

Jyri Ainasoja Samuel Ojalehto

**TEOLLISUUSSÄHKÖVERKON OIKOSULKUVIRTOJEN
LASKENTA**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2017**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2017	Tekijät Jyri Ainasoja, Samuel Ojalehto
Koulutusohjelma Sähkötekniikka		
Työn nimi Teollisuussähköverkon oikosulkuvirtojen laskenta		
Työn ohjaaja Jari Halme		Sivumäärä 35 + 20
Työelämäohjaaja Ville Haapala		
<p>Opinnäytetyössä selvitettiin ABBDOC -tietokoneohjelman avulla tehtaan pienjännitekeskusten oikosulkuvirtoja. Laskelmia varten kerättiin tietoja ja tehtaan sähköverkko mallinnettiin tietokoneohjelmaan. Tietojen perusteella pystyttiin laskemaan keskusten oikosulkuvirrat.</p> <p>Työ vaati tutustumista oikosulkuvirtalaskennan ja teollisuussähköverkon teoriaan. Tärkeä osa työtä oli tietokoneohjelman käytön oppiminen, jotta sitä pystyi käyttämään tehokkaasti ja täsmällisesti.</p> <p>Työn tuloksena saatiin työn tilaajalle oikosulkuvirrat eri muuntopiirien kaikille pienjännitekeskuksille.</p>		

Asiasanat ABB DOC, oikosulkuvirta, teollisuussähkö
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2017	Authors Jyri Ainasoja, Samuel Ojalehto
Degree programme Electrical Engineering		
Name of thesis Short-Circuit Calculations In Industrial Network		
Supervisor Jari Halme	Pages 35 + 20	
Instructor Ville Haapala		
<p>In this thesis the short-circuit currents of low-voltage busbars in the distribution boards of an industrial factory were calculated by using ABB DOC computer program. For the calculations, data was gathered and the electrical network of the factory was modelled into the computer program. Data gathered was used in calculations of the short-circuit currents in distributions boards.</p> <p>The theoretical knowledge of short-circuit current calculations and industrial electricity networks was required. An important part of the thesis was learning the use of the computer program, in order to use it correctly and efficiently.</p> <p>As a result, the short-circuit calculations of all the low-voltage distribution boards in different transformation circuits were calculated.</p>		

<p>Key words ABB DOC, Industrial electricity network, Short-circuit current.</p>

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

Sähkötekniset merkinnät:

A	Ampeeri
c	Jännitekerroin
$\cos\varphi$	Tehokerroin
Hz	Hertsi
I	Virta
I'k	Muutosoikosulkuvirta
I" k	Alkuoikosulkuvirta
I" kv	Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta
ip	Sysäysoikosulkuvirta
Ik	Oikosulkuvirta
I _n	Nimellisvirta
I _s	Käynnistysvirta
K	Sysäyskerroin
l	Kaapelin pituus
m	Tasavirtatekijä
n	Vaihtovirtatekijä
P	Pätöteho
P _n	Nimellispätöteho
R	Resistanssi
R _k	Oikosulkuresistanssi
R _{kv}	Syöttävän verkon resistanssi
S" kv	Syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho
S _n	Nimellinäennäisteho
t _k	Oikosulun kestoaika
U	Jännite
U _N	Nimellisjännite
V	Voltti
X	Reaktanssi
x	Alku-, muutos- tai tahtireaktanssi prosentteina
x _d "	Suhteellinen alkureaktanssi
X _k	Oikosulkureaktanssi

X_{kv}	Syöttävän verkon reaktanssi
Z	Impedanssi
Z_0	Nollaimpedanssi
Z_1	Myötäimpedanssi
Z_2	Vastaimpedanssi
Z_f	Vikaimpedanssi
Z_i	Theveninin impedanssi
Z_k	Oikosulkuimpedanssi
$Z'k$	Muutosoikosulkuimpedanssi
Z_m	Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi
Z_j	Kaapelin impedanssi
φ_{nGM}	Tahtikoneen nimellispisteen kulma

Lyhenteet:

AHXAMK-W	Alumiinijohtiminen muovieristetty keskijännitekaapeli
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardisoimisjärjestö
J07,J08	Haapaveden sähköaseman lähtö
KJ	Keskijännite (1-36 kV)
LLL	Kolmivaiheinen oikosulku
LL	Kaksivaiheinen oikosulku
LPE	Yksivaiheinen oikosulku
M1,M2,..	Valion tehtaan muuntopiiri
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni
PJ	Pienjännite (<1000 V)
PM1,PM2	Haapaveden sähköaseman päämuuntaja
PVC	Polyvinyylikloridi

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VALIO OY	3
3 SÄHKÖVERKON OIKOSULKUJEN MALLINTAMINEN JA LASKENTA	5
3.1 Theveninin menetelmä.....	5
3.2 Oikosulkujen vikatyypit	7
3.2.1 Kolmivaiheinen oikosulku	7
3.2.2 Kaksivaiheinen oikosulku.....	8
3.2.3 Yksivaiheinen oikosulku	8
3.3 Ominaisoikosulkuteho-menetelmä.....	9
3.4 Oikosulkusuureet.....	9
3.5 Oikosulkuimpedanssien mallintaminen.....	13
3.5.1 Syöttävä verkko	13
3.5.2 Tahtikoneet	14
3.5.3 Muuntajat.....	15
3.5.4 Epätahtimoottorit	15
3.5.5 Kaapelit, johdot ja kiskot	16
3.6 Oikosulkulujuus ja oikosulkuvoimat	17
4 TEOLLISUUSSÄHKÖVERKKO.....	18
4.1 Teollisuuskeskukset.....	18
4.2 Jakelumuuntajat	19
4.3 Kaapelit	20
5 SÄHKÖVERKON LASKENTAOHJELMA ABB DOC.....	21
6 VALION HAAPAVEDEN TEHTAAN KESKUSTEN OIKOSULKUVIRTOJEN LASKENTA.....	24
6.1 Laskentaan tarvittavien tietojen kerääminen.....	25
6.2 Oikosulkuvirtojen laskenta käyttäen ABB DOC -laskentaohjelmaa.....	26
7 LASKENNAN TULOKSET	29
8 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	35
LIITTEET	
KUVAT	
KUVA 1. Ilmakuva Valion Haapaveden tehtaasta	3
KUVA 2. Sysäyskertoimen k riippuvuus resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta	10
KUVA 3. Tasavirtatekijän m riippuvuus sysäyskertoimesta k ja oikosulun kestoajasta t_k	12
KUVA 4. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus $l''k/lk$ suhteesta ja oikosulun kestoajasta t_k	12
KUVA 5. Kolmivaiheisten muuntajien kytkennät.	20
KUVA 6. Laitoksen yleisten ominaisuuksien määrittely.....	22

KUVA 7. Kaapelien määrittely	23
KUVA 8. ABB:n valmistama 2000 kVA:n kolmivaihdemuuntaja M2	25
KUVA 9. Muuntopiiri M1 mallinnettuna ABB DOC –ohjelmalla	28

KUVIOT

KUVIO 1. Viallinen verkko ja sen Theveninin sijaiskytkentä	6
--	---

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Jännitekertoimet oikosulkuvirran laskentaan	7
TAULUKKO 2. Sysäyskertoimen κ arvo suhteessa oikosulkuvirran tehollisarvoon	11
TAULUKKO 3. Epätahtimoottoreiden R_m/X_m ja X_m/Z_m suhteet.....	16
TAULUKKO 4. Muuntopiirin M1 tuloksia.	29
TAULUKKO 5. Muuntopiirin M2 tuloksia	30
TAULUKKO 6. Muuntopiirin M3 tuloksia	31
TAULUKKO 7. Muuntopiirin M4 tuloksia	32
TAULUKKO 8. Muuntopiirin M5 tuloksia	32

1 JOHDANTO

Toimivan teollisuuslaitoksen perusedellytys on luotettava ja vaatimusten mukainen sähköverkko. Hyvin suunniteltua, dokumentoitua ja rakennettua sähköverkkoa on helppo huoltaa ja laajentaa. Erityyppiset oikosulut aiheuttavat kolmivaiheisissa sähköverkoissa haasteita sekä oikosulkukestävyydelle että oikosulkusuojaukselle. Oikosulkuvirtaa täytyy pyrkiä rajoittamaan, jotta se ei aiheuta termisiä ja mekaanisia vaurioita tai vaaratilanteita. Toisaalta oikosulkuvirran täytyy olla riittävä, jotta verkon osan suojaus toimii oikein. Teollisuussähköverkoissa oikosulkutarkastelu on tärkeää, jotta voidaan valita oikeanlaiset komponentit ja suojalaitteet. Näin varmistutaan, että sähköverkon kaikki osat kestävät erityyppisiä vikatilanteita ja suojaus toimii selektiivisesti. Teollisuussähköverkoissa kuormat ovat suuria ja verkossa on isoja sähkömootteja ja muuntajia, jotka pyrkivät nostamaan oikosulkuvirtaa. Myös teollisuuslaitosten kojeistojen suhteellisen lyhyet etäisyydet kasvattavat oikosulkuvirtaa.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Valio Oy:n toimeksiannosta. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Valio Oy:n Haapaveden tehtaan sähköjakeluverkon laskennallisia oikosulkuvirtoja. Työn tavoitteena on laskemalla määrittää tehtaan eri muuntopiirien sähkökeskusten oikosulkuvirtoja. Tämän työn ulkopuolelle rajattiin tarkemmat kuormitettavuustarkastelut ja selektiivisyydeltä tarkastelut. Tarkastelu kattaa sekä 20 kV keskijänniteverkon, että tehtaan 0,4 kV pienjänniteverkon. Laskennassa käytettiin apuna ABB:n DOC2-sähköverkonmitoitusohjelmaa. Nykyiset mitoitusohjelmat ovat perinteisiä laskentamenetelmiä nopeampia ja niillä voidaan laskea monimutkaisempien verkkojen arvoja. ABB DOC2 -laskentaohjelma vaati suhteellisen paljon opettelua ennen kuin sitä pystyi hyödyntämään tehokkaasti.

Johdannon jälkeen seuraa toimeksiantajan esittely jossa kerrotaan Valiosta yrityksenä ja Valion Haapaveden tehtaan toiminnasta. Vaikka oikosulkuvirtojen laskenta tehtiin työssä mitoitusohjelman avulla, on tärkeää ymmärtää matemaattiset menetelmät, joilla voidaan laskea oikosulkuvirta. Teoriaosuudessa käsitellään matematiikan lisäksi työn kannalta oleellisesti liittyvää teoriaa. Käytännön osuudessa kerrotaan tarkemmin Valion Haapaveden tehtaan sähköverkosta ja työssä käytettävästä ABB DOC2 -sähköverkonmitoitusohjelmasta. Käytännön osuudessa käydään läpi myös työn suorittamisen eri vaiheita ja siinä kohdattuja ongelmatilanteita. Lopuksi esitetään työssä saavutetut tulokset ja johtopäätökset.

Tämä opinnäytetyö tehtiin poikkeuksellisesti parityönä. Koska opinnäytetyöhön liittyvä teoria-alue on laaja ja työhön liittyi paljon eri työvaiheita, parityö mahdollisti aiheen laajemman tarkastelun. Vaikka työ oli suhteellisen laaja, parityöskentely mahdollisti työkuorman pysymisen opinnäytetyössä kohtuullisena. Työtehtävät pyrittiin jakamaan mahdollisimman tasaisesti ja monipuolisesti, jotta molemmat työn tekijöistä saisivat aiheesta kattavan ja tarkan kokonaiskuvan.

Haluamme kiittää Valio Oy:tä toimeksiannosta ja mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta. Erityisesti haluamme kiittää Valion Haapaveden tehtaan sähkötöiden johtajaa Ville Haapalaa, joka toimi opinnäytetyön työelämäohjaajana. Kiitämme myös työn ohjaajaa ja koulutusohjelman yliopettajaa Jari Halmetta, sekä muuta Centria ammattikorkeakoulun henkilökuntaa ohjauksesta opinnäytetyön tekemisessä.

Oikosulkulaskennasta on olemassa paljon materiaalia ja pyrimme yhdistelemään monipuolisesti ja oikein käytettävissä ollutta kirjallisuutta. Tärkeimpänä lähteenä työn teoria osuuteen oli Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun valmistama opetusmoniste teollisuusverkon oikosulkuvirtojen laskentaan. Käytännön osuudessa lähteenä oli paljon laskentaohjelman valmistajan käyttöopas ja työn toimeksiantajan toimittamat tiedot.

2 VALIO OY

Valio Oy on suomalainen elintarvikeyritys. Sen päätuoteryhmiä ovat juustot, rasvat, mehut, maitojauheet ja herajauheet. Valio on perustettu vuonna 1905. Sen omistavat 17 osuuskuntaa, joiden jäsenet ovat maitotilayrittäjiä. Valion pääkonttori sijaitsee Helsingissä ja tuotantolaitoksia on Suomessa yhteensä viisitoista. Lisäksi Virossa sijaitsee kaksi tuotantolaitosta. Konsernilla oli henkilöstöä vuonna 2015 noin 4000 henkilöä. Valio-konsernilla on ulkomailla yhteensä yksitoista tytäryhtiötä. Tytäryhtiöt sijaitsevat kahdeksassa eri maassa; Ruotsissa, Tanskassa, Virossa, Latviassa, Liettuaassa, Venäjällä, Yhdysvalloissa, sekä Kiinassa. Tutkimus- ja tuotekehitys on ollut tärkeässä osassa läpi yrityksen historian. Valio tuo markkinoille vuosittain useita uutuustuotteita. (Valio 2016a, Valio 2016b.)



KUVA 1. Ilmakuva Valion Haapaveden tehtaasta (Valio 2016)

Valion Haapaveden tehdas otettiin käyttöön jo vuonna 1965. Tuotanto keskittyi alkuvaiheessa maitojauhetuotteisiin, jota vietiin Suomen lisäksi myös Neuvostoliittoon ja Englantiin. Haapaveden tehtaalle otettiin käyttöön juustola vuonna 1974. Silloin tehtaassa valmistettiin maitojauheen lisäksi juustoa ja voita. Tehtaassa oli myös erikoistuotelinja, jolla valmistettiin jogurtteja,

vanukkaita, sekä ensimmäisenä Suomessa ranskankermaa. Vuonna 1993 Haapaveden tehtaalla ruvettiin valmistamaan Oltermanni-juustoa, joka on nykyään tehtaan päätuote. Tehdas tunnetaan nykyään myös korkealaatuisen herajauheen sekä vasikanrehujen valmistajana. Viime vuosina tehtaaseen on tehty suuria investointeja vastaamaan kasvanutta maidontuotantoa. Maidonvastaanottoon rakennettiin uusi linjasto, juustolan viereen juuston kypsytysuolaamo ja uusimpina uudistuksina maitosäiliöautojen pesuhalli sekä uusi tuottajanmyymälä. Haapaveden tehdas ottaa vastaan vuodessa noin 249 miljoonaa litraa maitoa. Tehdas on yksi suurimmista työllistäjistä Haapavedellä, tällä hetkellä tehtaassa työskentelee noin 150 työntekijää. (Valio 2016a.)

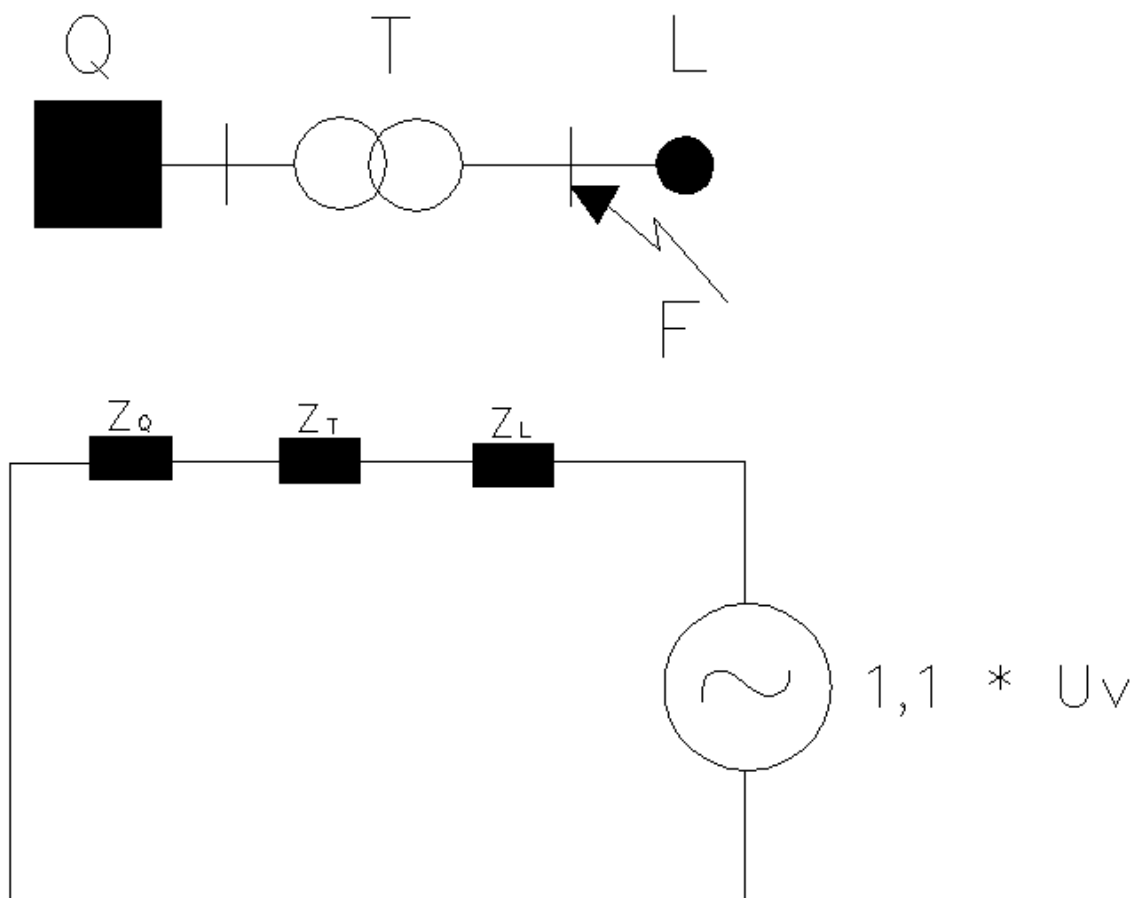
3 SÄHKÖVERKON OIKOSULKUJEN MALLINTAMINEN JA LASKENTA

Oikosulkuvirtoja ja niiden laskemista käsitellään IEC 60909 -standardissa. Tässä työn teoria osiossa käsitellään oikosulkuvirtalaskelmiin liittyvät perussuureet ja yksinkertaiset laskentamenetelmät. Lisäksi käsitellään oikosulkuvirtoihin liittyviä tekijöitä ja yleisiä teollisuuden sähkönjakelujärjestelmiä.

Oikosulkuvirta on lähes puhdasta induktiivista loisvirtaa, koska oikosulkuimpedanssi on pääosin induktiivinen. Oikosulkuvirta sisältää vaihtovirtakomponentin lisäksi myös tasavirtakomponentin I_t . Tasavirtakomponentin vaimeneminen riippuu tarkasteltavan verkon ominaisuuksista. Kolmivaihejärjestelmässä ainakin kahdessa vaiheessa on aina myös tasavirtakomponentti. Standardi IEC 60909 suosittelee, että laskennoissa jännitteen arvona käytettäisiin 1,1 kertaista jännitettä, koska impedansseja on hyvin vaikea arvioida täsmällisesti. Verkon tähtipisteiden maadoitus muun muassa muuntajilla vaikuttaa maasulussa syntyvien ylijännitteiden suuruuteen. (Elovaara & Haarla 2011, 171-175.)

3.1 Theveninin menetelmä

Theveninin menetelmässä tarkasteltava vikaantunut verkko korvataan yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Thevenin-menetelmässä määritetään vikakohtan jännite kuormitustilanteessa, ennen vikaa. Sitten selvitetään vikakohtasta syöttävään verkkoon katsottaessa näkyvä impedanssi. Theveninin sijaiskytkennässä vikapaikkaan asetetaan jännitelähde ja muut jännitteet oletetaan nolliksi. Vastaavat oikosulkuimpedanssit sijoitetaan verkon muiden lähteiden ja komponenttien tilalle. Vikapaikassa olevan ekvivalenttisen jännitelähteen ja verkon komponenttien impedanssin avulla voidaan muodostaa sijaiskytkentä eri verkoille ja eri vikatilanteille. (Hieta-lahti 2013, 267.)



KUVIO 1. Viallinen verkko ja sen Thevenin sijaiskytkentä. Kohdassa F tapahtuu oikosulku. Q on syöttävä jäykkä verkko, T on muuntaja ja L on verkon kuorma. Näille komponenteille voidaan määrittää näiden oikosulkuimpedanssit Z_Q , Z_T ja Z_L . Kuviossa on esitetty myös Theveninin sijaiskytkentä, käyttäen jännitelähdettä ja oikosulkuimpedansseja.

Vikavirran tehollisarvo lasketaan ohmin lain mukaisesti jakamalla piirin jännite sen impedanssilla. Vaihtovirtatarkastelussa käytetään oikosulkuimpedanssia Z_k , joka koostuu oikosulku-resistanssista R_k ja oikosulkureaktanssista X_k . Oikosulkuimpedanssi Z_k on piirin impedanssi jännitelähteen navoista mitattuna. Tästä verkon impedanssista käytetään myös nimitystä Theveninin impedanssi Z_i . Oikosulkuvirran yksikkö on ampeeri (A), mutta yleensä käytetään paremmin soveltuvaa yksikkö kiloampeeri (kA). Taulukossa 1 esitettyjen jännitekertoimien avulla voidaan laskea vikatapaukselle maksimi- ja minimioikosulkuvirta. (Hietalahti 2013, 267-268.)

Theveninin menetelmällä oikosulkuvirran tehollisarvo saadaan yhtälöstä:

$$I''_k = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (1)$$

missä R_k on oikosulkuresistanssi, X_k on oikosulkureaktanssi, c on jännitekerroin ja U_n on viikapaikan pääjännite. (ABB 2000, 1.)

TAULUKKO 1. Jännitekerroimet oikosulkuvirran laskentaan

Jännite U_n	Maksimioikosulkuvirta C_{\max}	Minimioikosulkuvirta C_{\min}
0.4 kV	1.0	0.95
1 – 35 kV	1.10	1.00
35 – 230 kV	1.10	1.00

3.2 Oikosulkujen vikatyypit

Sähköverkossa ilmenevät oikosulut ja viat ovat joko symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Symmetrisellä vialla (*symmetrical faults*) on samanlainen vaikutus kaikkiin vaiheisiin. Symmetrisessä viassa esiintyy vain verkon myötäimpedanssi. Tämän vuoksi symmetristen vikojen analysointi ja laskeminen on helpompaa yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Epäsymmetriset viat (*unsymmetrical faults*) vaikuttavat eri tavalla eri vaiheissa. Epäsymmetristen vikojen laskennassa täytyy ottaa huomioon myös verkon vasta- ja nollaimpedanssit. (Elovaara & Haarla 2011, 167.)

3.2.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihetta kytkeytyvät yhteen. Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa lähes kaikissa tilanteissa suuriman oikosulkuvirran. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika. Koska symmetrisen vian tarkastelu on helpompaa ja kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa todennäköisimmin suuriman oikosulkuvirran, se on oikosulktarkastelujen perustapaus. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea, kun tiedetään sähköverkon komponenttien oikosulkuimpedanssit. (Elovaara & Haarla 2011, 170.)

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3} voidaan laskea Theveninin yhtälöstä:

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \quad (2)$$

missä c on jännitekerroin, U_n on pääjännite ja Z_1 on verkon myötäimpedanssi. (ABB 200, 2.)

3.2.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisessa oikosulussa kolmivaihejärjestelmän kaksi vaihetta kytkeytyy yhteen. Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} voidaan laskea Theveninin yhtälöstä:

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad (3)$$

missä c on jännitekerroin, U_n on pääjännite, Z_1 on verkon myötäimpedanssi ja Z_2 on verkon vastaimpedanssi. (ABB 2000, 2.)

3.2.3 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheinen oikosulku eli maasulku on vikatilanne virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan eristysvika. Yksivaiheinen oikosulku voidaan laskea yhtälöstä:

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|Z_0 + Z_1 + Z_2|} \quad (4)$$

missä Z_0 on verkon nollaimpedanssi. (ABB 2000, 3.)

Pienjänniteverkon yksivaiheinen oikosulku voidaan laskea kolmivaiheisen oikosulun arvon I_{k3} avulla, käyttämällä yhtälöä:

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

3.3 Ominaisoikosulkuteho-menetelmä

Useissa tapauksissa oikosulkuvirtoja voidaan laskea myös käyttämällä ominaisoikosulkutehoja. Ominaisoikosulkutehossa koko oikosulkuvirta ja nimellisjännite vaikuttavat yhtäaikaaisesti. Ominaisoikosulkuteho on oikosulkutehoa, joka esiintyisi tarkasteltavan komponentin jälkeen, jolleivät muut virtapiirin komponentit rajoittaisi sitä. Ominaisoikosulkuteho menetelmä on usein nopea tapa määrittää oikosulkuvirta mutta siihen sisältyy epätarkkuutta eikä se sovellu monimutkaisten verkkojen tarkasteluun. Tämä menetelmä sopii kuitenkin hyvin säteittäisten verkkojen oikosulkutehojen käsin laskentaan ja oikosulkuvirtojen suuruuden arviointiin. Oikosulkuvirta voidaan laskea ominaisoikosulkutehosta yhtälöllä:

$$I_k = \frac{c \cdot S_k}{\sqrt{3} U_N} \quad (6)$$

missä c on jännitekerroin, U_n on pääjännite ja S_k on ominaisoikosulkuteho. (Hietalahti 2013, 270, Huotari & Partanen 1998, 8.)

3.4 Oikosulkusuureet

Oikosulkuvirran arvo ja käyttäytyminen, on seurausta vikatyypin lisäksi suuresti myös oikosulun syntyhetkestä.

Alkuoikosulkuvirta I''_k on vian alkuhetkellä esiintyvä symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo (Hietalahti 2013, 267). Alkuoikosulkuvirtaa ei voida erityisemmin käyttää oikosulku mitoitukseen, mutta sen avulla voidaan laskea muita oikosulkusuureita (Huotari & Partanen 1998, 23). Alkuoikosulkuvirta voidaan laskea Theveninin kaavan avulla, käyttäen piirin alkuimpedanssiarvoja (Huotari & Partanen 1998, 23). Alkuoikosulkuvirran vaimenemisaika on noin 0,1s (Elovaara & Haarla 2011, 175).

Sysäyoikosulkuvirta i_p esiintyy noin 10 ms kuluttua vian alkamisesta, jolloin saavutetaan suurin oikosulkuvirran hetkellisarvo (Hietalahti 2013, 267). Tämän johdosta sysäyoikosulkuvirtaa käytetään verkon komponenttien mekaaniseen mitoitukseen. (Elovaara & Haarla 2011, 174). Sysäyoikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (7)$$

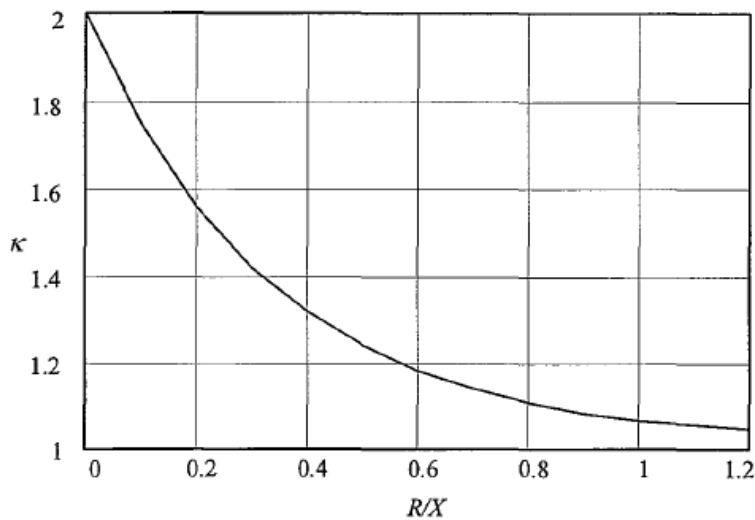
missä κ on sysäyskerroin ja I''_k on alkuoikosulkuvirta.

Sysäyskerroimen κ arvoon vaikuttaa resistanssin ja reaktanssin välinen R/X-suhde. Sysäyskerroimen arvo voidaan määrittää kaavasta: (Huotari & Partanen 1998, 24).

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (8)$$

missä R on verkon resistanssi ja X on verkon reaktanssi.

Kuvasta 2 voidaan myös määrittää sysäyskerroimen κ arvo R/X –suhteen funktiona.



KUVA 2. Sysäyskerroimen κ riippuvuus resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta (ABB 200, 8.)

Mikäli tarkkaa arvoa ei tunneta pienjännitteellä sysäyskerroimen arvo voidaan saada myös taulukosta 2 (Huotari & Partanen 1998, 24). Pienjännitteellä sysäyskerroimen κ maksimiarvo on 1,8 (Hietalahti 2013, 269).

TAULUKKO 2. Sysäyskertoimen κ arvo suhteessa oikosulkuvirran tehollisarvoon (<1000V)

I''_k/kA	κ	$\cos\varphi$
≤ 10	1,2	0,5
≤ 20	1,4	0,3
≤ 50	1,5	0,25
> 50	1,6	0,2

Muutosoikosulkuvirta I'_k on tehollisarvo oikosulun syntyhetken jälkeen ilmenevälle vaihtovirtakomponentille. Muutosoikosulkuvirran käyttäytyminen riippuu vikatyypistä. Epäsymmetrisessä viassa vaimeneminen on voimakasta, kunnes pysyvän tilan oikosulku saavutetaan. (Salminen 2008, 22.)

Muutosoikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöstä:

$$I'_k = \frac{U_v}{Z'_k + Z_f} \quad (9)$$

missä U_v on vaihdejännite, Z'_k on muutosoikosulkuimpedanssi ja Z_f on vikaimpedanssi.

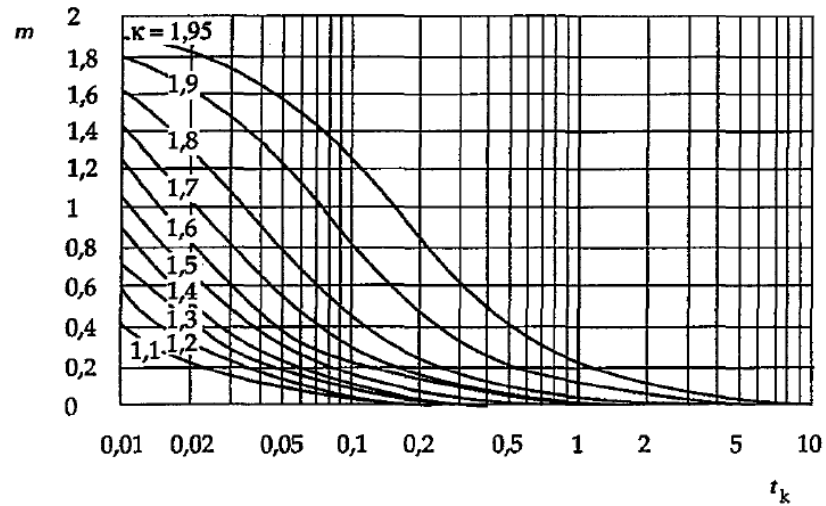
Pysyvän tilan oikosulkuvirrassa I_k alku- ja muutosoikosulkuvirrat ja tasavirtakomponentti ovat tapahtuneet tai vaimentuneet pois. Pysyvän tilan arvoa saavutetaan hyvin harvoin, sillä yleensä verkon suojaus toimii muutostilan aikana. Pysyvän tilan oikosulkuvirrasta määräytyy johtimien ja verkon muiden komponenttien lämpeneminen. (Elovaara & Haarla 2011, 175,176.)

Termisen oikosulkuvirran I_{th} avulla voidaan määrittää verkon komponenttien termisen oikosulkukestoisuus. Termisen oikosulkuvirta I_{th} lasketaan alkutilanvirran tehollisarvon avulla yhtälöstä: (Huotari & Partanen 1998, 29.)

$$I_{th} = I''_k \sqrt{(m+n)t_k} \quad (10)$$

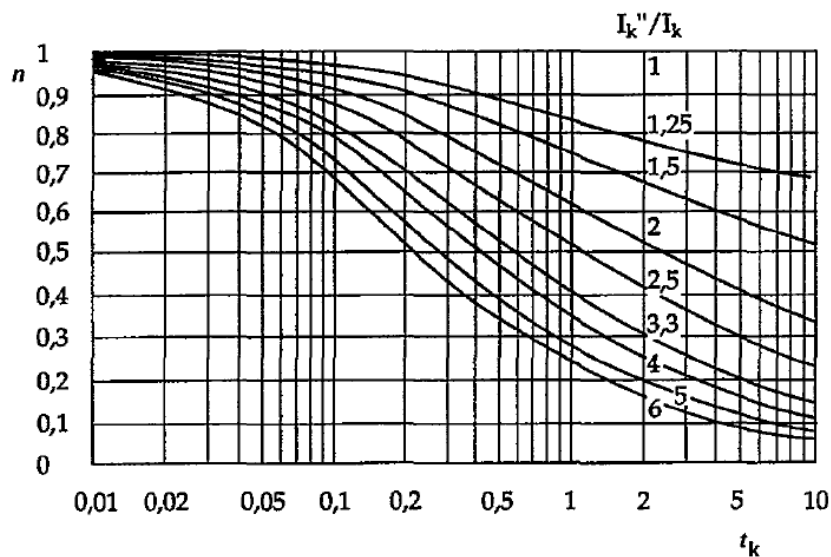
missä m on tasavirtatekijä, n on vaihtovirtatekijä ja t_k on vian kesto aika sekunteina. (ABB 200, 8.)

Tasavirtatekijän m avulla yhtälössä otetaan huomioon oikosulkuvirran tasavirtakomponentin vaimeneminen. Sen arvo määräytyy sysäyskertoimesta κ ja vian kestoajasta t_k . (Huotari & Partanen 1998, 29.)



KUVA 3. Tasavirtatekijän m riippuvuus sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k (ABB 2000, 8.)

Vaihtovirtatekijällä n avulla yhtälössä otetaan huomioon oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin vaimeneminen. Sen arvo määräytyy alkuoikosulkuvirran ja pysyvän tilan oikosulkuvirransuhteesta I_k''/I_k ja oikosulun kestoajasta t_k . (Huotari & Partanen 1998, 30.)



KUVA 4. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus I_k''/I_k suhteesta ja oikosulun kestoajasta t_k (ABB 2000, 9)

3.5 Oikosulkuimpedanssien mallintaminen

Kun käytetään Theveninin menetelmää oikosulkuvirtojen määrittämiseen, oikosulkuverkon komponenttien impedanssit täytyy mallintaa mahdollisimman tarkasti. Oikosulkuvirtaa kasvatavia komponentteja ovat syöttävä verkko ja pyörivät sähkökoneet. Verkko ja generaattorit syöttävät suurimman osa oikosulkuvirrasta, mutta varsinkin laskettaessa sysäisoikosulkuvirtaa myös tahti- ja epätahtikoneet tulee ottaa huomioon. Oikosulkuvirtaa rajoittavat muuntajien, kuristimien, johtojen, kaapelien ja kiskojen impedanssit. Tämän otsikon alla tarkastellaan näiden komponenttien impedanssien matemaattista mallintamista. (Huotari & Partanen 1998, 15.)

3.5.1 Syöttävä verkko

Syöttävästä verkosta on yleensä tiedossa alkuoikosulkuvirta I''_{kv} tai näennäinen alkuoikosulkuteho S''_{kv} . Syöttävän verkon impedanssi Z_{kv} voidaan laskea näiden avulla seuraavasti yhtälöstä:

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S''_{kv}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kv}} \quad (11)$$

missä U_n on syöttävän verkon pääjännite, S''_{kv} on näennäinen alkuoikosulkuteho, I''_{kv} on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta ja c on taulukon 1 mukainen jännitekerroin.

Yli 35 kV suurjänniteajohtoverkkosyötön impedanssi koostuu pelkästään reaktanssista jolloin $Z_{kv} = jX_{kv}$. Pienjänniteverkon oikosulkuvirtoja laskettaessa syöttävän verkon pienjännitepuolelle redusoitu reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$X_{kv} = \frac{1,1U_n^2}{S''_{kv}} \quad (12)$$

missä U_n on syöttävän verkon pääjännite, S''_{kv} on näennäinen alkuoikosulkuteho

Verkon pienjännitepuolelle redusoitu resistanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$R_{kv} = 0,1X_{kv} \quad (13)$$

missä U_n on syöttävän verkon pääjännite, X_{kv} on syöttävän verkon reaktanssi.

Pienjänniteverkon oikosulkuvirtaa laskettaessa syöttävä verkko voidaan jättää huomiotta, mikäli oikosulku tapahtuu lähellä muuntajaa ja epäyhtälö $S''_{kv} > 400S_n$ toteutuu syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkutehon S''_{kv} ja muuntajan nimellistehon S_n välillä. (Huotari & Partanen 1998, 15-16.)

3.5.2 Tahtikoneet

Valmistaja yleensä ilmoittaa tahtikoneen tärkeimmät arvot kuten resistanssin, reaktanssin ja aikavakiot. Tahtikoneen reaktanssi X voidaan myös laskea käyttämällä yhtälöä:

$$X = \frac{x}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (14)$$

jossa x on alku-, muutos- tai tahtireaktanssi prosentteina, U_n on tahtikoneen pääjännite ja S_n on tahtikoneen nimellinäennäisteho.

Kun käytetään ekvivalenttista jännitelähdettä laskettaessa alku- tai sysäysoikosulkuvirtaa Theveninin kaavojen avulla, tahtikoneen resistanssi ja reaktanssi täytyy kertoa kertoimella K_G , joka voidaan määrittää käyttäen kaavalla: (Huotari & Partanen 1998, 17.)

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nGM}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nGM}} \quad (15)$$

jossa c_{max} on taulukon 1 mukainen jännitekerroin, U_n verkon pääjännite, U_{nGM} tahtikoneen pääjännite, x_d'' on tahtikoneen suhteellinen alkureaktanssi ja φ_{nGM} on tahtikoneen nimellispisteen kulma. (ABB 2000, 8.)

3.5.3 Muuntajat

Kaksikämmimuuntajien oikosulkuimpedanssi Z_k voidaan laskea valmistajan ilmoittamista kilpiarvoista seuraavasti yhtälöllä:

$$Z_k = \frac{u_k U_n^2}{100 S_n} \quad (16)$$

missä u_k on muuntajan oikosulkujännite prosentteina, U_n on muuntajan nimellispääjännite, S_n on muuntajan nimellinäennäisteho.

Kaksikämmimuuntajien oikosulkuresistanssi R_k voidaan laskea valmistajan ilmoittamista kilpiarvoista yhtälöllä:

$$R_k = \frac{u_r U_n^2}{100 S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \quad (17)$$

missä u_r on muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina, P_{kn} on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla ja I_n on muuntajan nimellisvirta.

Kaksikämmimuuntajien oikosulkureaktanssi X_k voidaan laskea yhtälöllä:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (18)$$

missä Z_k on oikosulkuimpedanssi ja R_k on oikosulkuresistanssi. (Huotari & Partanen 1998, 18.)

3.5.4 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottorit suurentavat symmetrisissä vioissa alku- ja sysäysoikosulkuvirtaa ja epäsymmetrisissä myös pysyvän tilan oikosulkuvirran arvoa. Epätahtimoottorit toimivat oikosulun alkuhetkinä generaattoreina ja osallistuvat erityisesti sysäysoikosulkuvirran tuottamiseen. Taajuusmuuttaja ohjatut moottorit eivät lisää oikosulkuvirtaa. Suurjännitemoottorit voidaan mallintaa erikseen mutta pienjännitemoottorit kannattaa esittää muuntopiirikohtaisilla ekvivalentti-

moottoreilla. Mikäli käynnissä olevien moottorien teho on alle 25 % syöttävien muuntajien tehosta, moottorien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon. Epätahtimoottoreiden oikosulkuimpedanssi Z_m voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (19)$$

missä I_s on moottorin käynnistysvirta, I_n on moottorin nimellisvirta, U_n on moottorin nimellispännite ja S_n on moottorin nimellinäennäisteho.

Impedanssi voidaan jakaa resistanssiksi ja reaktanssiksi käyttämällä taulukkoa 3. (Huotari & Partanen 1998, 19; Hietalahti 2013, 269.)

TAULUKKO 3. Epätahtimoottoreiden R_m/X_m ja X_m/Z_m suhteet. P_n on moottorin nimellispäätöteho ja p on moottorin napapapariluku.

U_n/kV	$P_n/p/MW$	R_m/X_m	X_m/Z_m
≥ 1	≥ 1	0,10	0,995
≥ 1	< 1	0,15	0,989
< 1	kaikki	0,42	0,922

3.5.5 Kaapelit, johdot ja kiskot

Kaapelin impedanssi arvo voidaan laskea valmistajan ilmoittamista resistanssi- ja reaktanssiarvoista. Kaapelin impedanssi Z_j voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z_j = (r + jx)l \quad (20)$$

jossa r on kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohti, x on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti ja l on kaapelin pituus.

Avojohtojen impedanssi voidaan laskea tapauskohtaisesti kaapeleiden tavoin. Kiskostot ovat suhteellisen lyhyitä ja niiden impedanssia ei tarvitse ottaa huomioon. (Huotari & Partanen 1998, 20-21.)

3.6 Oikosulkulujuus ja oikosulkuvoimat

Värähtelevät oikosulkuvoimat ovat oikosulkuvirtojen aiheuttamia mekaanisia voimia ja ne saattavat aiheuttaa rasitusta kiskostoihin ja niiden tukirakenteisiin. Seurauksena oikosulkuvoimista voi olla myös kiskoston metallin väsymisilmiö. Mikäli kiskoston ominaistaajuus on lähellä 100 Hz arvoa, kiskostossa voi syntyä ikäviä ääni-ilmiöitä. Oikosulkulujuuden ja oikosulkuvoimien laskentakaavoja tarkastellaan tarkemmin lähteessä. (Elovaara & Laiho 1988, 239-245.)

4 TEOLLISUUSSÄHKÖVERKKO

Teollisuuslaitosten sähköverkkoon liityntätyyppi riippuu hyvin pitkälti laitoksen koosta. Suuret laitokset liittyvät suoraan 110 kV siirtoverkkoon ja pienemmät laitokset 20 kV jakeluverkkoon. Laitoksen koko vaikuttaa myös tehtaan pienjännitejakeluun. Suuremmissa tehtaissa joissa on paljon suuria sähkömoottoreita, moottorilähdöt on toteutettu 690 V jännitteellä. Teollisuuslaitoksissa keskijännitteellä käytetään yleensä säteittäistä sähkönjakeluverkkoa, jolla voidaan rajoittaa oikosulkuvirtoja sekä suojauksen järjestäminen on helpompaa. Säteittäisen verkostorakenteen eduiksi katsotaan myös verkon selkeä rakenne sekä sen yksinkertainen käytettävyys. (Hietalahti 2013, 125.)

Teollisuusverkon pienjännitejakelu voidaan jakaa kolmen erin päätyypin mukaan. Niitä ovat keskitetty jakelu, porrastettu jakelu ja hajautettu jakelu. Keskitetyssä jakelussa oikosulkukestävyys tulee olla hyvä, koska sen kaikki moottorilähdöt on keskitetty pääkeskuksiin. Keskitetyssä jakelussa kojeistot voivat sijaita yhdessä sähkötilassa sekä sen rakenne on helppo tehdä. Pääsääntöiset ongelmat keskitetyssä jakelussa ovat suuret oikosulkuvirrat ja häiriöiden ulottuminen keskusten syöttämälle prosessin osalle. Porrastetussa järjestelmässä porrastus voidaan toteuttaa pääkeskus-alakeskus jakelujärjestelmällä. Järjestelmän avulla voidaan tehdä komponenttien mitoitus pienempien virtojen mukaan, koska se mahdollistaa oikosulkuvirtojen rajoittamisen alakeskuksissa. Hajautetussa jakelussa sähkönjakelu toteutetaan tehdasmuuntamoilla. Sähkökäyttöjen ohjauslaitteet sijoitetaan moottorien läheisyyteen ja ohjaukseen käytetään kenttäväyläohjausta. (Hietalahti 2013, 125-126.)

4.1 Teollisuuskeskukset

Sähkökeskukset ovat yleensä lämpimään ja lukittavaan sisätilaan asennettavia sähkönjakelutai haaroituspisteitä. Teollisuudessa keskuksia käytetään moottorien ohjaus- ja käynnistyslaitteiden sijoittamisessa sähkötiloihin sekä automaatiojärjestelmien ohjauskaappeina. Sähkökeskukset sijoitetaan yleensä lukittaviin tiloihin, mikä takaa sen, että keskuksia pääsevät käsittelemään vain sähköalan ammattihenkilöt. Sähkötilat ovat paloturvallisia, joten tulipalon leviämisen

riskiä ei ole. Tilat on myös suojattu pölyltä sekä osittain kosteudelta. Keskuksset tuottavat lämpöä, joten sähkötiloihin suositellaan koneellista ilmastointia ja jäähdytyslaitteita. (Mäkinen & Kallio 2004, 108.)

Keskuksien rakenteilta edellytetään aina tiettyä suojausluokkaa, joka suojaa sähköiskulta. Tarkan valmistusmateriaalin sekä kotelointi- ja suojausluokan määrittävät tilan ominaisuudet. Oikean koteloinnin avulla suojataan keskuksen sisältö kosketukselta, vierailta esineiltä, pölyltä sekä vedeltä. Keskuksien valmistusmateriaaleina käytetään metalleja ja muoveja. Henkilösuojaus suojauksessa on tärkeää, että keskus kestää vikatilanteessa syntyvän valokaaren aiheuttamat lämpö- ja painevaikutukset. (Mäkinen & Kallio 2004, 108.)

4.2 Jakelumuuntajat

Tähän työhön liittyvät jakelumuuntajat voidaan jakaa kolmeen ryhmään, hermeettisiin, paisuntasäiliöisiin ja kuivamuuntajiin. Hermeettiset jakelumuuntajat ovat itsejäähdytteisiä ja öljyeristeisiä. Muuntajat soveltuvat sisä- ja ulkotila-asennukseen. Hermeettinen jakelumuuntajassa ei ole paisuntasäiliötä. Öljyn lämpölaajeneminen tapahtuu muuntajasäiliön joustavissa jäähdytysaalloissa. Hermeettiset muuntajat ovat yleensä hieman matalampia, kuin paisuntasäiliöiset muuntajat. Yleensä perinteinen öljyeristeinen muuntaja on varustettu paisuntasäiliöllä, koska muuntajaöljyn tilavuus vaihtelee lämpötilan muutoksien seurauksena. Kuivamuuntajassa jäähdytys tapahtuu hyödyntämällä luonnollista ilmavirtausta ja siinä ei ole lainkaan öljyä. (Aura & Tonteri 2005, 284-285.)

Kolmivaihemuuntajan vaihekäämit voidaan kytkeä joko tähteen, kolmioon tai hakatähteen. Yläjännitepuolella kytkentä merkitään isolla kirjaimella ja alajännitepuolella pienellä kirjaimella. Kolmiokytkentä merkitään yläjännitepuolella kirjaimella D ja alajännitepuolella kirjaimella d. Tähteenkytkennässä yläjännitepuolella käytetään kirjainta Y ja alajännitepuolella y. Tunnusluvun avulla ilmaistaan ensiö- ja toisiojännitteiden vaihekulmaerot. Kytkennän tunnusluku kertoo mitä numeroa kellotaulussa toisiojänniteosoitin osoittaa, kun vastaava ensiöjänniteosoitin osoittaa numeroa 12 eli 0. Kytkentä Dy11 tarkoittaa, että yläjännitepuoli on kytketty kolmioon ja alajännitepuoli tähteen. Lisäksi toisiojännite on 30 astetta ensiöpuolta jäljessä. (Aura & Tonteri 2005, 282.)

Tunnusluku	Kytkentä	Osoitinkuvat		Kytkennät	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

KUVA 5. Kolmivaiheisten muuntajien kytkennät (Aura & Tonteri 2005, 281.)

4.3 Kaapelit

Teollisuudessa käytetään hyvin erilaisia kaapeleita riippuen kaapelin käyttötarkoituksesta. Teollisuusverkon eri keskusten välissä olevat pienjännitteiset voima-asennuskaapelit ovat yleensä pituudeltaan suhteellisen lyhyitä mutta kuljettavat paljon tehoa. Tämän vuoksi niiden poikkipinta-ala täytyy mitoittaa riittävän suureksi. Käytettävät johdinmateriaalit ovat kupari ja alumiini. Vaikka pienemmät kaapelit ovat yleensä kuparia, sähköjohdossa on siirrytty käyttämään enemmän alumiinijohtimia. Syynä alumiinijohtimien käytölle isommilla poikkipinta-aloilla on edullisemmat kustannukset, suurempi kuormitettavuus ja kevyempi kaapelinpaino. Yleensä nousujohtokaapelit ovat PEN-tyyppisiä, jolloin nolla ja maa on yhdistetty samaan johtimeen. PEN-johdin voi kulkea omana eristettynä johtimenaan vaiheiden kanssa tai kaapeli voi olla konsentrinen, jolloin eristetyt vaihejohtimet kulkevat kuparin sisällä. Eristemateriaalina pienjännite voimakaapeleissa käytetään joko PVC tai PEX muovia. Pitkät kaapelietäisyydet aiheuttavat jännitteenalenemaa kaapelin toisessa päässä. (Mäkinen & Kallio 2004, 52-60.)

5 SÄHKÖVERKON LASKENTA-OHJELMA ABB DOC

ABBDOC on ABB konsernin valmistama ilmainen sähköverkon laskentaohjelma. Ohjelma mahdollistaa pien- ja keskijänniteverkkojen yksiviivaisen mallintamisen ja verkon eri arvojen laskemisen. Ohjelma mahdollistaa oikosulkuvirtojen laskennan lisäksi myös selektiivisyys- ja kuormitettavuuslaskelmat. Koska ohjelma käyttää vain ABB:n valmistamia komponentteja, selektiivisyys- ja kuormitettavuuslaskelmat jätettiin pois tarkastelulta. Työssä keskityttiin laskemaan pienjännitekeskusten oikosulkuvirtoja. ABB DOC mahdollistaa eri standardien käytön laskelmissa. Tässä työssä käytimme oikosulkuvirtojen laskemiseen Suomessa käytössä olevaa kansainvälistä standardia IEC 60909-1. Kaapeleiden mitoittamiseen käytimme kansainvälistä standardia IEC 60364. (ABB DOC, 6.)

Vaikka ohjelmasta olisi uudempiaakin versioita, työssä käytettiin ABB DOC-ohjelman versiota 2.0, koska sen käyttäminen oli helpompaa ja saimme yhdenmukaiset tulokset. Ohjelma on alun perin italiansuomalainen, mutta on nykyään käännetty useille kielille. Käytimme lähtökohtaisesti englanninkielistä versiota, mutta välillä mukaan tuli myös suomen- ja italiansuomalaisia sivuja ja termejä.

Ohjelman käyttö ei ollut alkuun mitenkään helppoa, vaan vaati paljon perehtymistä ja harjoittelua. Monet asiat ja komennot toimivat hyvin eri tavalla kuin muissa suunnitteluohjelmissa. Ensimmäinen haaste oli saada alkuarvot kohdalleen. Myös oikeiden tai mahdollisimman hyvin korvaavien objektien valinta oli välillä haastavaa. Kun kaikki oli piirretty valmiiksi, tulikin haastetta laskennan kanssa. Ohjelman avuksi on laadittu 181 sivuinen ohjekirja, josta löytyi useaan ongelmaan tarvittava vastaus.

Kun oikosulkuvirtoja aletaan laskemaan, täytyy aluksi määrittää kyseisen verkon lähtötiedot. Tässä vaiheessa voidaan määrittää, halutaanko laskea pelkästään pienjänniteverkkoa vai myös keskijänniteverkkoa. Myös saarekekäytön laskenta on mahdollista. Työssä käytimme keskijännitejakelua vaihtoehtona, joka mahdollisti sähköverkon tarkemman tarkastelun. Tällöin lähtötiedoiksi merkittiin keskijännitteen nimellisjännite ja oikosulkuvirta. Koska meillä oli tiedossa keskijännitepuolen jännite ja oikosulkuvirta, laskeminen oli helpompaa, kun mukaan kuvattiin myös muuntajan yläjännitepuoli. Lähtötiedoissa valitaan myös laskennassa käytettävät standardit ja alajännitepuolen jännite ja jakelutyyppi. (ABB DOC, 12-22.)

KUVA 6. Laitoksen yleisten ominaisuuksien määrittely

Kun lähtötiedot on määritetty, mallinnetaan laskettava sähköverkko ohjelmaan kaikkine komponentteineen. Tässä työssä yleisimmät komponentit olivat muuntajat, varokkeet, kytkimet ja kaapelit. Jokaiselle näille pyrittiin löytämään oikeanlaiset arvot. Kun komponentit on määritetty ne kannattaa lukita, jolloin ohjelma ei optimoi niitä. Jotta laskenta onnistuu, laskettavalle verkolle täytyy myös määrittää kuormitusta. Kuorma voidaan määrittää joko nimellisvirran tai pätötehon avulla. Kondensaattoripariston avulla verkkoon voidaan mallintaa myös loistehoa. Sen jälkeen voidaan verkolle suorittaa oikosulkuvirtojen laskenta. (ABB DOC, 12-22.)

Komponenttien arvot voitiin määrittellä, valitsemalla kyseinen komponentti ja antamalla kysytyt arvot. Muuntajalle annetaan muuntajan kilpitietojen mukaiset arvot tehosta ja kytkennöistä. Varokkeille ja kytkimille annetaan tieto niiden sulakekoosta. Kaapeleista määritellään kaapelin

pituus, johtimien lukumäärä. Lisäksi voidaan valita kaapelin eristystyyppi PVC:n ja XLPE:n välillä. Kaapelin johdin materiaalissa vaihtoehtoina ovat kupari- tai alumiinijohdin. (ABB DOC, 12-22.)

Syötön ominaisuudet

Yleinen kuormitus (-L8) | PJ-erotin (-QS22) | PJ-kaapeli (-WC9) | PJ-erotin (-QS21)

Käyttäjä

I_b 350.0 [A] LLL 400 [V]
 $\cos\phi$ 0.80 TN-S 50 [Hz]

Ympäristön lämpötila 30 [°C]
 Maksimi dV% sallittu [%]
 Kaapeli, jossa kaksoiseristys
 Kojeiston sisällä

Kaapelin määrittely Virtakisko

Pituus 35 [m]
 Monta johdinta
 PVC Cu

Asennustapa
 Yläpuolinen
 Tukikiinnikkeissä
 Etäisyys >= 1 kaapelin halkaisija 32

Vaihe 2 x 120 [mm²]
 PE 1 x 70 [mm²]

I_z 552 [A]
 k_t 1.00
 dV 0.46 [%]

Muut tulokset
 Muuntokertoimet
 Oikosulkuvirrat

Symboli <oletus> Lisäasetukset >>>

OK Peruuta

KUVA 7. Kaapelien määrittely

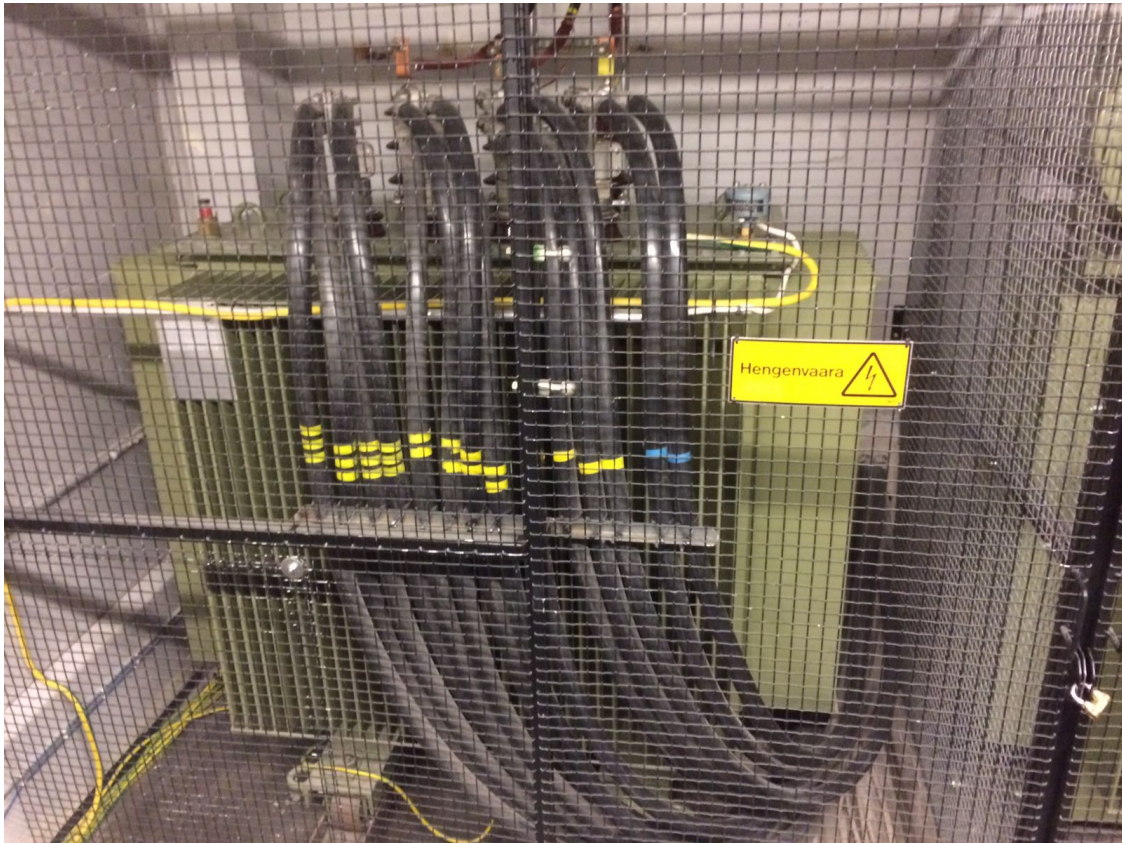
6 VALION HAAPAVEDEN TEHTAAN KESKUSTEN OIKOSULKUVIRTOJEN LASKENTA

Valio Oy:n Haapaveden tehdas sijaitsee Haapaveden keskustan läheisyydessä, Kynttilänkaan teollisuusalueella. Tehtaan sähkönsyöttö tapahtuu noin puolen kilometrin päässä sijaitsevalta 110/20 kV Elenia Oy:n Haapaveden sähköasemalta. Sähköasemalla on kaksi 110/20 kV päämuuntajaa, joista PM1 teho on 25 MVA ja PM2 teho on 16 MVA. Pääsyöttö Valiolle on sähköaseman lähtö J08 Pohjolan Maito. Valion varasyöttö on tarvittaessa kytkettävissä J07 Teollisuusalue lähtöön. Molemmat syötöt on kaapeloitu AHXAMK-W 3x185+35 -keskijännitekaapelilla. (Haapala 2016.)

Tehtaan sähkönjakelu on jaettu kahteen 20 kV keskijännitekojeistoon. Pääsyöttö J08 Pohjolan Maito tulee Kylmäkeskuksen keskijännitekojeistolle. Varasyöttö J07 Teollisuusalue tulee Lämpökeskuksen keskijännitekojeistolle. Keskijännitekojeistot on yhdistetty yhdellä AHXAMK-W 3x185+35 -keskijännitekaapelilla. Sähkönjakelu on jaettu viiteen eri muuntopiitiin. Muuntajat M1 ja M2 sijaitsevat lämpökeskuksen muuntamotilassa. Ensimmäinen muuntaja M1 on ABB:n valmistama 1600 kVA:n öljyjäähdytteinen 20/0.4 kV muuntaja. Muuntaja M1 syöttää pääkeskusta PK1. Muuntajan M1 vieressä sijaitsee muuntaja M2. Myös muuntaja M2 on ABB:n valmistama 2000 kVA:n 20/0.4 kV muuntaja. Muuntaja M2 on hermeettisesti suljettu muuntaja.

Kylmäkeskuksen muuntamotilassa sijaitsevat muuntajat M4 ja M5. Nämä muuntajat on yhdistetty kiskosillalla pääkeskuksiin PK4 ja PK5. Muuntamo M3 sijaitsee jauheosaston muuntamotilassa. Muuntajaa M3 syötetään kylmäkeskuksen keskijännitekojeistosta AHXAMK-W 3x70+35 -keskijännitekaapelilla. Muuntaja M3 on ABB:n valmistama 2000 kVA:n 20/0.4 kV muuntaja. Muuntajat M4 ja M5 ovat italialaisen TMC Transformersin valmistamia 1600 kVA:n kuivamuuntajia.

Tehtaassa on myös omia dieselmoottorigeneraattoreita varavoimakoneina, jolla voidaan tuottaa sähköä. Muuntajan M1 pääkeskuksesta PK1 on varayhteys muuntajan M2 pääkeskukseen PK II. Sekä muuntaja M4 että M5 voivat syöttää kylmälaitteiden pääkeskusta 4RK1. Tässä työssä laskettiin vain normaalin käyttötilanteen oikosulkuvirrat.



KUVA 8. ABB:n valmistama 2000 kVA:n kolmivaihemuuntaja M2

6.1 Laskentaan tarvittavien tietojen kerääminen

Laskelmia varten tehtaalta täytyi kerätä eri lähtötietoja. Laskentaan tarvittavia tietoja olivat keskusten välisten etäisyyksien mittaaminen, ympäristön lämpötila ja kaapeleiden asennustapa. Nämä tiedot täytyi selvittää tehtaalla paikan päällä. Keskusten välisten etäisyyksien mittaamisen ensimmäinen vaihe oli taulukoida mitattavat kohteet. Valion toimittamasta nousujohtokaaviosta katsottiin, mitkä keskusten väliset nousujohtokaapelit täytyy mitata. Tämän jälkeen kaikki mitattavat kohteet taulukoitiin Excel-tilukkolaskentaohjelmaan. Mittaukset aloitettiin johdonmukaisesti ensimmäisestä muuntopiiristä. Mittausvälineinä käytettiin perinteisen rullamitan lisäksi lasermittalaitetta, jolla on erittäin nopea selvittää pidemmätkin etäisyydet tarkasti. Työn tilaaja ilmoitti laskennassa käytettävän ympäristön lämpötilan sekä työn tilaajan kanssa sovittiin laskennassa käytettävän kaapeleiden asennustavan. Keskijännitekaapelin etäisyys sähköasemalta Valion tehtaallaan keskijännitekojeistoon arvioitiin Elenian Trimble NIS -ohjelmasta. Saimme syöttökaapelin arvioiduksi mitaksi 635 m.

Tehtaan nousujohtokaaviosta saatiin paljon tarvittavaa tietoa laskentaa varten. Nousujohtokaaviosta selviää mallinnettavan muuntopiirin verkon rakenne, joka voidaan mallintaa laskentaohjelmaan lähes sellaisenaan. Siitä ilmenee myös suojaavien kytkinlähtöjen ja sulakkeiden tyyppi ja koko. Lisäksi siitä selviää kaapelien koko ja materiaali. Tarvittavat muuntajien tiedot saatiin muuntajakilvistä ja nousujohtokuvista.

6.2 Oikosulkuvirtojen laskenta käyttäen ABB DOC -laskentaohjelmaa

Oikosulkuvirtojen laskenta tehtiin muuntopiiri kohtaisesti ABB DOC -laskentaohjelmalla. Laskennassa jätettiin huomiotta normaalikäytön ulkopuolella olevat varavoimakeskukset ja muun muassa mittauskeskukset. Myöskään ulkona olevia katujakokaappeja ei laskettu mukaan tarkasteluun. Myös toimistotilojen ja ruokalan sähkökeskukset jätettiin pois tarkastelusta ja keskityttiin vain tuotannon keskusten oikosulkuvirtoihin. Työssä ei myöskään laskettu eri vikatilanteiden tai muuten normaalista käyttötilanteesta poikkeavia oikosulkuvirtoja. Laskelmissa jätettiin huomiotta myös kuormitettavuus- ja selektiivisyyslaskelmat. Ryhmät joita suojaavan sulakkeen koko oli pienempi kuin 80 A jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Saimme tehtävänannon Valion Haapaveden tehtaan sähkötöiden johtaja Ville Haapalalta vuoden 2015 syksyllä. Varsinainen työ aloitettiin syksyn aikana edellä kerrotulla tietojen keräämisellä. Pääosin tähän sisältyi keskusten välisten kaapelien mitoitus tehtaalla. Samaan aikaan aloitettiin myös muuntopiirien mallintaminen ohjelmaan. Eniten tekemistä oli muuntopiireissä M1 ja M2, jotka olivat selvästi laajimmat ja monimutkaisimmat. Aloitimme niiden mallintamisella ja kaikki muuntopiirit saatiin mallinnettua vuoden 2016 tammikuussa. Laskelmia pääsimme aloittamaan, kun kaikki kaapelimitat saatiin koottua kevään 2016 aikana. Välipalautus työn toimeksiantajalle tehtiin kesällä 2016. Elokuussa 2016 saimme palautteen ja korjausta vaativat työn osa-alueet. Työ palautettiin tilaajalle marraskuussa 2016.

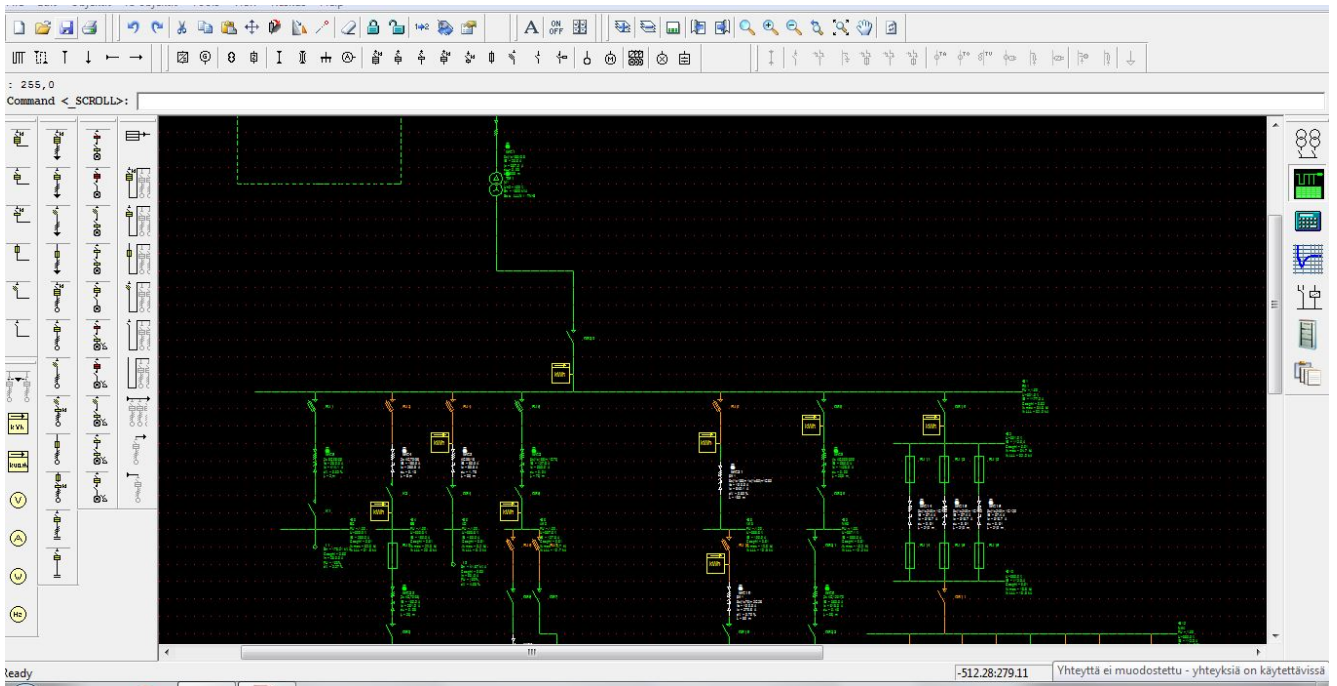
Aluksi yritimme rajata laskelmat pelkästään verkon pienjännitepuolelle. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, koska meillä ei ollut tarkkoja tietoja pienjännitepuolen lähtötiedoista. Työn tilaaja toimitti kuvia ja kaavioita, joista kävi selville verkkoyhtiön ilmoittama keskijännitepuolen oikosulkuvirta. Tästä oikosulkuvirrasta olisi voinut redusoida pienjännitepuolen oikosulkuvirran arvon. Päätimme kuitenkin työelämäohjaajan suosituksesta, ottaa tarkasteluun mukaan myös keskijännitepuolen.

Keskijännitepuolelle mallinnettiin keskijännitekaapelit, erotin ja maadoituserotin. Tämän jälkeen ohjelmaan mallinnettiin kyseisen muuntopiirin muuntaja. Muuntajien ylä- ja alapuolenjännitteet olivat kaikissa muuntajissa samat, kuten myös pienjännitepuolen jakelutapa. Muuttuva määriteltävä arvo oli muuntajan nimellisteho. Muuntajan nimellisteho vaikuttaa laskennassa käytettäviin arvoihin. Laskentaohjelmassa on myös verkon optimointi toiminto, joka pyrkii säättämään verkon komponentit oikean kokoseksi. Tämä aiheutti alussa ongelmia, koska ohjelma muutti oikein määritelyjä komponentteja usein pienemmäksi. Jos esimerkiksi muuntajaa ei ollut lukittu, laskennan yhteydessä ohjelma optimoi sen jopa puolet pienemmäksi. Optimointi pystyttiin estämään lukitsemalla objektit.

Muuntajan jälkeen mallinnettiin pääkeskuksen syöttökaapeli tai kiskosilta ja pääkeskuksen pääkytkin nousujohtokaaviossa esitettyjen arvojen mukaisesti. Lähdöt pääkeskuksilta olivat joko kytkinvarokelähtöjä tai varokelähtöjä. Vaikkei työssä tarkasteltu suojausta ja suojaksen selektiivisyyttä, näitä tarkasteluja ei voi ottaa pois päältä ohjelmassa. Nämä aiheuttivat paljon virheilmoituksia ja vaikeuttivat sulakkeiden oikeaa määrittelyä. Muuntopiirissä M3 oli lisäksi katkaisija, joka määritettiin mukaan laskelmiin.

Kaapeleiden määrittelyssä vaikeutta aiheutti poikkipinnaltaan suuret kaapelit, ja kaapelit, joilla oli toteutettu rinnakkaissyöttöjä. Pienjännitekaapeleiden eristyksenä käytettiin PVC vaihtoehtoa. Nousujohtokaaviosta saatiin kaapelin materiaali, tyyppi ja poikkipinta-ala, jotka voitiin määrittää laskentaohjelmaan. Lisäksi kaapeleille määritettiin asennustapa, vierekkäisten kaapelien lukumäärä ja ympäristön lämpötila.

Lisäksi työn tilaajan kanssa sovittiin, että kuormitus mallinnetaan nimellisvirran avulla. Nimellisvirran arvoksi asetetaan 90% kuormitettavaa keskusta edeltävän suojaavan sulakkeen arvosta. Moottorien vaikutus huomioitiin asettamalla $\cos\varphi$ arvoksi 0.8. Moottoreista suoraan mallinnettiin ainoastaan neljä suurta moottoria, joita syötetään muuntajilla M4 ja M5.



KUVA 9. Muuntopiiri M1 mallinnettuna ABB DOC –ohjelmalla

7 LASKENNAN TULOKSET

Oikosulkuvirrat laskettiin ABB DOC -laskentaohjelmalla. Alla on taulukoituna laskentaohjelmasta saadut kaikkien muuntopiirien keskusten laskennalliset kolmivaiheiset (LLL) pysyvän tilan- ja sysäysoikosulkuvirta sekä yksivaiheinen (LPE) pysyvän tilan oikosulkuvirta. Tarkemmat työstä tuloksena saadut lasketut oikosulkuvirrat ovat tämän työn lopussa liitteinä. Laskennan tulosten tarkempi tarkastelu ja analysointi ei kuulunut tämän työn piiriin.

TAULUKKO 4. Muuntopiirin M1 tuloksia

Keskuksen tunnus	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LPE (kA)
KJ	2.78	6.9	0.40
PK1	32.03	72.0	34.77
AD	3.24	4.7	1.04
AK0	10.72	17.4	4.67
AK0.1	7.60	11.4	3.41
AK	8.78	13.3	3.45
AK2	6.04	8.8	2.56
BB	29.28	55.2	25.21
BB4	20.63	31.6	10.51
BG	31.59	69.3	33.34
KC1-2	7.40	10.7	1.51
NK4	15.55	24.5	7.88
NK5	19.22	32.7	10.30
RK01	13.46	20.5	6.25
RK02	11.13	16.4	4.53
RK04	13.29	20.2	6.13
RK06	10.45	15.7	4.69
RK07	16.12	25.9	7.03
RK10	8.35	12.1	3.23
RK51	1.66	2.4	0.65
RK416	13.11	19.8	5.93
VK3	13.46	20.4	2.43

Tulokset muuntopiirissä M1 näyttävät pääosin olevan oikein. Keskusten PK1 ja BG tuloksia täytyisi tarkastella tarkemmin, koska on hyvin epätodennäköistä, että yksivaiheinen oikosulkuvirta olisi suurempi kuin ovat kolmivaiheinen oikosulkuvirta.

TAULUKKO 5. Muuntopiirin M2 tuloksia

Keskuksen tunnus	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LPE (kA)
KJ	2.78	6.9	0.48
PK II.1	36.17	82.8	33.45
PK II.2	35.06	77.7	28.80
AA1	9.09	13.2	3.40
AB	9.84	14.3	3.73
AL	20.33	32.1	11.47
AM	8.48	12.3	3.13
AN	21.43	34.8	12.83
BA	31.24	58.4	22.17
BD	25.87	43.3	15.18
K1B	3.9	5.6	1.97
K3	13.01	19.5	5.90
K4	11.07	16.4	4.5
K6	9.50	13.9	4.34
K7	8.64	12.6	3.35
K9	11.81	17.5	4.35
K11	13.59	20.8	5.94
K14	11.99	18.1	4.83
K14.1	11.54	17.3	4.58
K15	6.45	9.3	3.05
K20	6.85	9.9	1.99
KC1-1	9.15	13.3	2.74
MCC	8.61	12.6	3.11
NA	22.23	36.5	13.70
NK1	14.84	23.0	6.67

TAULUKKO 5 JATKUU

NK2	14.55	22.5	6.50
RK4.2	6.49	9.4	2.37
RK11	3.00	4.3	1.08
2RK5.1	18.84	30.2	7.21
VK2	22.93	38.2	14.31
VK5	13.93	20.9	5.13

Muuntopiirissä M2 tulokset näyttävät johdonmukaisilta ja oikeilta. Vaikka kahdessa ensimmäisessä muuntopiirissä on paljon keskuksia ja kuormitusta, ne on jaettu tasaisesti muuntopiirien ja keskusten välille. Todennäköisesti myös tämän johdosta myös sysäysoikosulkuvirran arvot pysyvät suhteellisen pieninä.

TAULUKKO 6. Muuntopiirin M3 tuloksia

Keskuksen tunnus	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LPE (kA)
KJ	2.78	6.9	0.48
PK III	33.85	69.1	26.06
PK 3.1	38.09	86.3	41.92
PK 3/1	7.15	10.3	3.63
DC1	11.89	17.3	7.12
EDMCC	18.97	31.6	11.12
GG 1	18.07	27.0	7.30
GG 47	7.47	10.8	3.30
GJ	24.54	44.7	12.85
GL	28.48	52.8	15.94
3 JK 2	32.10	62.2	23.19
NG	29.79	57.1	18.15
NG 3	22.37	39.8	16.05
NK 6	35.19	74.0	34.27
RK 3.1	20.28	33.9	12.01
RK 3.2	20.03	34.1	12.20
RK 611	30.14	55.0	19.13

Muuntopiirissä M3 pääkeskuksessa PK3.1 näyttää olevan sama ongelma kuin M1 muuntopiirin pääkeskuksessa. Yksivaiheinen pysyvän tilan oikosulkuvirta on suurempi kuin kolmivaiheinen pysyvän tilan oikosulkuvirta. Myös tätä olisi syytä tarkastella uudelleen. Muuten laskennan tulokset näyttävät järkevilä

TAULUKKO 7. Muuntopiirin M4 tuloksia

Keskuksen tunnus	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LPE (kA)
KJ	2.78	6.9	0.37
PK4	41.48	92.7	41.66
4RK1	38.62	92.7	35.61
4RK2	21.42	39.7	7.59

TAULUKKO 8. Muuntopiirin M5 tuloksia

Keskuksen tunnus	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LPE (kA)
KJ	2.78	6.9	0.38
PK5	40.53	92.1	41.01
4RK1	38.07	92.1	35.69
5RK1	30.76	60.0	16.00

Muuntopiireissä M4 ja M5 on suurimmat sysäysoikosulkuvirrat. Molempien pääkeskuksissa yksivaiheinen pysyvän tilan oikosulkuvirta vaikuttaa liian suurelta. Mielenkiintoista olisi tutkia oikosulkuvirtoja silloin kuin molempia piirejä syötetään kiskosillan kautta vain yhdellä muuntajalla.

8 YHTEENVETO

Työ oli hyvin laaja-alainen ja sopivan haastava. Työssä pääsimme perehtymään syvällisesti Valion tehtaan sähköverkkoon. Tämä auttoi meitä ymmärtämään pienenkin teollisuuslaitoksen sähkönjakelun kokonaiskuvaa entistä tarkemmin. Lisäksi oikosulkulaskelmien laatiminen vaati syvällisempää perehtymistä oikosulkulaskujen teoriaan, mitä koulussa oli aiemmin esitetty. Oikosulkutilanteita täytyy huomioida kaikissa sähköverkon osissa, olipa kyse sitten siirtoverkosta, jakeluverkosta, teollisuuslaitoksesta tai asuinkiinteistöstä. Varmasti perehtymisestä oikosulkuvirtojen laskentaan ja sen teoriaan, tulee olemaan hyötyä myös työelämässä, riippumatta työtehtävästä sähköalalla.

Tekemistä opinnäytetyössä oli molemmille riittävästi. Yhteistyö toimi hyvin niin meidän työntekijöiden välillä, kuin myös meidän ja työn ohjaajien välillä. Vaikka tämä opinnäytetyö oli ajallisesti pitkä projekti, se ei koskaan tuntunut ylivoimaiselta. Suuri apu tässä oli se että teimme työn parityönä. Kun joku työvaihe ei tahtonut onnistua, istuttiin alas ja tutkittiin asiaa yhdessä. Ja kun tarvitsimme apua työn ohjaajilta, saimme sitä.

Voimme todeta, että työn tavoite saavutettiin, koska tehtaan eri muuntopiirien keskuksille saatiin laskettua oikosulkuvirrat. Parannettavaa jäi kuitenkin runsaasti. Tietotaito ja tarkempi ymmärrys oikosulkuvirtalaskujen teoriasta karttui työn aikana. Ei olisi ollut pahitteeksi heti työn alussa tutustua perusteellisemmin oikosulkuvirtojen laskennan teoriaan. Siitä olisi ollut paljon apua työn edetessä, ja monet hidasteet ja esteet olisi voitu välttää. Laskenta ohjelma ei ollut kaikkein paras eikä helppokäyttöisin varsinkaan alussa. Yksi puute laskelmissa on se, että emme saaneet laskettua ohjelmalla alkuoikosulkuvirtojen arvoja emmekä termisten oikosulkuvirtojen arvoja. Lisäksi olisi voinut olla parempi mallintaa tarkemmin kuormat kaikkiin keskuksiin ja mallintaa moottoreita ekvivalenttisilla moottoreilla, pikemminkin kuin tehokertoimen avulla. Tämänkaltainen laajempi ja tarkempi tarkastelu voisi antaa vieläkin paremmat laskentatulokset.

Työstä saaduille tuloksille voisi edelleen tehdä jatkotutkimuksia. Mallinnuksen voisi tehdä jollakin toisella laskentaohjelmalla ja tutkia tulosten eroavaisuuksia. Kuten tuloksissa todettiin,

muutamissa keskuksissa laskelmissa ilmeni outoja arvoja yksivaiheiselle pysyvän tilan oikosulkuvirralle. Tätä voitaisiin tutkia mittaamalla näiden keskusten yksivaiheiset oikosulkuvirrat ja sitten vertaamalla laskettuja ja mitattuja arvoja toisiinsa.

Tämä opinnäytetyö projekti oli kaiken kaikkiaan hyvin opettava ja mielenkiintoinen. Toivomme että työn tilaaja pystyy hyödyntämään tässä työssä saatuja tuloksia, edelleen kehittäessään teollisuuslaitoksen sähkönjakelua.

LÄHTEET

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Luku 7 Oikosulkusuojaus. Vaasa. Suomalaiset ABB-yhtiöt.

ABB DOC. ABB. DOC User Manual. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/.../DOC_UserManual_EN_SLD.pdf. Luettu 5.4.2017

Aura, L. & Tonteri, A. 2005. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki. WSOY. ISBN 951-0-21385-3.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki University Press. Otatieto. ISBN 978-951-672-360-3.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet.

Haapala, V. 2016. Valion sähköverkko. Sähköposti. 31.1.2016.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere. Tammertekniikka. ISBN 978-952-5491-77-7.

Huotari, K. & Partanen, K. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. ISBN 951-764-282-2.

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Www-dokumentti Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf>. Luettu 21.3.2017.

Mäkinen, M. & Kallio, R. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Helsinki: Otavan kirjapaino Oy. ISBN 951-1-18089-4

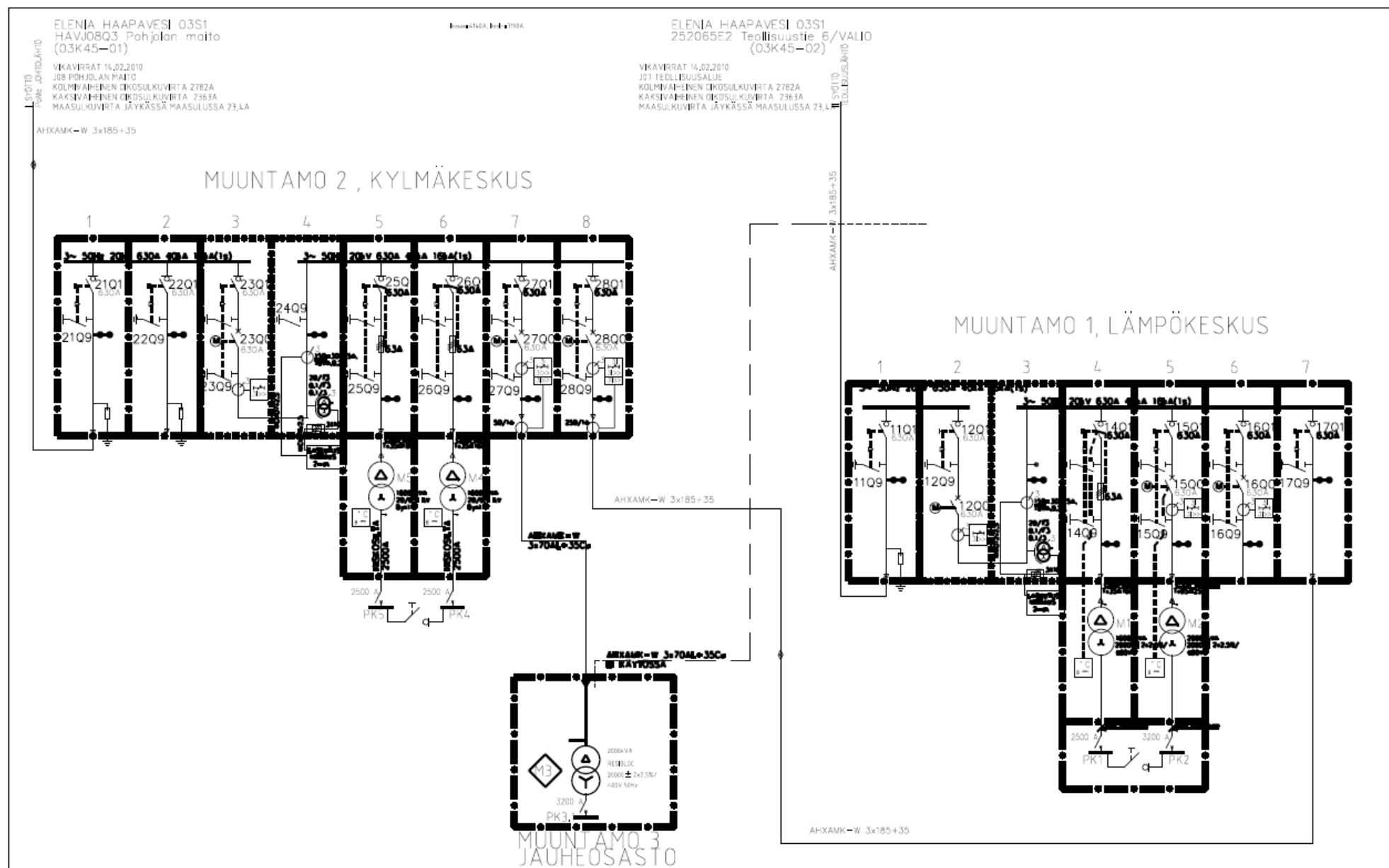
Salminen, P. 2008. Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Valio Oy. 2016a. Valio Oy yritystieto. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.valio.fi/yritys/yritystieto/>. Luettu 7.3.2017.

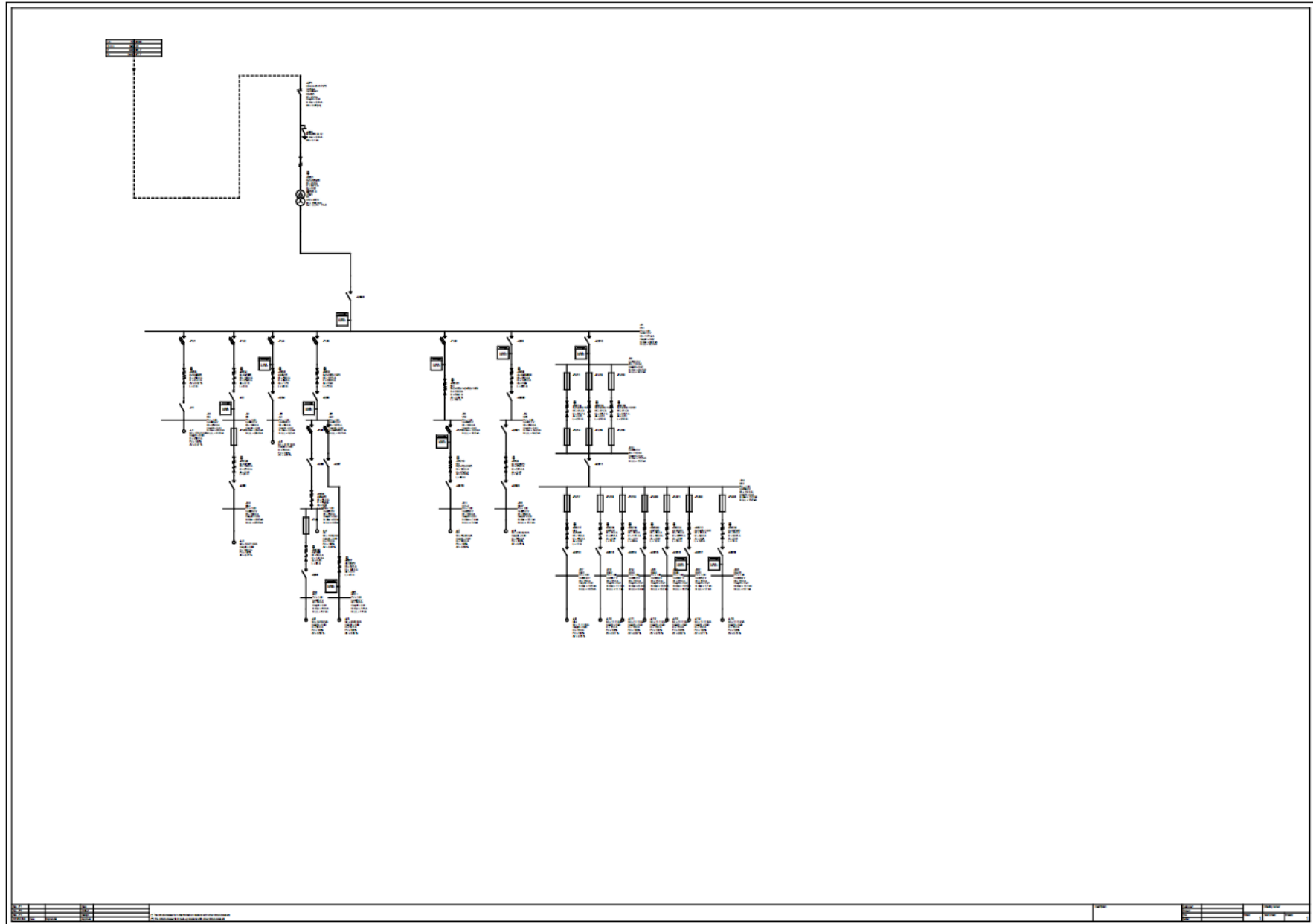
Valio Oy. 2016b. Hallituksen toimintakertomus ja tilinpäätös 2015. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.valio.fi/mediafiles/19b6ab4e-3899-4555-99c5-f9b367ec6387>. Luettu 21.3.2017.

Liiteluettelo

LIITE 1	20 kV kaavio
LIITE 2	Muuntopiirin M1 laskelmat
LIITE 3	Muuntopiirin M2 laskelmat
LIITE 4	Muuntopiirin M3 laskelmat
LIITE 5	Muuntopiirin M4 laskelmat
LIITE 6	Muuntopiirin M5 laskemat
LIITE 7	Keskusten väliset etäisyydet



<p>Customer: Project:</p>	<p>Valio Oy Haapaveden tehdas Sähkökeskusten oikosulkuvirtojen laskeminen</p>																										
<p>Notes:</p>	<p>M1</p>																										
<p>Designed by:</p>	<p>Samuel Ojalehto Jyri Ainasoja Opinnäytetyö 2016</p>																										
<table border="1"> <tr> <td>Rev. n°1</td> <td></td> <td></td> <td>Date:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°2</td> <td></td> <td></td> <td>Drawn:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°3</td> <td></td> <td></td> <td>Design:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISIONS</td> <td>Date:</td> <td>Signatures</td> <td>Approval:</td> <td></td> </tr> </table>	Rev. n°1			Date:		Rev. n°2			Drawn:		Rev. n°3			Design:		REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		<table border="1"> <tr> <td>Calculated by:</td> <td>DOC</td> </tr> <tr> <td>File name:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Record #:</td> <td></td> </tr> </table>	Calculated by:	DOC	File name:		Record #:	
Rev. n°1			Date:																								
Rev. n°2			Drawn:																								
Rev. n°3			Design:																								
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:																								
Calculated by:	DOC																										
File name:																											
Record #:																											



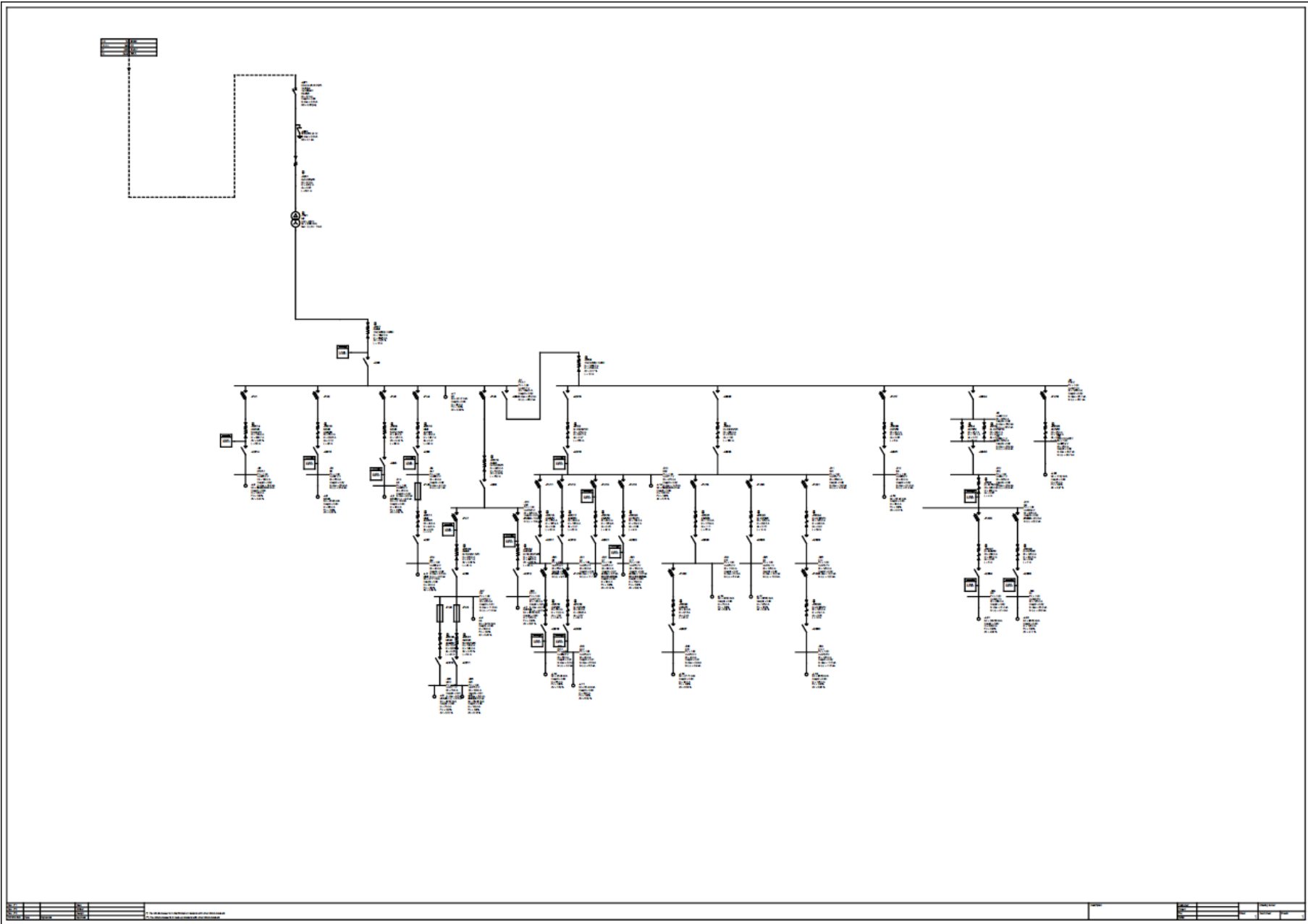
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Short circuit calculation								
Board	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LL (kA)	Ip LL (kA)	Ik LN (kA)	Ip LN (kA)	Ik LPE (kA)	Ip LPE (kA)
+Q1								
VK3	13.46	20.4	11.66	17.6	2.43	3.7	2.43	3.7
RK07	16.12	25.9	13.96	22.4			7.03	11.3
NK5	19.22	32.7	16.65	28.3			10.30	17.5
NK4	15.55	24.5	13.46	21.3			7.88	12.4
RK01	13.46	20.5	11.65	17.8			6.25	9.5
RK02	11.13	16.4	9.64	14.2			4.53	6.7
RK10	8.95	12.1	7.23	10.5			3.23	4.7
RK04	13.29	20.2	11.51	17.5			6.13	9.3
RK06	10.45	15.7	9.05	13.6			4.69	7.0
BG	31.59	69.3	27.36	60.1	33.34	73.2	33.34	73.2
RK51	1.66	2.4	1.44	2.1			0.65	0.9
RK416	13.11	19.8	11.35	17.1			5.93	8.9
BB4	20.83	31.6	17.87	27.3			10.51	16.1
BB	29.28	55.2	25.35	47.8			25.21	47.5
AD	3.24	4.7	2.80	4.0			1.04	1.5
AK0	10.72	17.4	9.29	15.1			4.67	7.6
AK	8.78	13.3	7.61	11.5			3.45	5.2
AK2	6.04	8.8	5.23	7.6			2.56	3.7
+Q9 AK0.1	7.80	11.4	6.58	9.9			3.41	5.1
PK1	32.03	72.0	27.74	62.4	34.77	78.2	34.77	78.2
KC1-2	7.40	10.7	6.41	9.3	1.83	2.7	1.51	2.2
KJ	2.78	6.9	2.41	5.9	0.40	1.0	0.40	1.0

Rev. n°1			Date:		Description M1	Customer:		Drawing number:		
Rev. n°2			Drawn:			Project:		Sheet:	Next sheet:	Sheets:
Rev. n°3			Design:			File:		1		1
REVISIONS	Date:	Signatures	Approve:			Serial:				

<p>Customer:</p> <p>Project:</p>	<p>Valio Oy Haapaveden tehdas</p> <p>Sähkökeskusten oikosulkuvirtojen laskeminen</p>																										
<p>Notes:</p>	<p>M2</p>																										
<p>Designed by:</p>	<p>Samuel Ojalehto</p> <p>Jyri Ainasoja</p> <p>Opinnäytetyö 2016</p>																										
<table border="1"> <tr> <td>Rev. #1</td> <td></td> <td></td> <td>Date:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. #2</td> <td></td> <td></td> <td>Created:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. #3</td> <td></td> <td></td> <td>Design:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISIONS</td> <td>Date:</td> <td>Signatures</td> <td>Approval:</td> <td></td> </tr> </table>	Rev. #1			Date:		Rev. #2			Created:		Rev. #3			Design:		REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		<table border="1"> <tr> <td>Calculated by:</td> <td>DOC</td> </tr> <tr> <td>File name:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Record #:</td> <td></td> </tr> </table>	Calculated by:	DOC	File name:		Record #:	
Rev. #1			Date:																								
Rev. #2			Created:																								
Rev. #3			Design:																								
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:																								
Calculated by:	DOC																										
File name:																											
Record #:																											

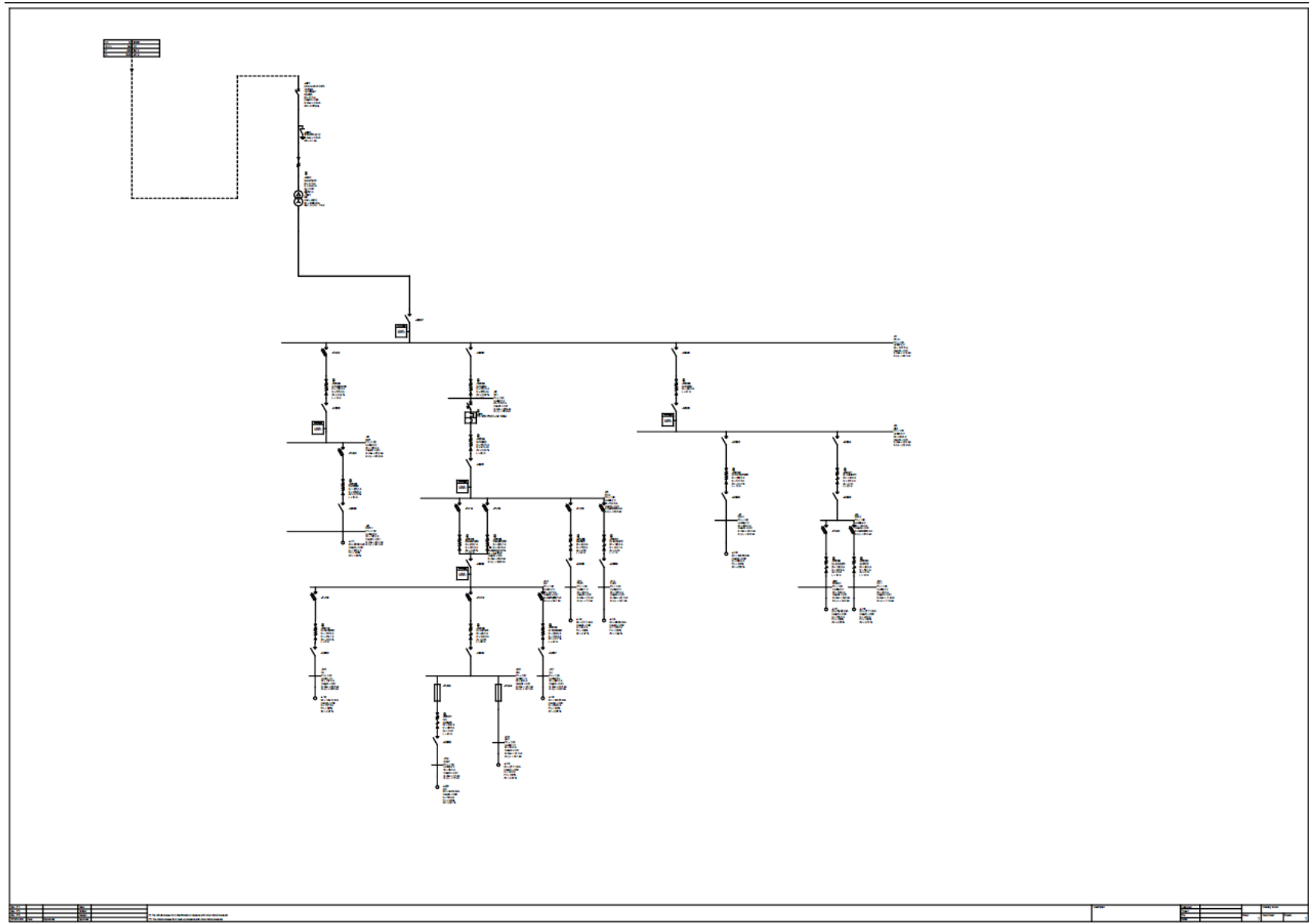


Short circuit calculation

Board	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LL (kA)	Ip LL (kA)	Ik LN (kA)	Ip LN (kA)	Ik LPE (kA)	Ip LPE (kA)
PK II.1	36.17	82.8	31.33	71.7	33.45	76.6	33.45	76.6
KJ	2.78	6.9	2.41	5.9	0.48	1.2	0.48	1.2
KC1-1	9.15	13.3	7.92	11.6	4.38	6.4		4.0
BD	25.87	43.3	22.40	37.5			15.18	25.4
2RK5.1	18.84	30.2	16.31	26.1	11.71	18.8	7.21	11.5
RK11	3.00	4.3	2.80	3.7			1.08	1.6
RK4.2	6.49	9.4	5.62	8.1			2.37	3.4
K8	9.50	13.9	8.23	12.0			4.34	6.4
K4	11.07	16.4	9.58	14.2			4.50	6.7
NK2	14.55	22.5	12.60	19.4			6.50	10.0
PK II.2	35.06	77.7	30.36	67.3	28.80	63.8	28.80	63.8
K7	8.64	12.6	7.48	10.9			3.35	4.9
K11	13.59	20.8	11.77	18.0			5.94	9.1
K15	6.45	9.3	5.58	8.1			3.05	4.4
K3	13.01	19.5	11.26	16.9			5.90	8.9
NK1	14.84	23.0	12.85	19.9			6.67	10.3
K14	11.99	18.1	10.38	15.6			4.83	7.3
K14.1	11.54	17.3	9.99	15.0			4.58	6.9
BA	31.24	58.4	27.06	50.6			22.17	41.4
AB	9.84	14.3	8.52	12.4	0.25	0.4	3.73	5.4
VK2	22.93	38.2	19.86	33.0			14.31	23.8
NA	22.23	36.5	19.25	31.6			13.70	22.5
AN	21.43	34.8	18.56	30.1			12.83	20.8
AL	20.33	32.1	17.61	27.8			11.47	18.1
AM	8.48	12.3	7.34	10.6			3.13	4.5
AA1	9.09	13.2	7.87	11.4			3.40	4.9
VK5	13.93	20.9	12.07	18.1	7.95	11.9	5.13	7.7
MCC	8.61	12.6	7.45	10.9			3.11	4.5
K20	6.85	9.9	5.93	8.6	0.79	1.2	1.99	2.9
K9	11.81	17.5	10.23	15.2	0.92	1.4	4.35	6.5
K1B	3.90	5.6	3.38	4.9			1.97	2.8

Rev. n°1			Date:		Description M2	Customer:		Drawing number:	
Rev. n°2			Chief:			Project:			
Rev. n°3			Design:			File:		Sheet:	Next sheet:
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:			Send:			

<p>Customer: Valio Oy Haapaveden tehdas Project: Sähkökeskusten oikosulkuvirtojen laskeminen</p>																							
<p>Notes: M3</p>																							
<p>Designed by: Samuel Ojalehto Jyri Ainasoja Opinnäytetyö 2016</p>																							
<table border="1"> <tr> <td>Rev. n°1</td> <td></td> <td>Date:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°2</td> <td></td> <td>Drafter:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°3</td> <td></td> <td>Design:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISIONS</td> <td>Date:</td> <td>Signatures</td> <td>Approval:</td> </tr> </table>	Rev. n°1		Date:		Rev. n°2		Drafter:		Rev. n°3		Design:		REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:	<table border="1"> <tr> <td>Calculated by:</td> <td>DOC</td> </tr> <tr> <td>File name:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Record #:</td> <td></td> </tr> </table>	Calculated by:	DOC	File name:		Record #:	
Rev. n°1		Date:																					
Rev. n°2		Drafter:																					
Rev. n°3		Design:																					
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:																				
Calculated by:	DOC																						
File name:																							
Record #:																							

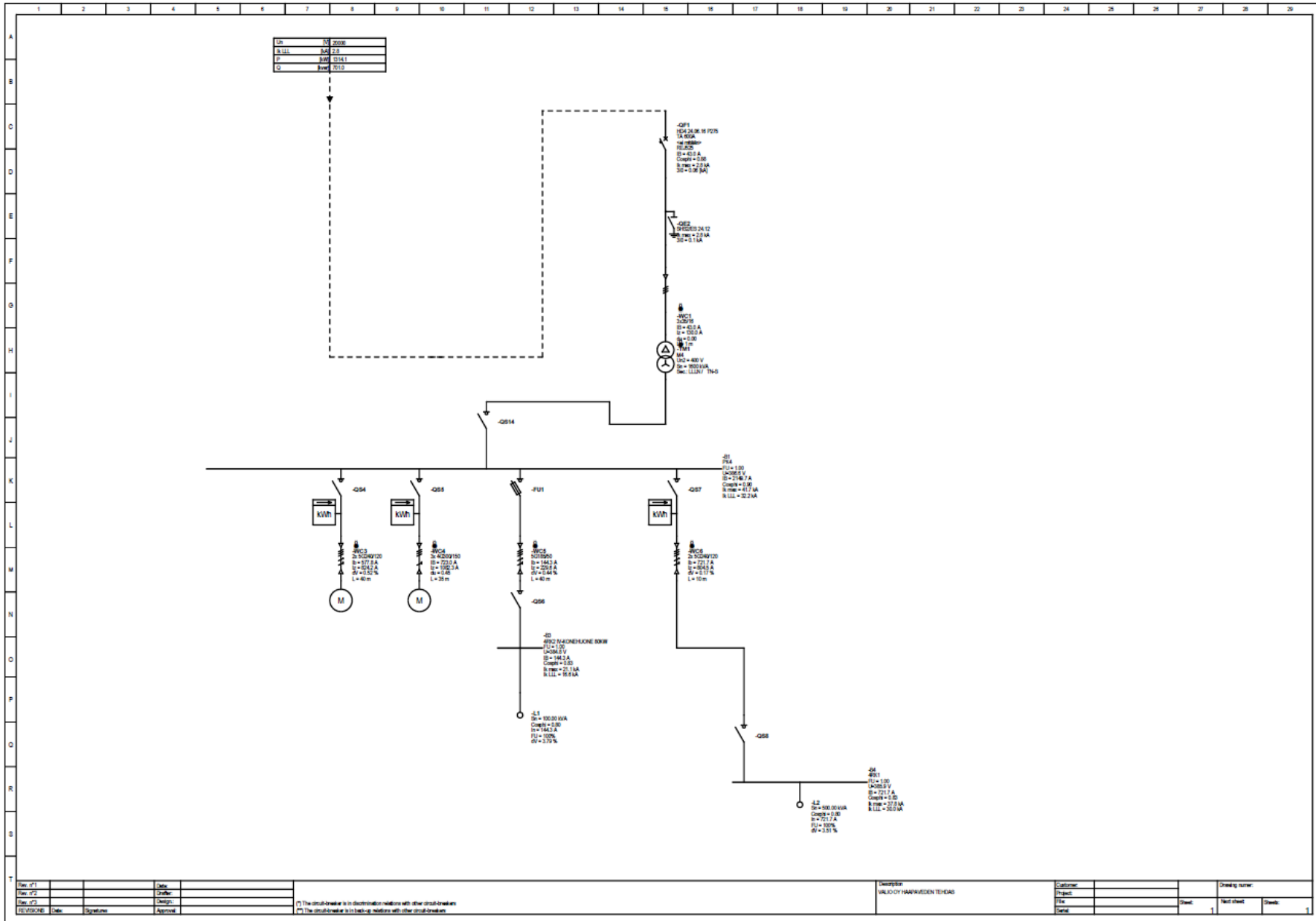


Short circuit calculation

Board	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LL (kA)	Ip LL (kA)	Ik LN (kA)	Ip LN (kA)	Ik LPE (kA)	Ip LPE (kA)
GG 1	18.07	27.0	16.65	23.4			7.30	10.9
PK 3.1	38.09	86.3	32.99	74.8	41.92	95.0	41.92	95.0
PK 3/1	7.15	10.3	6.19	8.9			3.63	5.2
3 JK 2	32.10	62.2	27.80	53.9			23.19	45.0
NG 3	22.37	39.8	19.38	34.5	16.05	28.6	16.05	28.6
RK3.1	20.28	33.9	17.56	29.4	13.22	22.1	12.01	20.1
RK 3.2	20.03	34.1	17.34	29.5			12.20	20.8
GG 47	7.47	10.8	6.47	9.3			3.30	4.8
GJ	24.54	44.7	21.25	38.7	13.39	24.4	12.85	23.4
RK 6 11	30.14	55.0	26.10	47.7	24.72	45.1	19.13	34.9
NG	29.79	57.1	25.80	49.4	19.22	36.8	18.15	34.8
NK 6	35.19	74.0	30.48	64.1	34.27	72.1	34.27	72.1
VK 1	36.93	81.1	31.98	70.2	36.62	80.4	36.62	80.4
PK III	33.85	69.1	29.31	59.8	26.06	53.2	26.06	53.2
GL	28.48	52.8	24.67	45.7	17.89	33.1	15.94	29.5
KJ	2.78	6.9	2.41	5.9	0.48	1.2	0.48	1.2
+Q612 EDMOC	18.97	31.6	16.43	27.4			11.12	18.5
+Q613 DCI	11.89	17.3	10.29	15.0			7.12	10.4

Rev. n°1		Date:		Description	Customer:			Drawing number:					
Rev. n°2		Drafter:			Project:			Sheet	Next sheet	Sheets			
Rev. n°3		Design:			File:						1		1
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		Serial:								
M3													

<p>Customer:</p> <p>Project:</p>	<p>Valio Oy Haapaveden tehdas</p> <p>Sähkökeskusten oikosulkuvirtojen laskeminen</p>																										
<p>Notes:</p>	<p>M4</p>																										
<p>Designed by:</p>	<p>Samuel Ojalehto</p> <p>Jyri Ainasoja</p> <p>Opinnäytetyö 2016</p>																										
<table border="1"> <tr> <td>Rev. n°1</td> <td></td> <td></td> <td>Date:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°2</td> <td></td> <td></td> <td>Drawn:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°3</td> <td></td> <td></td> <td>Design:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISIONS</td> <td>Date:</td> <td>Signatures</td> <td>Approval:</td> <td></td> </tr> </table>	Rev. n°1			Date:		Rev. n°2			Drawn:		Rev. n°3			Design:		REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		<table border="1"> <tr> <td>Calculated by:</td> <td>DOC</td> </tr> <tr> <td>File name:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Record #:</td> <td></td> </tr> </table>	Calculated by:	DOC	File name:		Record #:	
Rev. n°1			Date:																								
Rev. n°2			Drawn:																								
Rev. n°3			Design:																								
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:																								
Calculated by:	DOC																										
File name:																											
Record #:																											



Rev. 01		Date	
Rev. 02		Drawn	
Rev. 03		Design	
REVISION	Date	Signature	Approved

(1) The circuit-breaker is in distribution relation with other circuit-breakers.
 (2) The circuit-breaker is in back-up relation with other circuit-breakers.

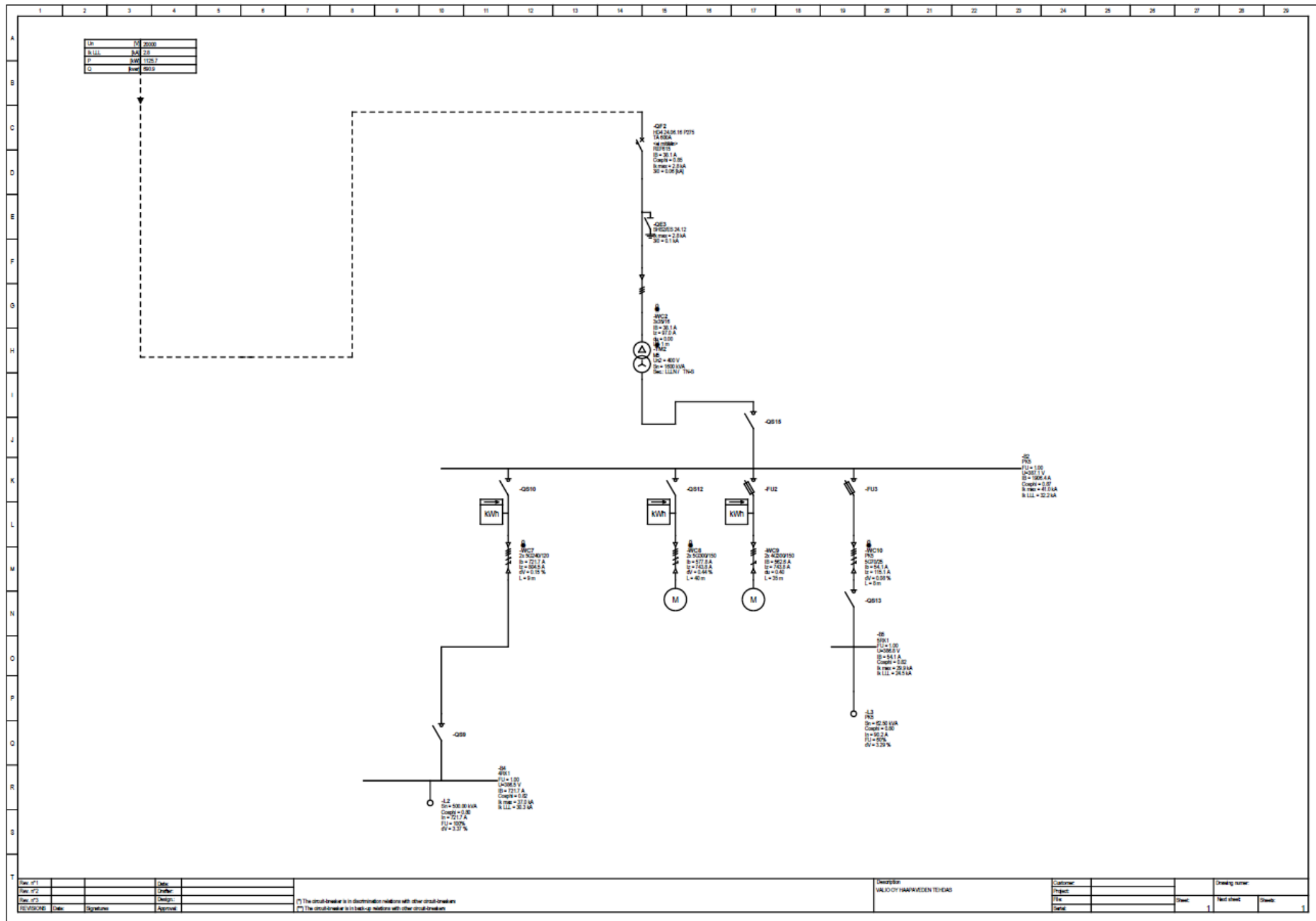
Description	VALIO OY HANNOVEDEN TEHDAS	Customer		Drawing number	
Project				Sheet	1
Date				Total sheets	1
				Sheet	1

Short circuit calculation

Board	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LL (kA)	Ip LL (kA)	Ik LN (kA)	Ip LN (kA)	Ik LPE (kA)	Ip LPE (kA)
4RK2	21.42	39.7	18.55	34.4	13.81	25.6	7.59	14.1
4RK1	38.62	92.7	33.45	80.3	38.27	87.0	35.61	85.4
KJ	2.78	6.9	2.41	5.9	0.37	0.9	0.37	0.9
PK4	41.48	92.7	35.92	80.3	41.66	93.1	41.66	93.1

Rev. n°1			Date:		Description M4	Customer:		Drawing number:		
Rev. n°2			Drafter:			Project:		Sheet:	Next sheet:	Sheets:
Rev. n°3			Design:			File:		1		
REVISIONS		Date:	Signatures	Approval:		Serial:				1

<p>Customer:</p> <p>Project:</p>	<p>Valio Oy Haapaveden tehdas</p> <p>Sähkökeskusten oikosulkuvirtojen laskeminen</p>																										
<p>Notes:</p>	<p>M5</p>																										
<p>Designed by:</p>	<p>Samuel Ojalehto</p> <p>Jyri Ainasoja</p> <p>Opinnäytetyö 2016</p>																										
<table border="1"> <tr> <td>Rev. n°1</td> <td></td> <td></td> <td>Date:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°2</td> <td></td> <td></td> <td>Drafter:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev. n°3</td> <td></td> <td></td> <td>Design:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISIONS</td> <td>Date:</td> <td>Signatures</td> <td>Approval:</td> <td></td> </tr> </table>	Rev. n°1			Date:		Rev. n°2			Drafter:		Rev. n°3			Design:		REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		<table border="1"> <tr> <td>Calculated by:</td> <td>DOC</td> </tr> <tr> <td>File name:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Record #:</td> <td></td> </tr> </table>	Calculated by:	DOC	File name:		Record #:	
Rev. n°1			Date:																								
Rev. n°2			Drafter:																								
Rev. n°3			Design:																								
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:																								
Calculated by:	DOC																										
File name:																											
Record #:																											



Rev. 01		Date:	
Rev. 02		Drawn:	
Rev. 03		Design:	
REVISIONS	Date:	Signature:	Approval:

The circuit-breaker is in distribution relation with other circuit-breakers
 The circuit-breaker is in back-up relation with other circuit-breakers

Description: VALKO OY HAAVAMÄEN TEHDAS
 Customer: _____
 Project: _____
 File: _____
 Date: _____

Drawing number	
Sheet	1
Next sheet	
Drawn	1

Short circuit calculation									
Board	Ik LLL (kA)	Ip LLL (kA)	Ik LL (kA)	Ip LL (kA)	Ik LN (kA)	Ip LN (kA)	Ik LPE (kA)	Ip LPE (kA)	
5RK1	30.76	60.0	26.64	52.0	23.43	45.7	16.00	31.2	
4RK1	38.07	92.1	32.97	79.8	36.26	87.8	35.69	86.4	
KJ	2.78	6.9	2.41	5.9	0.38	0.9	0.38	0.9	
PK5	40.53	92.1	35.10	79.8	41.01	93.2	41.01	93.2	

Rev. n°1		Date:		Description	Customer:	Drawing number:		
Rev. n°2		Drafter:		M5	Project:	Sheet	Next sheet	Sheets
Rev. n°3		Design:			File:	1		1
REVISIONS	Date:	Signatures	Approval:		Serial:			

MUUNTOPIIRI M1

Väli	ETÄISYYS
M1-PK1	5m
PK1-BG	2m
PK1-BB	8m
PK1-AD	90m
PK1-A0	75m
AK0-AK	12m
AK0-AK1	12m
AK0-AK0.1	45m
AK-AK2	35m
PK1-VK3	150m
VK3-KC1-2	80m
PK1-NK5	205m
NK5-RK07	35m
PK1-NK4	210m
NK4-RK01	11m
NK4-RK02	15m
NK4-RK10	38m
NK4-RK04	12m
NK4-RK06	50m
NK4-RK51	120m
NK4-RK416	18m

MUUNTOPIIRI M2

VÄLI	ETÄISYYS
M2-PKII.1	15m
PKII.1-PKII.2	10m
PKII.1-2RK5.1	55m
PKII.1-BE	41m
PKII.1-BD	20m
PKII.1-AB	80m
AB-AI	3m
PKII.1-KJK3	210m
PKII.1-AA1	88m
AA1-AM	4m
PKII.1-VK5	152m
VK5-K9	40m
K9-MCC	40m
K9-K20	64m
VK5-K12	40m
K12-CVMCC	5m
PKII.2-NK2	165m
NK2-K6	33m
K6-RK11	140m
NK2-K4	20m
NK2-K7	42m
NK2-K11	9m
PKII.2-NK1	160m
NK1-K1	20m
K1-K1Avv	5m
K1Avv-K1Cvv	27m
K1Avv-K19	20m
NK1-K15	76m
K15-K1B	45m
NK1-K3	14m
NK1-K14	50m
K14-K14.1	10m
PKII.2-VK2	80m
VK2-NA	4m
NA-AN	5m
NA-AL	7m

MUUNTOPIIRI M3

VÄLI	ETÄISYYS
MK3-PK3.1	16m
PK3.1-NK6	12m
NK6-RK611	10m
PK3.1-VK1	7m
VK1-PKIII	20m
PKIII-NG	22m
NG-GL	6m
NG-GK	38m
NG-GG	36m
GG-GG47	40m
GG-GG1	4m
NG-GJ	40m
pkiii-pk3/1	43m
PKIII-3JK2	7m
PK3.1-NK3	37m
NK3-RK3.1	13m
NK3-RK3.2	22m
RK3.2-EDMCC	
RK3.2-DC1	10m

MUUNTOPIIRI M4

VÄLI	ETÄISYYS
M4-PK4	12m
PK4-KJK3	40m
PK4-KK1JK4	35m
PK4-4RK2	40m
PK4-4RK1	10m

MUUNTOPIIRI M5

VÄLI	ETÄISYYS
M5-PK5	10m
PK5-4RK1	9m
PK5-KJK2	40m
PK5-KJK1	35m
PK5-5RK1	8m