloin se on yleinen kerroin ja ohittaa asennustapoihin kohdistuvat korjauskertoimet. korjauskerroin 0,6 on yleinen, jota käytetään yleisesti teollisuudessa, jos ei olla varmoja, millaisissa olosuhteissa kaapeli on matkan varrella. Tämä kerroin mitoittaa turvallisesti kaapelit ylikokoon ja on riittävä kuormituksen kannalta.

### 5.1 Moottorilähtö

Moottorilähdöllä on mahdollisuus mitoittaa jo tiedossa olevalle moottorille kaapeli ja sitä suojaava sulake. Tässä opinnäytetyössä ei ole huomioitu moottorinsuojakytkimiä, vaan sulake toimii moottorin oikosulkusuojana. Moottorin valinnan perusteella valitaan jännitetaso, käytössä oli 400 V ja 690 V moottorit. Laskentatyökalu valitsee tämän jälkeen pienimmän mahdollisen sulakkeen, jota voidaan käyttää. Mutta se huomioi kuitenkin seuraavan tehoportaan moottorikaapelin mitoituksessa. Mahdollisuutena on valita isompikin sulake suojaamaan moottoria, mikäli pienin mahdollinen suojalaite menee liian lähelle moottorin käynnistysvirtaa. Tämä voi aiheuttaa suojalaitteen laukeamisen moottorin käynnistysvirran mahdollisesti ylittäessä sulakkeen palamisvirran arvon. Asennustavan, korjauskertoimien ja poiskytkentäajan valinnan jälkeen, ohjelma laskee pienimmän mahdollisen kaapelin, jota voidaan käyttää ja ilmoittaa rajapituudet jännitteenalenemissa, normaalissa tilanteessa ja käynnistyksessä, sekä vikasuojauksen toimiessa. Mahdollisuutena on valita suurempi kaapeli, jolla saadaan pidemmät rajapituudet kaapelille. Ohjelma kertoo ilmoittamalla vihreällä värillä, mikä on paras vaihtoehto maksimaaliseen rajapituuteen ja punaisella värillä, mikäli ehdot eivät täyty. Moottorilähdössä on otettava huomioon poiskytkentä aika, joka vaikuttaa kaapelin rajapituuteen. Tässä täytyy huomioida, onko lähdön suojalaitteen nimellisvirta suurempi vai pienempi kuin 32A

## 5.2 Valaistus ja laitelähtö

Valaistuslähtö on lähes samanlainen rakenteeltaan kuin moottorilähtökin, mutta siinä erona on se, että siihen ilmoitetaan moottorin sijasta suoraan arvioitu pätöteho tai virta ja tehokerroin  $\cos\varphi$ . Näiden lähtötietojen avulla ohjelma laskee samassa järjestyksessä suojalaitteen ja kaapelin lähdölle. Valaistuksessa on otettava huomioon poiskytkentä aika, joka vaikuttaa kaapelin rajapituuteen. Tässä täytyy huomioida, onko lähdön suojalaitteen nimellisvirta suurempi vai pienempi kuin 32A

## 5.3 Alakeskuslähtö

Alakeskuslähdön rakenne on samanlainen kuin edellisissä, mutta tässä tapauksessa kaapelin päässä on alakeskus, josta on kaksi erillistä lähtöä. Toinen lähde on valaistus ja laitelähtö ja toinen lähtö on moottorilähtö. Nämä kaksi lähtöä eivät eroa juurikaan toiminnallisesti aikaisemmin läpikäytyistä lähdeistä, paitsi alakeskus lähdeissä ja alakeskuksen lähdeissä on otettu huomioon selektiivisyys ja kokonaisjännitteenalenema. Selektiivisyydessä on otettava se huomioon, ettei virtapiiriä ylimitoiteta, tarkoittaa siis sitä, että kaapeli koot kasvaisivat liiallisuuksiin. Josta sitten kaasaantuisi suuret kustannukset vain pelkästään selektiivisyyden takia. Laskentatyökalussa on solut, jotka ilmoittavat kaapelia mitoittaessa onko virtapiiri selektiivinen vai pitääkö etusulaketta suurentaa. Selektiivisyyden saamiseksi laskentatyökalussa on käytetty ABB:n antamia johdonsuojien arvoja. Selektiivisyys tarkastetaan niin johdonsuojakatkaisijoiden ja sulakkeiden välillä, kuin myös sulakkeiden välillä.

## 5.4 Raportti

Laskentatyökalussa on myös raportti osio, joka tulostaa tärkeimmät halutut tiedot mitoituksista. Raporttipohjassa on erikseen ilmoitettu jokainen lähtö ja siihen lasketut arvot, raportilla tullaan selventämään saatuja tietoja työkalusta, joita laskennan kautta saatiin. Raporttia käytetään, kun asiakkaalle selvennetään mistä ollaan saatu arvot kaapelin mitoituksessa, sekä pystytään perustelemaan kaavoja, joita ollaan käytetty.

## 6 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada yksinkertainen kaapelin mitoitus työkalu, jolla voidaan mitoittaa kaapeli johdonsuojan ja sulakkeen perusteella, tai johdonsuoja ja sulake kaapelin perusteella. Tuloksiin päästiin halutulla tavalla, laskentatyökalu täyttää ne kriteerit, jotka ennen työaloittamista annettiin. Työkalulla voidaan mitoittaa yksinkertaisesti kaapelit kuormien avulla tai johdonsuoja tai sulake pelkällä olemassa olevalla kaapelin tiedolla. Työstä olisi voinut tehdä mielestäni vielä laajemman, mutta opinnäytetyön kannalta se olisi paisunut liian suureksi. Pidin kuitenkin opinnäytetyön suunnitelluissa rajoissa koko työn ajan, onnistuin omasta mielestäni kuitenkin kokonaisvaltaisesti opinnäytetyössäni.

Opinnäytetyön laskentatyökalu on testattu kaupallisella ohjelmalla, käytin kaupallisenä ohjelmana ABB:n Neplan –ohjelmaa, teimme muutaman esimerkkilaskun laskentatyökalulla ja Neplan–ohjelmalla ja vertasimme tuloksia. Tulokset olivat hyvin samanlaisia. Muutamien ampeerien heitto laskentatulokissa riitti varmistamaan, että tekemäni laskentatyökalu on luotettava.

Laskentatyökalun ulkoasu voisi olla hiukan modernimpi kuin pelkkä Excel-taulukko, mutta tarkoituksena oli saada toimiva ohjelma. Työkalun rakenne on saatu hyvin yksinkertaiseksi, jotta sitä on kenen tahansa helppo käyttää.

Uskon tekemälleni mitoitus työkalulle olevan paljon käyttöä tulevaisuudessa, ainakin itselleni kaapeleita mitoittaessa. Tästä opinnäytetyöstä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää jatkossa toimeksiantajan yrityksessä mihin tein opinnäytetyöni. Työkalusta tullaan jatkossa tekemään massatyökalu, jolla mahdollistetaan useamman lähdön mitoittaminen samaan aikaan ja siitä saadaan myös tulostettua lähtökohtainen raportti. Työkalun jatkekehityksen kohde voisi olla kustannuksien laskenta kaapelin mitoitukselle eli esimerkiksi se, kuinka paljon kalliimmaksi tulee asentaa kuparikaapeli alumiinin sijaan. Työkalu voisi ottaa huomioon mahdollisen tehon kasvun tulevaisuudessa, jonka perusteella on valittava suurempi poikkipinta-ala kaapelille. Työkalu voisi myös mahdollisesti laskea, paljonko kaapeleista aiheutuu häviöitä ja paljonko

häviökustannukset ovat vuodessa, sekä miten häviöihin vaikuttaa kaapelikoon suurentaminen. Työkalulla vois tällöin laskea, mikä on pidemmällä tähtäimellä kustannustehokasta. Pitäisin myös hyvänä, että työkalusta tehtäisiin parempi käyttöliittymä, joka on entistäkin helpompi ja selkeämpi käyttää ja joka pohjautuisi esimerkiksi tietokantoihin.

## Lähteet

Sähköjohtojen mitoittaminen. 2000. ABB TTT-käsikirja. Luku19. Pdf-dokumentti. Viitattu 28.7.2016; Rejlers Oy verkkolevy.

D1-2012. 2013. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 20.p. Espoo: Sähköinfo Oy.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. 6.p. Helsinki: Otatieto.

Moottorien uusi hyötysuhdeluokitus. N.d. Vem motors finland. Viitattu. 25.6.2016.

<http://www.vem.fi/toimialaratkaisut/energiatehokkuus/moottorien-uusi-hyotysuhdeluokitus>

Puttonen P. 2014. optima sähkösuunnittelun materiaali. Viitattu 15.6.2016. Optima oppimisympäristö

Organisaatio. N.d. Rejlers Oy:n luettelo. Viitattu 16.8.2016. Rejlers Oy:n intranetissä.

SFS-käsikirja 600-1. 2012. Pienjännitesähköasennukset. 1. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 60269-1. 2008. Pienjännitevarokkeet, yleiset vaatimukset. 3.p. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

ST 30. 2014. Sähkötekniä taulukoita. 4.uud.p. Tampere: Tammerprint Oy.

Sähköinfo Oy 2013. Sähköasennukset 1. 3. uud.p. Espoo: Sähköinfo Oy.

Rejlers Oy. N.d. Yrityksen nettisivut. Viitattu 28.7.2016. <http://www.rejlers.fi/Yritys/>

## Liitteet

Liite 1. Kuormitettavuuden laskeminen

### Kaapeleiden kuormitettavuus ja korjauskertoimet

**VE1: TIEDETTÄÄN POIKKIPINTA A => HALUTAAN LASKEA KUORMITETTAVUUS  $I_Z$**

<b>Asennustapa A (eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän sisällä putkessa)</b>			
<b>Asennustapa B (eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän pinnalla putkessa)</b>			
<b>Asennustapa C (yksi- tai monijohdinkaapelit tai puuseinän pinnalla (ei putkessa))</b>			
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.2 (kupari/alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.3 (kupari/alumiini)
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	B.52.17	
Kaapelin tod. kuormitettavuus	$I_Z$	$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2$	

<b>Asennustapa D (monijohdinkaapelit maassa)</b>			
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.2 (kupari/alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.3 (kupari/alumiini)
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.15	
Maan lämpöresistiivisyys	$k_2$	B.52.16	
Useita kaapeleita	$k_3$	B.52.18	
Kaapelin tod. kuormitettavuus	$I_Z$	$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$	

<b>Asennustapa E (monijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, esim. hyllyllä) ☹️</b>			
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.4 (kupari) B.52.5 (alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.6 (kupari) B.52.7 (alumiini)
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	Yksi hylly B.52.17	Useita hyllyjä päällekkäin B.52.20
Kaapelin tod. kuormitettavuus	$I_Z$	$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2$	

<b>Asennustapa F (yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, koskettavat toisiaan) ☹️☹️☹️</b>			
<b>Asennustapa G (yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, erillään toisistaan) ☹️ ☹️ ☹️</b>			
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.4 (kupari) B.52.5 (alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.6 (kupari) B.52.7 (alumiini)
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	Yksi hylly B.52.17	Useita hyllyjä päällekkäin B.52.21
Kaapelin tod. kuormitettavuus	$I_Z$	$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2$	

(Puttonen. P. 2014)

## Liite 2. Poikkipinta-alan laskeminen

**VE2: TIEDETTÄÄN KUORMITUSVIRTA  $I_B$  => HALUTAAN LASKEA POIKKIPINTA A**

<b>Asennustapa A (eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän sisällä putkessa)</b>			
<b>Asennustapa B (eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän pinnalla putkessa)</b>			
<b>Asennustapa C (yksi- tai monijohdinkaapelit tai puuseinän pinnalla (ei putkessa))</b>			
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	B.52.17	
Kaapelin vaadittu peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	$I_{ZP} \geq \frac{I_B}{k_1 \cdot k_2}$	
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.2 (kupari/alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.3 (kupari/alumiini)

<b>Asennustapa D (monijohdinkaapelit maassa)</b>			
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.15	
Maan lämpöresistiivisyys	$k_2$	B.52.16	
Useita kaapeleita	$k_3$	B.52.18	
Kaapelin vaadittu peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	$I_{ZP} \geq \frac{I_B}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}$	
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.2 (kupari/alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.3 (kupari/alumiini)

<b>Asennustapa E (monijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, esim. hyllyllä) ☹️</b>			
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	Yksi hylly B.52.17	Useita hyllyjä päällekkäin B.52.20
Kaapelin vaadittu peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	$I_{ZP} \geq \frac{I_B}{k_1 \cdot k_2}$	
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.4 (kupari) B.52.5 (alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.6 (kupari) B.52.7 (alumiini)

<b>Asennustapa F (yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, koskettavat toisiaan) 😞😞😞</b>			
<b>Asennustapa G (yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, erillään toisistaan) 😞 😞 😞</b>			
Ympäristön lämpötila	$k_1$	B.52.14	
Useita kaapeleita	$k_2$	Yksi hylly B.52.17	Useita hyllyjä päällekkäin B.52.21
Kaapelin vaadittu peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	$I_{ZP} \geq \frac{I_B}{k_1 \cdot k_2}$	
Peruskuormitettavuus	$I_{ZP}$	PVC-eristys (70°C) B.52.4 (kupari) B.52.5 (alumiini)	PEX/EPR-eristys (90°C) B.52.6 (kupari) B.52.7 (alumiini)

(Puttonen. P. 2014)