

# **PROSESSITEOLLISUUSLAITOKSEN SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄN TOTEUTUKSEN TARKASTELU**

Niko Sipiläinen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2013  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan  
suuntautumisvaihtoehto

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

SIPILÄINEN, NIKO:

Prosessiteollisuuslaitoksen sähkönjakelujärjestelmän toteutuksen tarkastelu

Opinnäytetyö 63 sivua, joista liitteitä 12 sivua  
Toukokuu 2013

---

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin Yhdysvaltoihin sijoitetun prosessiteollisuuslaitoksen sähkönjakelujärjestelmän toteutusta. Tarkastelussa tavoiteltiin teollisuuslaitoksen kustannuksien pienentämistä. Opinnäytetyön lähtökohtana pidettiin Elomatic Oy:n hallussa olevia Yhdysvaltoihin valmistuneen teollisuuslaitoksen sähködokumenteja. Yhdysvallat on yksi IEC:n jäsenmaista, joten oikosulkulaskennan tulokset pohjautuvat IEC:n laatimiin standardeihin.

Opinnäytetyössä esitetyn teorian tarkoituksena on selventää lukijalle sähkönjakelujärjestelmän mitoittamiseen liittyviä käsitteitä. Teoriaosuudessa selvennetään laitteiston mitoittamisen periaatteita ja tuodaan esille laitteiston kustannustehokkaaseen suunniteluun vaikuttavia tekijöitä.

Taloudellisuustarkastelussa hyödynnettiin ABB:n DOC -laskentaohjelmistoa, jonka takia komponenttien kustannuksien arvioinnissa on päädytty käyttämään ABB:n tuotteita. DOC:n tekemät laskennat perustuvat IEC -standardeihin, joten ohjelman käyttö ei aiheuttanut eri standardien välistä vertailua. Teoriaosuudessa esitettyjen laskelmien tarkoituksena on selventää ja verrata oikosulkulaskentaohjelmistolla saatuja tuloksia. Tuloksien vertailulla saadaan myös käsitys DOC -laskentaohjelmiston toimivuudesta sähkönjakelujärjestelmien tarkastelussa.

Aluksi sähkönjakelujärjestelmä mitoitettiin todellisiksi arvioitujen ympäristöolosuhteiden korjauskertoimia käyttäen. Kuitenkin tarkastelun luotettavuuden saavuttamiseksi laitteistoon vaikuttavia ympäristön olosuhteita heikennettiin. Korjauskertoimien kasvattaminen nosti sähkönjakelujärjestelmän kustannuksia lähemmäksi alkuperäisen järjestelmän arvioitua kustannusta. Kustannuksia verrattaessa täytyy muistaa, että alkuperäisessä laitteistossa on otettu huomioon mahdollisuus laitteiston laajentumiselle ja lopullisten kuormien epäselvyys suunnitteluvaiheessa. Kustannusvertailut alkuperäisen sähkönjakelujärjestelmän ja uudelleen mitoitettujen järjestelmien välillä on esitetty opinnäytetyön lopussa.

---

Asiasanat: sähkönjakelujärjestelmä, oikosulku, sähkönjakelujärjestelmän mitoitus, prosessiteollisuuslaitos, ABB, DOC, laskentaohjelmisto

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

SIPIÄINEN, NIKO:  
Process industry plant research and development

Bachelor's thesis 63 pages, appendices 12 pages  
May 2013

---

The aim of this thesis was to examine the implementation of a process industry plant's electrical power supply and to identify potential decisions for getting financial savings. The process plant located in the United States, and the thesis was based on the plant's electrical documents, held by Elomatic Oy. The United States is a member of IEC standards organization and complies with its existing standards. For this reason, the results are based on IEC standards.

The purpose of the theory presented in the thesis is to clarify the electrical power distribution system dimensioning principles for the reader. The theoretical part clarifies the equipment dimensioning principles that affect the factors of the equipment's cost-effective design.

Power distribution system was analyzed using ABB DOC calculation software. For this reason, all electrical power supply devices were chosen from ABB's products. Software calculations were based on the IEC standards. By comparing the results, a perception of the software's functionality in the electrical power distribution system analysis is obtained.

At first, the electrical power supply was dimensioned by using the correction factor of the estimated environmental conditions. To get reliability to the examination, the impacts of environmental conditions on the electrical power supply were increased. Increasing the correction factors raised the system's costs closer to the original equipment cost estimate. In the comparison of the costs, the fact that in the design of original system the possibility of process expansion must be taken into account. Redimensioned system costs are presented at the end of the thesis.

---

Key words: electric power supply, short-circuit, system dimensioning, ABB, DOC, calculation software, calculation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄN NYKYTILA.....	9
2.1	Lähtökohdat .....	9
2.2	Sähkönjakelujärjestelmä .....	9
3	KOJEISTON MITOITUKSEN PERIAATE.....	11
3.1	Yhdysvaltojen sähköalan standardit .....	13
3.2	Laitoksen pienjännitekeskukset .....	14
3.3	Oikosulkusuojaus.....	15
3.3.1	Termiset ja dynaamiset vaikutukset.....	15
3.3.2	Epätahtimoottoreiden huomioiminen oikosulkutarkastelussa.....	16
3.4	Katkaisijat .....	16
3.4.1	Katkaisijan katkaisukyvyyn ilmaisevat termit .....	17
3.4.2	Katkaisijan valinta.....	18
3.4.3	Suojauksen selektiivisyys .....	19
3.5	Kaapelointi.....	19
3.6	Oikosulkuarvojen määrittäminen.....	24
3.7	Loisteho .....	28
3.7.1	Loistehon kompensointi.....	28
3.7.2	Loistehon kompensointilaitteiston määrittäminen .....	29
4	ABB DOC 2.0 .....	32
4.1	Lähtöarvojen asettelu .....	33
4.2	Muutosten vertailu .....	38
4.3	Kaapeleiden tarkastelu .....	41
4.4	Katkaisijoiden tarkastelu.....	44
4.5	Loistehon kompensointi.....	48
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	49
	LIITTEET .....	52
	Liite 1. Sähkötilan pohjapiirustus.....	52
	Liite 2. AWG –kaapeleiden muunnostaulukko .....	53
	Liite 3. Meinhart katalogi, NYCWY –kaapeli valintataulukko 1(2) .....	54
	Liite 3. Meinhart katalogi, NYCWY –kaapelin valintataulukko 2(2) .....	55
	Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio 1(8) .....	56
	Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio 2(8) .....	57
	Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio 3(8) .....	58
	Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio 4(8) .....	59
	Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio 5(8) .....	60

Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio	6(8) .....	61
Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio	7(8) .....	62
Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakelukaavio	8(8) .....	63

## LYHENTEET JA TERMIT

AWG	American Wire Gauge
CSA	Canadian Standards Association
DOC	Design Optimisation on Computer
EURO	Euroopan Unioni
IEC	International Electrotechnical Commission
NEC	National Electrical Code
PSK	Prosessiteollisuuden Standardoimiskeskus
$c$	jännitekerroin
$f$	taajuus
$I$	virta
$k$	sysäyskerroin
$l$	pituus
$n$	kerroin oikosulun kytkentä- ja katkaisukykyjen suhteille
$P$	pätöteho
$Q$	loisteho
$S$	näennäisteho
$U$	jännite
$u$	suhteellinen jännite
$Z$	impedanssi
$z$	ominais-/oikosulkuimpedanssi
$^{\circ}\text{C}$	celciusaste
$\eta$	hyötysuhde
$\varphi$	vaihesiirtokulma

### *Alaindeksit*

B	virtapiirin mitoitus
dyn	dynaaminen oikosulku
cm	mitoitussulkemiskyky
cu	äärimmäisen oikosulun mitoituskatkaisukyky

cs	käytönaikainen oikosulun mitoituskatkaisukyky
cw	lyhyt aikainen oikosulun mitoituskesto
k	oikosulku
LLL	kolmen vaiheen välinen
LL	kahden vaiheen välinen
LN	vaiheen ja nollan välinen
LPE	vaiheen ja maan välinen
n	nimellinen
min	pienin
max	suurin
W	johtimen mitoitus
%	prosentti

*Kirjaintunnukset ABB:n katkaisijoilla*

G	maasulkusuojaus
I	oikosulun pikalaukaisu
L	ylikuormitussuojaus
S	hidastettu oikosulkusuojaus
TMA	termomagneettinen rele; terminen ja magneettinen laukaisu
MP	moottorin suojaus ylikuormitus; jumisuojaus, vaihevalvonta
PR222	rele LSI tai LSIG suojauksella

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan Yhdysvaltoihin valmistetun teollisuuslaitoksen sähköjakelujärjestelmän toteutusta, Elomatic Oy:n hallussa olevien sähködokumenttien perusteella. Työ aloitettiin Yhdysvalloissa käytössä olevien sähköalan standardien selvittämällä. Tämän kautta pyrittiin selvittämään miten teollisuuslaitoksen tarkastelua voidaan tehdä. Sähköjakelujärjestelmän tarkasteluun käytettiin apuna ABB:n kehittämää DOC 2.0 -laskentaohjelmistoa. Ohjelmiston avulla pystyttiin mallintamaan laitteistoja Yhdysvaltojen jännitetasossa.

Toteutettujen prosessiteollisuuslaitoksen suunnitteluprojektien kautta saadun tietotaidon ja kokemuksen johdosta Elomatic Oy:llä on hyvä jalansija tulevien suunnitteluprojektien toteuttajana. Kuitenkin suunnittelualalla kokoajan kiristyvän kilpailun johdosta, pyritään aikaisemmin hankittua kokemusta hyödyntämään aseman ylläpitämiseksi. Opinnäytetyössä hyödynnetään yrityksen kokemusta kustannustehokkaamman järjestelmän kartoittamiseen.

Teollisuuslaitoksen sähköjakelujärjestelmän suunnittelu on käsitteenä hyvin laaja ja sisältää useita laitteiston mitoittamiseen käytettäviä standardeja. Suunnittelu alalla valitsevien sähköalan standardien tunteminen on erittäin tärkeää. Opinnäytetyössä kerrotaan laitteiston mitoittamiseen liittyviä standardeja ja perusperiaatteita ja avataan niihin liittyviä käsitteitä. Tästä opinnäytetyöstä on pyritty tekemään raportti, jonka avulla tiedon hankinta sähköjakelulaitteiston mitoittamisesta helpottuisi.

Työn tavoitteena oli kartoittaa prosessiteollisuuslaitoksen sähköjakelujärjestelmän toteutuksesta ratkaisuja joilla pystyttäisiin saavuttamaan taloudellisia säästöjä ja parantamaan laitteiston nykytilaa. Samalla selvitettiin ABB:n DOC -laskentaohjelmiston toimivuutta oikosulkulaskentaan.

## 2 SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄN NYKYTILA

### 2.1 Lähtökohdat

Ensimmäinen prosessiteollisuuslaitos on suunniteltu Keski-Eurooppaan ja seuraava Atlantin toiselle puolelle Amerikan mantereelle. Tutkimustyön lähtökohtana pidettiin Yhdysvaltoihin tehdyn laitoksen sähköpiirustuksia. Sähkönjakelujärjestelmästä vastaavan suunnittelijan kanssa käydyssä keskustelussa kävi ilmi, että ensimmäinen laitoksen jakelujärjestelmän suunnittelussa on arvioitu hyvinkin karkeasti laitteistojen koko yläkanttiin, koska lopullisen laitteiston rakenteesta ei voitu olla täysin varmoja. Huomion arvoista oli kuulla, että Yhdysvaltoihin tehty laitos on lähtökohdiltaan samanlainen, kuin Keski-Euroopan teollisuuslaitos. Opinnäytetyön tarpeellisuudesta kertoo se, että laitteisto on pysynyt lähes alkuperäisenä, joten tarkemmalle järjestelmän tarkastelulle on tarvetta.

### 2.2 Sähkönjakelujärjestelmä

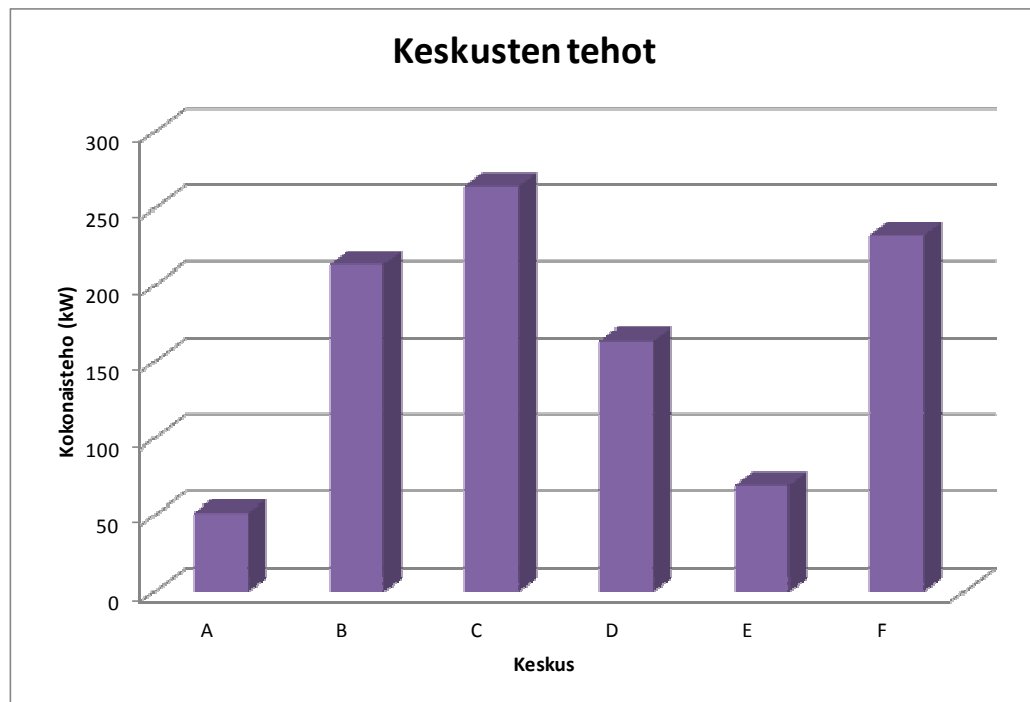
Yhdysvalloissa sähköverkon jännitetasona on 480V/277V, 60 Hz. Tehtaassa on ilmoitettu sähkötila, jossa sijaitsevat sähkönjakelu- ja alakeskukset, sekä taajuusmuuttajat. Etäisyyttä keskusten välillä on noin 20 metriä ja niiden välinen syöttö on toteutettu kaapeleilla. Sähkötilan vieressä sijaitsee 2500 kVA:n jakelumuuntaja, josta sähkön syöttö jakelukeskukselle on toteutettu virtakiskoston avulla. Opinnäytetyön liitteessä 1 on sähkötilan pohjapiirustus, joka havainnollistaa laitteiston sijoittelua.

Sähkökeskusten syöttökaavioiden kautta saatiin käsitys alakeskusten laitteistoista, sekä niiden kaapeloinneista ja suojalaitteista. Koska laitteistojen kuormista ei ollut saatavilla tarkempia tietoja kuin pätötehon määrä, päädyttiin laskemaan pelkästään keskusten laitteistojen pätötehot yhteen. Luvussa 5 DOC –laskentaohjelmistolla toteutettuun tarkasteluun on valittu oikosulkumoottori ABB:n oikosulkumoottoreiden valintataulukosta, syöttökaavioihin merkityn pätötehon perusteella. Kuormien valinnan kautta saadaan suuntaa antavat näennäistehot.

Taulukkoon 1 on laskettu jokaisen prosessikeskuksen yksittäisten laitteiden tehot yhteen, jolloin saatiin keskusten kokonaispätötehot selville. Keskuksen pätötehojen jakautumista on havainnollistettu kuviossa 1.

TAULUKKO 1. Prosessikeskusten pätötehot

Keskus	A	B	C	D	E	F
Pätöteho (kW)	51,38	213,2	264,58	163,6	69,15	232,75



KUVIO 1. Keskusten tehot

Alakeskusten pätötehojen epätasainen jakautuminen selittyy keskusten jakamisella prosessialueittain. Jokainen yksittäinen alakeskus palvelee tiettyä laitoksen prosessin osaa. Tällä tavoin pystytään ajamaan tehtaan osa-alueet hallitusti alas, jos yhteen alakeskukseen tulee mahdollinen häiriö, joka pysäyttää kaikki sen perässä olevat laitteet. Opinäytetyössä ei lähdetty jakamaan tehoja uudelleen keskusten välillä, koska tämä vaatisi laitoksen prosessin perusteellista tuntemista.

Liitteen 4 sivuilla 4-7 on esitetty alkuperäisen sähköjakelujärjestelmänperusteella DOC -laskentaohjelmalla tehty mallinnus. Piirikaaviosta nähdään sähköjakelujärjestelmän rakenne.

### 3 KOJEISTON MITOITUKSEN PERIAATE

Teollisuuslaitoksen sähkönjakelujärjestelmän mitoittamisen lähtökohtana on laitoksen tehontarve. Prosessisuunnittelu määrittelee yhdessä muiden teollisuuslaitosta suunnittelevien osastojen kanssa laitoksen prosessin tarvitsemat laitteet, joiden tehojen kautta pystytään määrittelemään teollisuuslaitoksen kokonaistehontarve. Kokonaistehon arviointiin tulee huomioida myös kiinteistön yleiset kuormat, kuten esimerkiksi laitoksen valaistukset ja mahdolliset toimistotilat. Laitoksen tehontarpeen selvittyä ryhdytään suunnittelemaan sähkönjakelujärjestelmää, jonka kautta laitoksen sähkönsyöttö tapahtuu. (Järvinen J. specialist. 2013)

Aluksi mitoitetaan tehontarpeen mukaan jakelumuuntaja, sekä sen vaatimat erotus- ja suojalaitteistot. Muuntajan sijoitus tapahtuu yleensä laitoksen sähkötilan lähetyville. Sähkötilassa sijaitsevat laitoksen sähkönjakelu, suojaus, sekä ohjauslaitteistot. Sähkötiloja voi laitoksesta riippuen olla useita ja ne palvelevat tiettyä laitoksen osa-aluetta. Muuntajalla syötetään sähköä sähkönjakelukeskukselle, jonka kautta laitoksen sähkönjakelu tapahtuu. Jakelukeskukselta syötetään alakeskuksia, sekä suurempia yksittäisiä kuormituksia, kuten suuria suoraan verkkoon kytkettyjä D.O.L (Direct On Line) käyttäjiä. Alakeskusten kautta jaetaan sähkö teollisuuslaitoksen prosessille. Yleensä alakeskukset jaetaan prosessialueittain, jolla mahdollistetaan laitteiston selektiivisen toiminta. Selektiivisen toiminnan ansiosta sähkönjakelujärjestelmän yhden alakeskuksen poiskytkytyminen vikatilanteessa pysäyttää ainoastaan yhden prosessialueen, jolloin pystytään laitoksen loput prosessialueet pysäyttämään hallitusti. Alakeskukset voivat sijaita sähkötilassa tai mahdollisesti myös prosessitiloissa. Tyypillisesti sähkökeskukset sijoitetaan sähkötilaan, koska sähkötilan paremmat ympäristöolosuhteet mahdollistavat sähkökeskusten kevytrakenteisempien laitteistoratkaisujen käytön. (Järvinen J. specialist. 2013)

Prosessisuunnittelu määrittelee yhdessä muiden teollisuuslaitosta suunnittelevien osastojen kanssa laitoksen eri osissa vallitsevat olosuhteet, kuten prosessitilojen ympäristönlämpötilan, sekä mahdolliset räjähdysvaaralliset alueet. Laitoksen ympäristön olosuhteet vaikuttavat olennaisesti laitteiston mitoittamiseen. Esimerkiksi lämpötilan noustessa korkealle PVC eristettyjen kaapeleiden kuormitettavuudet heikkenevät, jolloin joudutaan käyttämään riittävän kuormitettavuuden saavuttamiseksi suurempia kaapelin poik-

kipinta-aloja tai mahdollisesti lämmönkestäviä kaapeleita. Laitoksen olosuhteiden arvioiminen onkin syytä tehdä huolella, etteivät laitteistojen kustannukset kasva tarpeettomasti. (Järvinen J. specialist. 2013)

Sähköjakelujärjestelmän oikosulkuvirrat vaikuttavat sähköjakelulaitteiston komponenttien runkokokoihin. Mitä suuremmat oikosulkuvirrat laitteisiin vaikuttavat, sitä enemmän niiden fyysiseltä kestävyydeltä vaaditaan. Muuntajan oikosulkuvirran arvoihin vaikuttaa muuntajan teho. Muuntajan oikosulkuvirta puolestaan vaikuttavat sen syöttämän sähköjakelujärjestelmän eriosien oikosulkuvirtoihin. Oikosulkuvirtaa rajoittavat kaapelit, sulakkeet ja oikosulkuvirranrajoittimilla varustetut katkaisijat. Sähköjakelujärjestelmälle tehtävän oikosulkulaskennan kautta pyritään selvittämään oikosulkuvirtojen suuruudet eri osissa sähköjakelujärjestelmää. Oikosulkulaskentaa varten tulee olla tiedossa laitteistojen oikosulkuvirtaa rajoittavat ominaisuudet, jotka laitevalmistajat määrittelevät tarkasti erilaisten testaustapojen kautta. (Järvinen J. specialist. 2013)

Sähköjakelujärjestelmään kuuluu myös oikosulkuvirtaa kasvattavia laitteita, joista yleisin on suoraan verkkoon kytketty oikosulkumoottori. Oikosulkumoottori voi toimia mahdollisesti sähköjakelujärjestelmää kuormittavana laitteena, jolloin jakelujärjestelmän komponentteihin vaikuttavat oikosulkuvirrat kasvavat. Oikosulkulaskennalla pyritään ottamaan myös järjestelmää kuormittavien laitteiden vaikutukset huomioon. Nykypäivänä yleistyneiden taajuusmuuttajakäyttöjen yhtenä ominaisuutena on estää moottoreiden tuottamien kuormitusten kulkeutuminen sähköjakelujärjestelmään. Taajuusmuuttajien toisena etuna on myös oikosulkumoottorin tarvitseman loistehon vaikutusten rajaaminen taajuusmuuttajan ja moottorin välille. Moottorin tuottama loisteho ei kuormita muuta osaa sähköjakelujärjestelmästä jolloin loistehon kompensoinnin tarve vähenee. (Järvinen J. specialist. 2013)

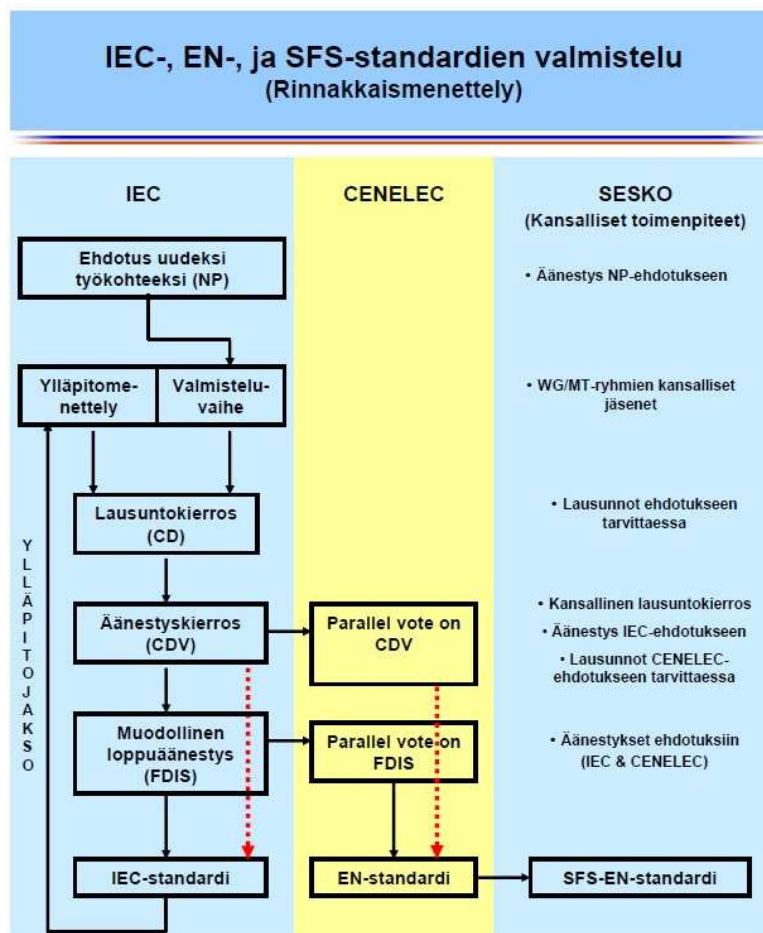
Sähköjakelujärjestelmän suunnittelussa arvioidaan myös teollisuuslaitoksen mahdollinen laajentuminen tulevaisuudessa. Mahdollisesti lisääntyvien prosessilaitteiden kuormitukset vaativat jakelujärjestelmän kapasiteetilta enemmän, jolloin alkuperäisen laitteiston mitoitus ei enää riitä tulevilla vaatimuksille. Tästä syystä onkin hyödyllistä hahmotella miten laajentumisvara huomioidaan. Vaihtoehtoina voi olla alkuperäisen laitteiston ylimitoittaminen, tai rinnakkaisen sähköjakelujärjestelmän tilantarpeen huomioiminen. Sähköjakelujärjestelmän mitoittamisessa tuleekin tehdä saumatonta yhteis-

työtä, niin laitoksen eri suunnitteluosastojen, kuin projektintilaajan kanssa. (Järvinen J. specialist. 2013)

Seuraavissa kappaleissa selostetaan sähköjakelujärjestelmän suunnitteluun ja mitoittamiseen liittyviä perusasioita. Kappaleissa pyritään tuomaan esille periaatteita joihin oppinnäytetyön edetessä on syvennytty tarkemmin.

### 3.1 Yhdysvaltojen sähköalan standardit

Yhdysvalloissa on käytössä useita eri sähköalan standardeja. Niihin kuuluvat IEC, NEC ja osittain CSA. Kansainvälisesti sähköalan standardointiorganisaationa toimii IEC (International Electrotechnical Commission). Sen 81 jäsenmaahan lukeutuu Suomen lisäksi Yhdysvallat, joten sähköjakelujärjestelmän tarkastelu perustuu IEC:n laatimiin standardeihin (Sesko, 2013). Kuvassa 1 esitetään eri standardisoimisjärjestöjen yhteistyötä kansallisten standardien laatimisessa.



KUVA 1. Standardien valmisteluprosessi (Sesko Ry 2013)

Keskusten sähköisten ominaisuuksien laskennassa käytetään IEC 60909 standardia (Short-circuit currents in three-phase a.c systems ), joka käsittelee sähkölaitteistojen oikosulkulaskentaa erilaisissa käyttötilanteissa. IEC 60909 standardin osassa 0 esitetään oikosulkulaskentaa sekä oikosulun vaikutusta eri osissa sähköverkkoa. Standardin osassa 1 käsitellään standardin ensimmäisen osaan liittyvien kertoimien määrittystä.

Pienjännitekytkinlaitteiden valinnassa on noudatettu standardin IEC 60947 (Low-voltage switchgear and controlgear). Siinä määritetään eri komponenttien valintaan liittyviä perusteita ja mitoituksia. Standardin osassa 2 määritellään katkaisijoiden valintaan liittyviä määräyksiä.

NEC (National Electrical Code) on Yhdysvalloissa käytössä oleva standardi, joka käsittelee sähkötyöturvallisuutta sähkölaitteiden asennuksissa. NEC on osa National Fire Codes –sarjaa, jonka julkaisusta vastaa NFPA (National Fire Protection Association). NEC –standardi on hyväksytty kaikissa Yhdysvaltojen 50 osavaltiossa ja standardista julkaistaan uusi versio kolmen vuoden välein (ESFI 2013).

CSA (Canadian Standards Association) on Kanadan standardisoimisjärjestö, joka laatii erialojen standardeja. CSA:n laatimat sähköalanstandardit ovat osittain käytössä Yhdysvalloissa NEC –standardien rinnalla.

### **3.2 Laitoksen pienjännitekeskukset**

Pienjännitekeskukset ovat laitteistokokonaisuuksia, joihin kuuluu sähkön kytkentä-, mittaus-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteita. Teollisuudessa pienjännitekeskukset jaetaan pää- ja alakeskuksiin. Teollisuuslaitoksen sähkönjakelu tapahtuu jakelu- ja alakeskusten kautta. Jakelukeskukselta syötetään prosessi- ja valaistuskeskuksia, sekä suurten yksittäisten moottorilähtöjen syöttöjä ja loistehon kompensointilaitteistoa.

Keskusten mitoittamiseen käytetään standardeja SFS 60439-1 Jakokeskukset sekä PSK 1801 Prosessiteollisuuden jakokeskukset. Sähkökeskusten jakelukiskosten mitoittamiseen vaikuttaa nimellisvirran lisäksi termiset ja dynaamiset oikosulkuvirrat. Pienjännitepuolen sähkökeskusten virtakiskoina käytetään alumiinista tai kuparista valmistettuja lattakiskoja.

### 3.3 Oikosulkusuojaus

Oikosululla tarkoitetaan sähköjärjestelmän sulkeutumista suoraan, valokaaren tai muun ulkoisen vikaimpedanssin kautta. Virtapiirin sulkeutumisen voi aiheuttaa esimerkiksi rikkoutunut johtimen eristys. Oikosulku voi tapahtua vaihejohtimien välille tai vaiheen ja maan välille (Lakervi & Partanen 2009, 28).

Jotta järjestelmän komponentit kestäisivät mahdollisen oikosulkuilanteen aiheuttaman normaalia virtaa suuremman vikavirran, on niiden mitoitus varten selvítettävä järjestelmän oikosulkuvirtojen suuruudet. Lisäksi on selvítettävä oikosulkuvirtaa vastaavat suurimmat sallitut kestoajat.

Oikosulunvirran suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat oikosulun tapahtumahetki ja -sijainti järjestelmässä. Kolmivaihejärjestelmien oikosulkuvirran laskemista ja sen aiheuttamia vaikutuksia on käsitelty tarkemmin standardeissa IEC-60909, 60909-1, 60909-2, 60781, 60865-1 ja 60865-2 (ABB:n TTT-käsikirja 2000 Luku 7, 1).

#### 3.3.1 Termiset ja dynaamiset vaikutukset

Sähköjärjestelmässä mahdollisesti tapahtuvan oikosulun aikana sähkölaitteiston komponentteihin kohdistuu oikosulku hetkellä termisiä ja dynaamisia rasituksia. Termisten ja dynaamisten oikosulkukestoisuuksien tarkastelussa määritetään kaikki sähköverkon osaa mahdollisesti kuormittavat lähteet. Tarkastelulla varmistetaan järjestelmään tulevien komponenttien riittävät oikosulkukestoisuudet. Tarkastelu on erityisen tärkeää rinnakkaisten moottorilähtöjen mitoituksessa, joissa mahdollisen vikatilanteen sattuessa oikosulkumoottori voi toimia generaattorina (ST Käsikirja 20 2005, 125).

Dynaamisella oikosulkuvirralla tarkoitetaan suurinta mahdollista oikosulkuvirran arvoa, joka saavutetaan oikosulkuhetkestä noin 10 ms kuluttua. Dynaaminen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla 1. (IEC 60909 2001, 101).

$$I_{\text{dyn}} = k\sqrt{2} \cdot I_k \quad (1)$$

, missä  $I_{\text{dyn}}$  on dynaaminen oikosulkuvirta

$k$  on sysäyskerroin

$I_k$  on oikosulkuvirran tehollisarvo.

Valmistajat ilmoittavat komponenteilleen termisen nimelliskestovirran, joka ilmaisee oikosulkuvirtaa, jonka kuormitusta laitteisto kestää lyhyen ajan vahingoittumattomana.

### 3.3.2 Epätahtimoottoreiden huomioiminen oikosulkutarkastelussa

Laitteistoon vaikuttavien oikosulkuvirtojen tarkastelussa tulee myös huomioida epätahtimoottoreiden vaikutus. Oikosulkutilanteessa epätahtimoottori toimii hyvin lyhyen ajan järjestelmää syöttävänä generaattorina. Kestoajat ovat yleisesti lyhyitä, mutta tilanne voi merkittävästi kasvattaa suurinta oikosulkuvirtaa (CLC/TR 50480 2011, 20).

Taajuusmuuttajat estävät moottoreiden oikosulkuhetkellä syöttämän oikosulkuvirran vaikutuksen muuhun järjestelmään. Opinnäytetyössä tutkittavan laitoksen sähkömoottoreiden ohjaukset on suurimmassa osassa toteutettu taajuusmuuttajilla, mukaan lukien laitoksen suurimmat moottorikäytöt. Opinnäytetyössä ei ole tarkasteltu oikosulkumoottoreiden vaikutuksia muuhun järjestelmään, koska työn suunnitteluvaiheessa todettiin vaikutusten olevan hyvin minimaalisia, johtuen suurelta osin taajuusmuuttajien oikosulkumoottoreiden vaikutuksia rajaavista ominaisuuksista. Taajuusmuuttajakäyttöjen mallintaminen opinnäytetyössä käytettävällä ABB:n DOC -laskentaohjelmistolla ei ole mahdollista.

## 3.4 Katkaisijat

Sulakkeettomassa suojauksessa sulake on korvattu jollain muulla suojalaitteella. Yleisin sulakkeen korvaajana käytetty suojalaite on katkaisija. Sulakesuojaukseen verrattaessa katkaisijoiden etuna on mahdollisuus säätää toiminta-aikakäyrää halutunlaiseksi, uudel-

leenkäytettävyys ja mahdollisuus katkaisijoiden kauko-ohjaukseen. Katkaisijoiden valintaan liittyviä asioita käydään lävitse standardissa IEC 60947-2 (Circuit breakers).

### 3.4.1 Katkaisijan katkaisukyvyyn ilmaisevat termit

Katkaisijan **mitoitussulkemiskyky**  $I_{cm}$  ilmoittaa virran suuruuden, jonka katkaisijan on pystyttävä sulkemaan valmistajan ilmoittamalla mitoitusjännitteellä, mitoitustaajuudella ja määrättyllä vaihtosähkön tehokertoimella tai määrättyllä tasasähkön aikavakiolla (IEC 60947-2, 2012, 8).

**Äärimmäinen oikosulun mitoituskatkaisukyky**  $I_{cu}$  ilmoittaa katkaisijan suurimman oikosulkuvirran arvon, jonka katkaisija kykenee katkaisemaan ilman vaurioitumista. Tasasähköpiireissä mitoitussulkemiskyky tulee olla vähintään äärimmäisen oikosulun mitoituskatkaisukyvyyn verran. Vaihtosähkölaitteissa mitoitussulkemiskyky määräytyy kaavan 2 mukaan. (IEC 60947-2, 2012, 8).

$$I_{cm} = n \cdot I_{cu} \quad (2)$$

,missä  $I_{cm}$  on katkaisijan mitoitussulkemiskyky

$n$  on kerroin taulukosta 2

$I_{cu}$  on äärimmäinen oikosulun mitoituskatkaisukyky

TAULUKKO 2. Kertoimet oikosulun kytkentä- ja katkaisukykyjen suhteille  $n$  sekä tehokertoimelle (IEC 60947-2 2012, 9)

Oikosulun katkaisukyky $I$ (kA)	Tehokerroin	Vaadittu minimiarvo suhteelle $n$ $n = \frac{\text{oikosulun kytkentäkyky}}{\text{oikosulun katkaisukyky}}$
$4,5 \leq I \leq 6$	0,7	1,5
$6 < I \leq 10$	0,5	1,7
$10 < I \leq 20$	0,3	2,0
$20 < I \leq 50$	0,25	2,1
$50 < I$	0,2	2,2

**Käytönaikainen oikosulun mitoituskatkaisukyky  $I_{cs}$**  ilmoittaa oikosulkuvirranarvoa, jonka jatkuvaa kuormitusta katkaisija kestää (Saarela 2011, 23).

**Lyhytaikainen mitoituskestovirta  $I_{cw}$**  ilmaisee katkaisijan termistä oikosulkuvirran kestävyyttä. Standardissa IEC 60947-2 määrätään kestoisuuden testauksen ajaksi 0,05 - 0,1 - 0,25 - 0,5 - 1 s.

TAULUKKO 3. Lyhytaikaisen mitoituskestovirran minimiarvot (IEC 60947-2 2012, 10)

Mitotusvirta $I_n$ (A)	Lyhytaikainen mitoituskestovirta $I_{cw}$ (kA)
$I_n \leq 2500$	$12 \times I_n$ tai 5 (suurempi arvo valitaan)
$I_n > 2500$	30

### 3.4.2 Katkaisijan valinta

Katkaisijan valintaan vaikuttaa olennaisesti järjestelmän käyttöjännite. Mitä suurempi käyttöjännite on, sitä pienempi on katkaisijan katkaisukyky. Tästä syystä katkaisijoiden valmistajan on ilmoitettava tarkasti katkaisijan katkaisukyvyt eri käyttöjännitteille. Katkaisukyvyllä tarkoitetaan oikosulkuvirran arvoa, jonka katkaisija kykenee katkaistaan. IEC standardissa 60947-2 on määritelty katkaisijan toiminta-arvoja ja testaustavat, joiden mukaan katkaisijat testataan.

Katkaisijan valintaa tehdessä standardissa SFS 6000-5-533.3 kerrotaan, että suurimman oikosulkuvirran katkaisuun valitaan suojalaite sen äärimmäisen oikosulkuvirran katkaisuvyyn perusteella. Kuitenkin standardi suosittelee liittymispisteissä, ja käyttötarkoituksen mukaan muuallakin, valitsemaan suojalaite käytönaikaisen oikosulun katkaisuvyyn perusteella. ST –kortissa 53.45 standardista on tehty yhteenveto, jossa neuvotaan valitsemaan ilmakatkaisijat käytönaikaisen oikosulun mitoituskatkaisuvyyn ( $I_{cs}$ ) perusteella ja kompaktikatkaisijat taas äärimmäisen oikosulun mitoituskatkaisuvyyn ( $I_{cu}$ ) perusteella (ST-kortti 53.45 2004, 5).

### 3.4.3 Suojauksen selektiivisyys

Sähköjärjestelmän selektiivisellä mitoittamisella pyritään rajaamaan vika mahdollisimman pienelle alueelle. Suojalaitteiden epäselektiivinen mitoittaminen voi aiheuttaa vikatilanteessa suojausten laukeamisen turhan suurelta alueelta tai pahimmassa tapauksessa suojauksen toimimattomuuden.

Katkaisijoilla toteutetuissa asennuksissa selektiivisyys toteutetaan katkaisijoiden ylivirtasuojareleiden asettelulla. Peräkkäisten sulakkeitten mitoituksessa suositellaan pitämään vähintään yhden sulakekoon väli. Nimellisvirtojen suhteen tulee olla 1,6:1 (ST-kortti 53.13 2008, 4). Katkaisijoilla on kaksi selektiivisyysluokkaa A ja B. Kun halutaan toteuttaa katkaisijoiden selektiivinen toiminta oikosulun tapahtuessa, valitaan luokan B katkaisijat, joiden toiminta-aikaviivettä pystytään säätämään. Luokan A katkaisijoissa ei ole lyhytaikaisen mitoituskestovirran arvoa, joten sitä ei ole suunniteltu toimimaan selektiivisesti oikosulun aikana.

## 3.5 Kaapelointi

Teollisuuslaitoksen kaapelointi oli toteutettu AWG (American Wire Gauge) mitoituksella. AWG ja EURO kaapeleiden johdinpoikkipinta-alat poikkeavat toisistaan huomattavasti, joten tulosten tarkastelun helpottamiseksi päätettiin alkuperäinen kaapelointi muuttaa kokonaan eurokaapelimitoitukseen. Muutokset on tehty vertailutaulukoiden avulla, joiden avulla valitaan AWG poikkipinnalle pykälää isompi EURO poikkipinta-ala.

Esimerkiksi AWG 14 kaapelille valitaan taulukon 4 mukaan 2,5 mm<sup>2</sup> poikkipintainen eurokaapeli.

TAULUKKO 4. Johdin poikkipintojen vertailutaulukko (Suomen standardisoimisliitto-SFS 60204-32, 292)

EURO mm <sup>2</sup>	AWG No.	Poikkipinta-ala mm <sup>2</sup>
0,2		0,196
	24	0,205
0,3		0,283
	22	0,324
0,5		0,500
	20	0,519
0,75		0,750
	18	0,823
1,0		1,000
	16	1,310
1,5		1,500
	14	2,080
2,5		2,500
	12	3,310
4,0		4,000
	10	5,260
6,0		6,000

Opinnäytetyön liitteessä 2 kattavampi muunnostaulukko, jonka avulla tehtiin muutokset suurempi poikkipintaisille kaapeleille.

Teollisuudessa suuritehoisten kuormien syötöissä voi olla järkevää toteuttaa syöttö rinnankytketyillä kaapeleilla. Tämä mahdollistaa riittävien virtojen siirtämisen ilman johdinten liiallista lämpenemistä. Myös taloudellisuuden ja kaapelien asennettavuuden kannalta vaihtoehtoa kannattaa tarkastella.

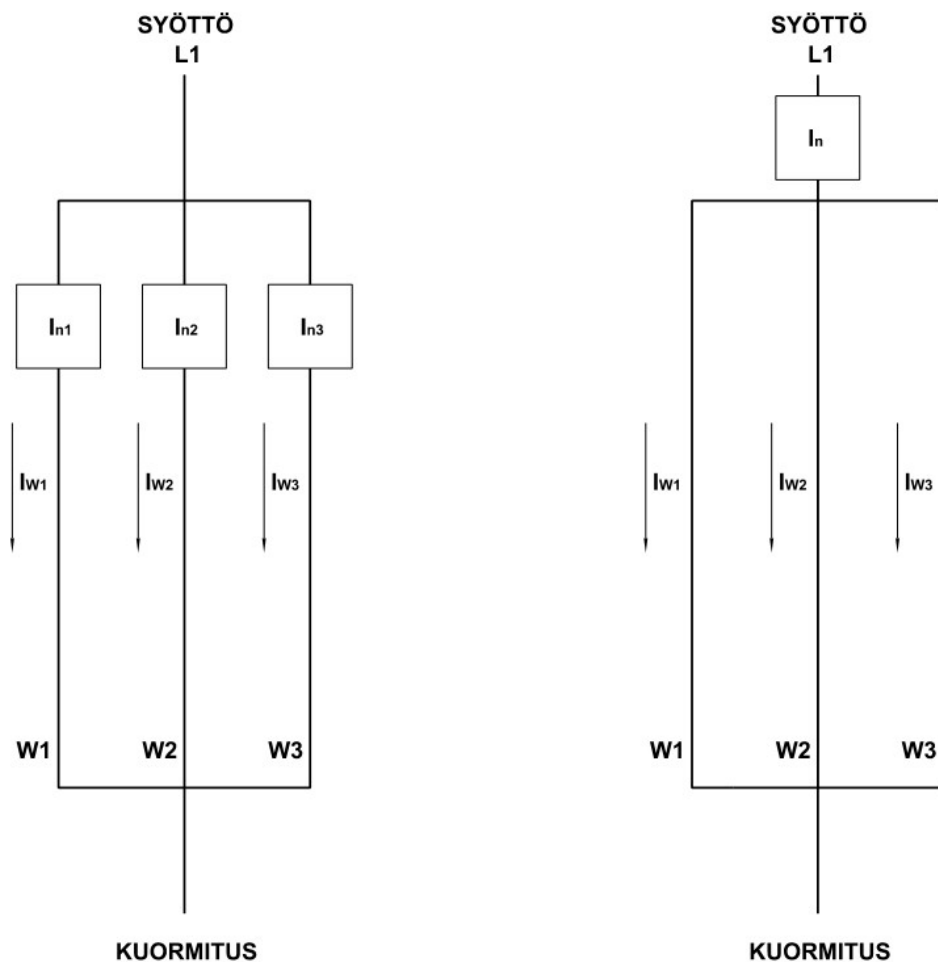
Tilanteissa joissa kaapeleilta vaaditaan suurta kuormitettavuutta voi olla tarpeen kartoittaa kaapeloinnin toteuttamista rinnankytkettyjen kaapeleiden avulla. Rinnankytketyillä kaapeleilla päästään poikkipinta-alaan nähden parempaan kuormitettavuuteen, kuin poikkipinnaltaan samankokoisella yksittäisellä kaapelilla. Taulukkoon 5 on Meinhartin katalogista poimittu NYCWY –kaapelin tiedot 120 mm<sup>2</sup> ja 240 mm<sup>2</sup> johdin poikkipinta-aloilta. Kytettäessä rinnakkain kaksi kappaletta 120 mm<sup>2</sup> kaapelia, saadaan syötön kuormitettavuudeksi 578 A, kun taas yhdellä 240 mm<sup>2</sup> kaapelilla kuormitettavuutta on 377 A.

TAULUKKO 5. Kaapeleiden kuormitettavuuden vertailu

Kaapeli	kpl	Kuormitettavuus ilmassa (A)	ovh (€ / m)
NYCWY 3x120/70 mm <sup>2</sup>	1	289	39,09
NYCWY 3x120/70 mm <sup>2</sup>	2	578	78,18
NYCWY 3x240/120 mm <sup>2</sup>	1	377	71,50

Taulukon 5 tuloksista nähdään, että hinta- / kuormittavuussuhde on rinnankytketyillä kaapeleilla parempi, kuitenkin rinnankytkettyjen kaapeleiden suojauksessa joudutaan, mahdollisesti käyttämään useampia suojalaitteita, jotka osaltaan voivat nostaa järjestelmän kustannuksia. Rinnankytkettyjen kaapeleiden käyttöä voi myös rajoittaa asennusreitit ja laitteiden fyysiset ominaisuudet.

Rinnankytkettyjen johtimien ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa yksittäisellä suojalaitteella tai mitoittamalla jokaiselle johtimelle oma suojalaite. Ylikuormitussuojauksen kytkentävaihtoehdot on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Rinnankytkettyjen johtimien ylikuormitussuojauksen toteutustavat

Toteutettaessa rinnankytkettyjen johtimien ylikuormitussuojaus yhdellä suojalaitteella on huomioitava, ettei rinnankytkettyjä johtimia saa haaroittaa, eikä niissä saa olla erotus- tai kytkinlaitteita. Myöskään johtimien virrat eivät saa poiketa toisistaan enempää kuin 10 prosenttia. Muussa tapauksessa johtimien suojaukset määritetään kullekin johtimelle erikseen.

Virtojen jakautumiseen johtimien välillä vaikuttaa johtimien impedanssi. Poikkipinta-alaltaan suurikokoisia kaapeleita käytettäessä, näiden reaktiivisen komponentin osuus kokonaisimpedanssissa kasvaa suuremmaksi kuin resistiivisen komponentin osuus. Tästä syystä johtimien asennusreitit suunniteltaessa on huomioitava, että johtimet kuljivat mahdollisimman edullisesti toisiinsa nähden. Näin pystytään minimoimaan epätasainen virranjakautuminen johtimissa (Suomen standardisoimisliitto SFS 6000-4-43, 136).

Kuvan 2 rinnankytkettyjen kaapeleiden impedanssit kullekin johtimelle pystytään laskemaan kaavaa 3 käyttäen (ST-kortti 53.24.01 2005, 2)

$$I_{W1} = \frac{I_B}{\frac{Z_1}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_3}} \quad (3)$$

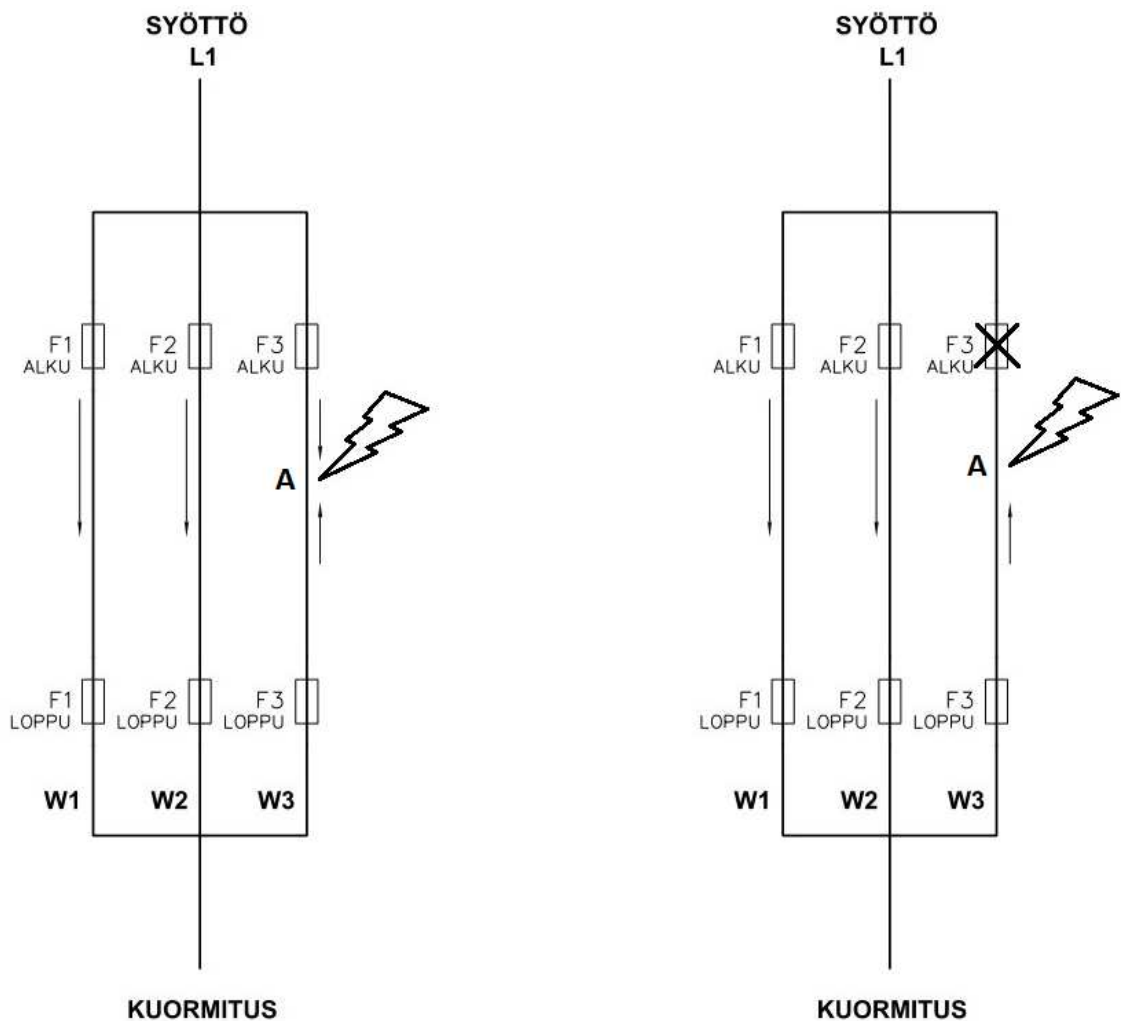
, missä  $I_B$  on virtapiirin mitoitusvirta

$I_{W1}$  on johtimen 1 mitoitusvirta

$Z_1, Z_2, Z_3$  on johtimien 1, 2, 3 impedanssit

Kaapeleiden asennusolosuhteiden vaikutusta ei kaavassa oteta huomioon, joten virtojen jakautuminen on suositeltavaa varmistaa mittaamalla.

Rinnankytkettyjen johtimien oikosulkusuojauksessa tulee huomioida virtojen mahdollinen kulkeutuminen vioittuneeseen pisteeseen, vaikka johtimen suojalaite olisikin toiminut. Kuvassa 3 on havainnollistettu, miten virta kulkeutuu eripisteisiin vikahetkellä. Oikosulun tapahtuessa johtimessa W3, virta kulkee alku- ja loppupään sulakkeiden kautta vikapisteeseen A. Oikosulkuvirta kuormittaa esimerkkitalanteessa eniten alkupään sulaketta F3 ja tämä toimii ensimmäisenä. Vaikka alkupään sulake F3 on toiminut, vikapiste A pysyy edelleen jännitteisenä. Loppupäähän sijoitettu sulake F3 toimii ja vikapiste A muuttuu jännitteettömäksi.



KUVA 3. Oikosulkusuojauksen toiminta vikatilanteessa

Sulakesuojauksessa esiintyy ongelma, jossa yhden rinnakkaisen johtimen suojaus toimii oikein, mutta muut johtimet jäävät jännitteisiksi ja syöttö jatkaa normaalia toimintaansa. Vaaratilanne pystytään välttämään käyttämällä syötön suojana katkaisijaa, joka kytkee pois kaikki rinnakkaiset johtimet samanaikaisesti.

Rinnankytkettyjen johtimien oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa tarvittaessa yhdellä suojalaitteella, jos pystytään varmistumaan siitä, että suojalaite toimii vaikka oikosulku tapahtuisi yksittäisen johtimen pahimmassa pisteessä. (Suomen standardisoimisliitto SFS 6000-4-43, 139)

### 3.6 Oikosulkuarvojen määrittäminen

Laitteiston määrittäminen perustuu IEC 60909 standardista saatuihin laskentamenetelmiin. Taulukossa 6 on esitetty laitoksen pienjännitejakelumuntajan tiedot. Muuntajan tiedot saatiin laitoksen sähködokumentteihin kirjatuista tiedoista.

TAULUKKO 6. Muuntajan tiedot

Muuntaja	
$S_N$ (kVA)	2500
$U_2$ (V)	480
$f$ (Hz)	60
$z$ (%)	5,75

Pienimmän ja suurimman oikosulkuvirran määrittämiseen käytettiin tauluko 7 mukaisia jännitekertoimen  $c$  arvoja.

TAULUKKO 7. IEC -60909 mukaiset jännitekertoimen arvot (IEC 60909 2001, 41)

Nimellisjännite $U_n$	$c_{max}$	$c_{min}$
100 - 1000 V	1,1	0,95
> 1 kV - 35 kV	1,1	1,0
> 35 kV		

Jännitekertoimella  $c$  otetaan laskennassa huomioon muun muassa käänkytkimistä johtuvat ajan ja paikan mukaiset jännitteen vaihtelut. (CENELEC CLC/TR 50480 2011, 19)

Opinnäytetyössä oli tarkoitus myös tarkastella osittain ABB DOC:n antamina tuloksia. Tarkastelua varten ratkaistiin laitteiston komponenttien määrittämiseen vaikuttavat oikosulkuvirtojen arvot.

Kaavan 4 avulla selvitetään muuntajan nimellisvirta (ABB:n TTT-käsikirja 2000 Luku 3, 1)

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (4)$$

,missä  $I_n$  on muuntajan nimellisvirta

$S_n$  on muuntajan näennäisteho

$U_2$  on muuntajan toisiopuolen jännitetaso

$$I_n = \frac{2500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V}} = 3007,033 \text{ A}$$

Ratkaistaan muuntajan kolmivaiheinen oikosulkuvirta (ABB:n TTT-käsikirja 2000 Luku 11, 8)

$$I_k = \left( \frac{I_n}{u_{\%k}} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

,missä  $I_k$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta

$u_{\%k}$  on oikosulkujänniteprosentti

$$I_k = \left( \frac{3007,03 \text{ A}}{5,75} \right) \cdot 100 = 52296,2 \text{ A} \approx 52,3 \text{ kA}$$

Muuntajan nimellisimpedanssi (ABB TTT-käsikirja 2000, 7)

$$Z_n = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (6)$$

,missä  $Z_n$  on muuntajan nimellisimpedanssi

$$Z_n = \frac{480 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 3007,03 \text{ A}} = 0,09216 \Omega \approx 0,09 \Omega$$

Muuntajan oikosulkuimpedanssi (IEC 60909 2001, 51)

$$Z_k = \frac{z}{100} \cdot Z_n \quad (7)$$

,missä  $Z_k$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi  
 $z$  on muuntajan oikosulkuimpedanssiprosentti

$$Z_k = \frac{5,75}{100} \cdot 0,09 \Omega = 0,005299 \Omega \approx 0,0053 \Omega$$

Muuntajan kolmivaiheinen pienin oikosulkuvirta (IEC 60909 2001, 83)

$$I_{k_{\min_{v1}}} = \frac{c_{\min} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (8)$$

,missä  $I_{k_{\min_{v1}}}$  on pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta  
 $c_{\min}$  on IEC 60909 mukainen jännitekerroin (0,95)

$$I_{k_{\min_{v1}}} = \frac{0,95 \cdot 480 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,0053 \Omega} = 49681,4 \text{ A} \approx 49,68 \text{ kA}$$

Muuntajan kolmivaiheinen suurin oikosulkuvirta

$$I_{k\_max_{v1}} = \frac{c_{max} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (9)$$

,missä  $I_{k\_max_{v1}}$  on suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta  
 $c_{max}$  on IEC 60909 mukainen jännitekerroin (1,1)

$$I_{k\_max_{v1}} = \frac{1,1 \cdot 480 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,0053 \Omega} = 57525,8 \text{ A} \approx 57,53 \text{ kA}$$

Sähkönjakelujärjestelmän muuntajalle käsin tehdyn oikosulkulaskennan tarkoituksena on antaa vertailuarvoja myöhemmin DOC -laskentaohjelmistolla tehtävälle sähkönjakelujärjestelmän mallinnukselle. Käsin laskettuja tuloksia vertailemalla ohjelmiston määrittelemiін tuloksiin, pystytään mahdollisesti saamaan käsitystä DOC -laskentaohjelmiston laskennan tarkkuudesta. Keskusten oikosulkuarvojen määrittelemiseksi, tulisi DOC:sta poimia keskuksia syöttävien laitteiden resistanssien ja reaktanssien arvot käsin laskentaa varten. Tämän kautta pystyttäisiin vertailemaan DOC:n tekemää laskentaa sähkönjakelujärjestelmän keskuksien osalta.

## 3.7 Loisteho

Sähköverkkoon kytketyt kuormitukset, kuten moottorit, purkauslamput ja muuntajat tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi loistehoa. Loisteho ei tee pätötehoon verrattuna mekaanista työtä, vaan esimerkiksi oikosulkumoottorin kohdalla loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitämiseen. Laitteistossa syntyvä loisteho voi olla kapasitiivista tai induktiivista. (Pulkkinen 2012, 2).

### 3.7.1 Loistehon kompensointi

Loisteho pienentää kaapeleiden kuormitettavuutta, koska osa kaapelin siirtokapasiteetista menee loisvirran siirtämiseen. Loistehon siirtoa voidaan rajoittaa kuorman viereen sijoitettavilla kompensointikondensaattoreilla, jolloin kaapeleiden kuormituskapasiteetti on käytettävissä lähes kokonaan pätötehon siirtämiseen (ST-kortti 52.15 2004, 2).

Periaatteena loistehon kompensoinnille on tuottaa kompensointilaitteistolla kuorman vaatima loisteho. Tavoitteena loistehon kompensoinnissa on saada induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi yhtä suureksi (Pulkkinen 2012, 6). Kompensoinnin avulla saavutettava laitteiston häviöiden väheneminen alentaa laitoksen energiakustannuksia.

Loistehon kompensointitapoja on erilaisia käyttökohteesta ja sähköverkon laitteistosta riippuen. Perusratkaisuna kompensoinnille on käyttää automaattista kompensointiparistoa, jonka loistehonsäädin kytkee automaattisesti kondensaattoriportaita päälle ja pois halutun tehokertoimen ylläpitämiseksi. Verkossa esiintyvien yliaaltojen määrä vaikuttaa olennaisesti kompensointilaitteiston valintaan ja varsinkin nykypäivänä ovat sähköverkkoon yliaaltoja aiheuttavat laitteistot yleistyneet. Paljon yliaaltoja esiintyvissä verkoissa joudutaan käyttämään laitteistoja, jotka kestävät yliaaltojen vaikutukset, kuten estokelaparistoja tai yliaaltosuodattimia. (ST-kortti 52.16 2004, 4)

Estokelaparistojen toiminta perustuu kolmeen kolmioon kytkettyyn kondensaattoriin ja jokaiseen kolmeen vaiheeseen sijoitettuun kelaan. Kelojen tehtävänä on estää yliaalto-  
taajuuksien resonanssia. (ST-kortti 52.16 2004, 7)

Yliaaltosuodatin koostuu kondensaattoriyksiköstä ja sarjaan kytketystä kuristimesta. Kondensaattoreiden perustaajuudella tuottama loisteho mitoitetaan halutun kompensointitehon mukaan. Kuristimen induktanssi valitaan, niin että se muodostaa kondensaattoreiden kanssa yliaaltotaajuudella impedanssiltaan hyvin pienen sarjaresonanssipiirin niin kutsutun imupiiirin. (ST-kortti 52.15 2004, 8)

Kompensointilaitteistojen sijoittelusta puhuttaessa käytetään yleisesti kolmea eri menetelytapaa. Kompensoitaessa esimerkiksi yksittäistä oikosulkumoottoria tai purkausvalaisinta puhutaan **yksittäiskompensoinnista**, jossa kondensaattorit sijoitetaan loistehoa synnyttävä laitteiston lähetyville. **Ryhmäkompensointia** voidaan käyttää laitteistoryhmille joiden loistehon vaihtelut ovat pieniä ja ryhmän kojeiden etäisyydet laitteistoa syöttävän ryhmäkeskuksen syöttökaapeliin verrattuna lyhyemmät. Ryhmäkompensoinnissa kompensointilaitteisto sijoitetaan ryhmäkeskuksen lähelle tai mahdollisesti keskuksen sisälle. **Keskitettyssä kompensoinnissa** kompensointi laitteistot sijoitetaan jakelu- tai alakeskukselle tai mahdollisesti molempiin. Keskuksella kompensointilaitteistolle varataan omat suojatut lähdöt (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 4).

### 3.7.2 Loistehon kompensointilaitteiston määrittäminen

Yleisesti kompensoinnilla tavoitellaan tehokertoimen arvoa 0,95 - 0,98. Varsinkin oikosulkumoottoreiden kohdalla on varottava ylikompensointia. Ylikompensointi voi aiheuttaa sammutustilanteessa oikosulkumoottorin toimimisen sähkönjakelujärjestelmää kuormittavana generaattorina. Oikosulkumoottorin sähköverkon suuntaan syöttämä jännitepiikki rasittaa sähköverkon muita laitteita ja voi pahimmassa tapauksessa rikkoa sähkönjärjestelmän laitteistoja. Oikosulkumoottoreiden generaattoritoiminnan estämiseksi suositellaan suurimmaksi kompensoinnin avulla saavutetuksi tehokertoimen arvoksi 0,97. (Pulkkinen 2012, 8)

Loistehon kompensointi pystytään laskemaan verkkoon kytkettyjen laitteiden tietojen perusteella. Kaavassa 10 esitetään kompensoinnin tarpeen määrittäminen. (ST-kortti 52.15 2004, 5)

$$Q = \frac{P}{\eta} \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (10)$$

,missä  $Q$  on loistehon tarve ( $kvar$ )

$P$  on kuorman pätöteho ( $kW$ )

$\eta$  on kuorman hyötysuhde

$\tan \varphi_1$  on tehokulma ennen kompensointia

$\tan \varphi_2$  on tehokulma ennen kompensoinnin jälkeen

Kompensointitarpeen määrittämiseen on myös laadittu taulukoita joista pystytään poimimaan kerroin, jolla lasketaan laitteelle kompensoinnin tarve.

Tarkasteltaessa liitteessä 4 esitettyä DOC –laskentaohjelmistolla mallinnettua teollisuuslaitoksen sähköjakelujärjestelmää, voidaan todetta laitoksen alakeskusten loistehonarvon olevan hyvällä tasolla ilman kompensointiakin. Tämä johtuu osittain laitoksessa olevien suoraan verkkoon kytkettyjen moottoreiden vähäisestä määrästä. Suurin osa moottoreiden ohjauksista tapahtuu taajuusmuuttajien kautta, jotka rajoittavat loistehon aiheuttamaa kuormitusta sähköjakelujärjestelmään.

Esimerkiksi on laskettu liitteen 4 sivulla 6 esitetyn alakeskuksen E kompensoinnin tarve, jossa on tarkastelun tuloksien mukaan heikoin tehokertoimenarvo  $\cos\varphi$  0,95. Tavoite tehokertoimen arvo laskennassa on  $\cos\varphi_2$  0,97. Laskennassa on käytetty ABB DOC tarkasteluun eroteltuja moottoreita MS9 ja MS10, joiden tiedot on koottu taulukkoon 8.

TAULUKKO 8. Moottoreiden MS9 ja MS 10 tiedot

Moottori	MS9	MS10
$P_n$ (kW)	4	11
$U_n$ (V)	480	480
$I_n$ (A)	9,6	18,5
$\cos\varphi$	0,81	0,85
$\eta$	0,84	0,84
$n$ (rpm)	1500	1500

Moottorin MS9 tarvitsema kompensoinnin tarve:

$$Q_{MS9} = \frac{4 \text{ kW}}{0,84} \cdot (\tan 0,72 - \tan 0,25) = 2,25 \text{ kvar}$$

Moottorin MS10 tarvitsema kompensoinnin tarve:

$$Q_{MS10} = \frac{11 \text{ kW}}{0,84} \cdot (\tan 0,62 - \tan 0,25) = 4,83 \text{ kvar}$$

TAULUKKO 9. Kuorman L5 tiedot

L5	
$P_n$ (kW)	54,12
$U_n$ (V)	480
$I_n$ (A)	66,5
$\cos\phi$	0,98

Kuorma L5 koostuu suurimmaksi osaksi taajuusmuuttajakäyttöistä ja kuten taulukosta 9 nähdään, kuorman tehokerotoimen arvo ilman kompensointia on 0,98. Tästä voidaan todeta, ettei kuormalla ole kompensoinnintarvetta.

Keskuksen E kompensoinnin tarve tehokertoimen arvon 0,97 saavuttamiseksi:

$$Q_E = Q_{MS9} + Q_{MS10} = 2,25 \text{ kvar} + 4,83 \text{ kvar} = 7,08 \text{ kvar}$$

## 4 ABB DOC 2.0

Opinnäytetyössä käytetään ABB:n kehittämää DOC 2.0 laskentaohjelmistoa, joka on tarkoitettu sähköjärjestelmien suunnitteluun ja mallintamiseen. Ohjelman avulla pystytään sujuvasti määrittämään sähköjärjestelmän arvoja eri osissa verkkoa. Ohjelmiston suurimpana etuna käsin laskentaan verrattuna on muutosten tekemisen helppous. Laitteistolle tehtävän muutoksen johdosta voidaan joutua laskemaan koko sähköjärjestelmä alusta asti uudelleen. Tämä on varsinkin laajoissa sähköjärjestelmissä hidasta ja aikaa vievää, mutta DOC:n avulla saadaan nopeasti selville tehtyjen muutosten vaikutukset jokaisessa verkon pisteessä. Tässä luvussa kerrotaan DOC 2.0 ohjelmiston peruseriaatteiden käytöstä.

Sähköjakelujärjestelmän laitteiston suunnittelussa ohjelmisto osaa automaattisesti mitoitaa sähköjärjestelmän komponentit oikean kokoisiksi. Tarvittaessa kuitenkin kaikkia valintoja pystyy myös käsin säätämään, jolloin haluttu komponentti haetaan manuaalisesti valikoiden takaa.

Kaikesta kätevydestään huolimatta ohjelmiston rajoitteena on komponenttiluetteloiden rajoittuminen ainoastaan ABB:n tuotteisiin. Kuitenkin eri valmistajien tuotteet ovat perusominaisuuksiltaan hyvin vastaavanlaisia, joten laskenta- ja tarkastelutyökaluna ohjelma DOC toimii hyvin luotettavasti.

DOC rajoittaa ABB:n tuotteita alussa asetettujen lähtöarvojen perusteella. DOC:sta löytyi nimellisvirraltaan vastaava moottorinsuojakytkin, kuin mikä teollisuuslaitoksen syöttökaavioihin oli merkitty. Äärimmäisen oikosulkuvirrankatkaisukyvyyn arvolla oli kuitenkin moottorinsuojakytkimien osalta niukasti valinnan varaa. Aseteltaessa laitoksen jännitetasoksi 400 V moottorinsuojakytkimien vaihtoehtojen määrä kasvoi oikosulkuvirran katkaisukyvyynarvolla. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella teollisuuslaitosta 480 V jännitetasossa, joten moottorinsuojakytkimien niukan valinnan varan takia päädyttiin jättämään alakeskusten komponenttien tarkastelu pois.

Liitteessä 4 on esitetty DOC laskentaohjelmistolla mallinnetun teollisuuslaitoksen sähköjakelujärjestelmän dokumentit. Dokumenttien alussa on selvitetty DOC:n laskennassa ja mitoittamisessa käyttämät standardit ja kertoimet. Piirikaavioiden jälkeen esitetyissä taulukoissa on esitetty ohjelman laskemia tuloksia.

## 4.1 Lähtöarvojen asettelu

DOC:n käyttö alkaa laitoksen yleisten ominaisuuksien asettelulla, sekä laskentaan ja komponenttien mitoittamiseen vaikuttavien standardien valinnalla. Tässä tutkimustyössä käytettiin katkaisijoiden valinnassa standardia IEC 60947-2, oikosulkulaskennassa standardia IEC 60909-1, sekä kaapelivalinnoissa standardia IEC 60364. Asettelussa määritetään myös ympäristön lämpötilat, joiden mukaan korjauskertoimet muodostuvat. Kuvassa 4 nähdään laitoksen ominaisuuksien valinta ikkuna, jonka kautta määritetään tarvittava jakelulaitteisto, pienjännitepuolen jännitetaso, sekä käytettävät laskennassa ja komponenttien määrittämisessä käytettävät standardit.

KUVA 4. ABB DOC:n sähköverkon asettelut

Laitteiston valinnassa järjestelmän komponentit määritetään tarpeen mukaan käsin tai annetaan DOC:n mitoittaa laitteistot automaattisesti annettujen tietojen perusteella. Opinnäytetyössä käytettiin molempia tapoja. Aluksi tarkasteltiin alkuperäisen laitteiston mitoittamista DOC:lla, jonka jälkeen katsottiin miten DOC mitoittaa laitteiston automaattisesti.

Laitteiston alkupään muutokset vaikuttavat muun muassa kaapeleiden jännitteen alenemaan ja tämän kautta komponentteihin vaikuttaviin oikosulkuvirtoihin. Jotta pystyttäisiin varmistumaan siitä, etteivät muutokset vaikuttaisi laitteistojen suojauksen toimintaan, tarkasteluun valittiin jokaiselta alakeskuksesta laite, johon muutokset mahdollisesti eniten vaikuttaisivat. Suojauksen toiminnan tarkasteluun valittiin jokaiselta alakeskuksesta poikkipinnaltaan pienin kaapeli ja sen syöttämä suurin kuormitus. Tarkasteluun valittiin vertailun vuoksi myös prosessikeskuksen suuritehoisin moottori.

Kuormia lisättäessä mallinnukseen päädyttiin tarkempien moottoritietojen puuttuessa valitsemaan moottorit ABB:n valintataulukosta, tiedossa olevien moottorin nimellistehojen perusteella. Tällöin moottorin tietoihin syötettiin nimellisteho sekä tehokerroin. DOC:ssa on myös mahdollista valita moottori omasta tuotetietokannasta. Kuvassa 5 esitetään syötön ominaisuuksien valintaikkuna. Kuormalle pystytään määrittelemään valintaikkunan kautta sähkötekniset arvot, joko käsin tai vaihtoehtoisesti lataamalla oikeanlainen moottori ABB:n arkistosta.

Syötön ominaisuudet

Moottori (-MST) | PJ-kaapeli (-WC3)

Käyttäjät

LLL 480 [V]  
TN-S 60 [Hz]

Käyttökerroin UF 100 [%]

Malli M3BP 160 M 8 - 5.5 kW

Nimellisjännite  $V_n$  480 [V]  
Nimellisvirta  $I_n$  4.0387 [A]  
Nimellinen pätöteho  $P_n$  2.2 [kW]  
Hyötysuhde  $\eta$  0.84  
Nimellinen tehokerroin  $\cos\phi_n$  0.78

Laskettu jännite 477.49 [V]  
Maks. dV 10 [%]  
Laskettu dV 0.522 [%]

Koordinointi  
Käynnistystapa  
Laukaisuluokka  
Koordinaatiotyyppi

Symboli

Lisäasetukset >>

OK Peruuta

KUVA 5. Syötön ominaisuuksien määrittely

Jakelukeskuksella jäljelle jääneet kuormat laskettiin yhteen ja lisättiin yleisenä kuormana keskuksen perään. Yleisen kuorman tehokertoimeksi laitettiin 0,98, koska suurin osa moottoreiden ohjauksista oli toteutettu taajuusmuuttajilla, jolloin päästään hyvin lähelle tehokertoimen arvoa 1. Myös suurten yksittäisten moottoreiden ohjaukset oli toteutettu taajuusmuuttajilla ja näiden tehokertoimeksi laitettiin 0,99. Kuvassa 6 nähdään yleisen kuormituksen valintaikkuna, jossa kuorman suuruus määritetään joko nimellisvirran tai pätötehon perusteella.

The screenshot shows a software window titled "Yleinen kuormitus (-L1)". The window contains the following fields and values:

- Käyttäjä:** Two empty text input fields.
- Voltage and Frequency:** LLL (480 [V]) and TN-S (60 [Hz]).
- Calculated Values:** Laskettu jännite: 479.77 [V]; Maks. dV: 4 [%]; Laskettu dV: 0.0459 [%].
- Usage Coefficient:** Käyttökeroin: 100 [%].
- Rated Values:**
  - Nimellisvirta: 46.8606 [A]
  - Nimellinen tehokerroin: 0.98
  - Pätöteho: 38.18 [kW]
- Symbol:** A dropdown menu showing "<oletus>".
- Buttons:** OK and Peruuta.

KUVA 6. Yleisen kuormituksen määrittäminen

Kaapeleiden valinta tapahtuu kuvassa 7 näytetyn kaapelin ominaisuuksien valintaikkunan kautta. Valikossa määritetään kaapeliin vaikuttavan ympäristön lämpötila, kaapelin johtimien lukumäärä, valmistusmateriaali, eriste- ja vaippamateriaali (PVC tai korkeissa lämpötiloissa EPR/XLPE), kaapelin pituus, asennustapa sekä vaihe- ja PE -johtimien poikkipinta-alat. Kaapeleiden asennustapana työssä käytettiin yleisesti yläpuolista tiikasennusta.

Syötön ominaisuudet

PJ-kaapeli (-WC1) | Katkaisija (-QF2)

Käyttäjä

$I_b$  74.1 [A] LLL 480 [V] TN-S 60 [Hz]

$\cos\phi$  0.87

Ympäristön lämpötila 40 [°C]

Maksimi dV% sallittu [ ] [%]

Kaapeli, jossa kaksoiseristys

Kojeston sisällä

Kaapelin määrittely  Virtakisko

Pituus 20 [m]

Monta johdinta

PVC Cu

Asennustapa

Yläpuolinen

Tikkaissa

Etäisyys 34

Vaihe 1 x 50 [mm<sup>2</sup>]

PE 1 x 25 [mm<sup>2</sup>]

$I_z$  115.277 [A]

$k$  0.75

dV 0.21 [%]

Muut tulokset

Muuntokertoimet

Oikosulkuvirrat

Symboli <oletus>

Lisäasetukset >>>

OK Peruuta

KUVA 7. Kaapelin määrittely valikko

Kuvassa 8 nähdään kaapelin valinnan lisäasetukset valikko, jonka kautta määritetään rinnakkaisten kaapelien lukumäärä. Keskusten välisessä kaapeloinnissa kaapelihyllylle asetettiin kulkemaan kuusi rinnakkaista kaapelia ja prosessitilassa taas rinnakkaisten kaapeleiden lukumääränä käytettiin neljää kappaletta. Lisäasetuksissa määriteltiin myös kaapelin kuormitettavuuden ja kuormitusvirran suhde, jonka arvona opinnäytetyössä käytettiin 1,1. Suhdeluvun mukaan DOC mitoittaa kaapelin vähintään 10 % kuormitusvirtaa suuremmaksi.

Lisäasetukset

Asennustiedot

6 rinnakkaista kaapelia

1 teline

PE  PE=Vaihe

Pituus [m]

Max working temperature 70 [°C]

Max temp. during short circuit (S<=300mm<sup>2</sup>) 160 [°C]

Max temp. during short circuit (S>300mm<sup>2</sup>) 140 [°C]

Asennustapa

PE samassa vaiheen putkessa

Asennuksen symmetria huomioidaan rinnakkaisilla kaapeleilla

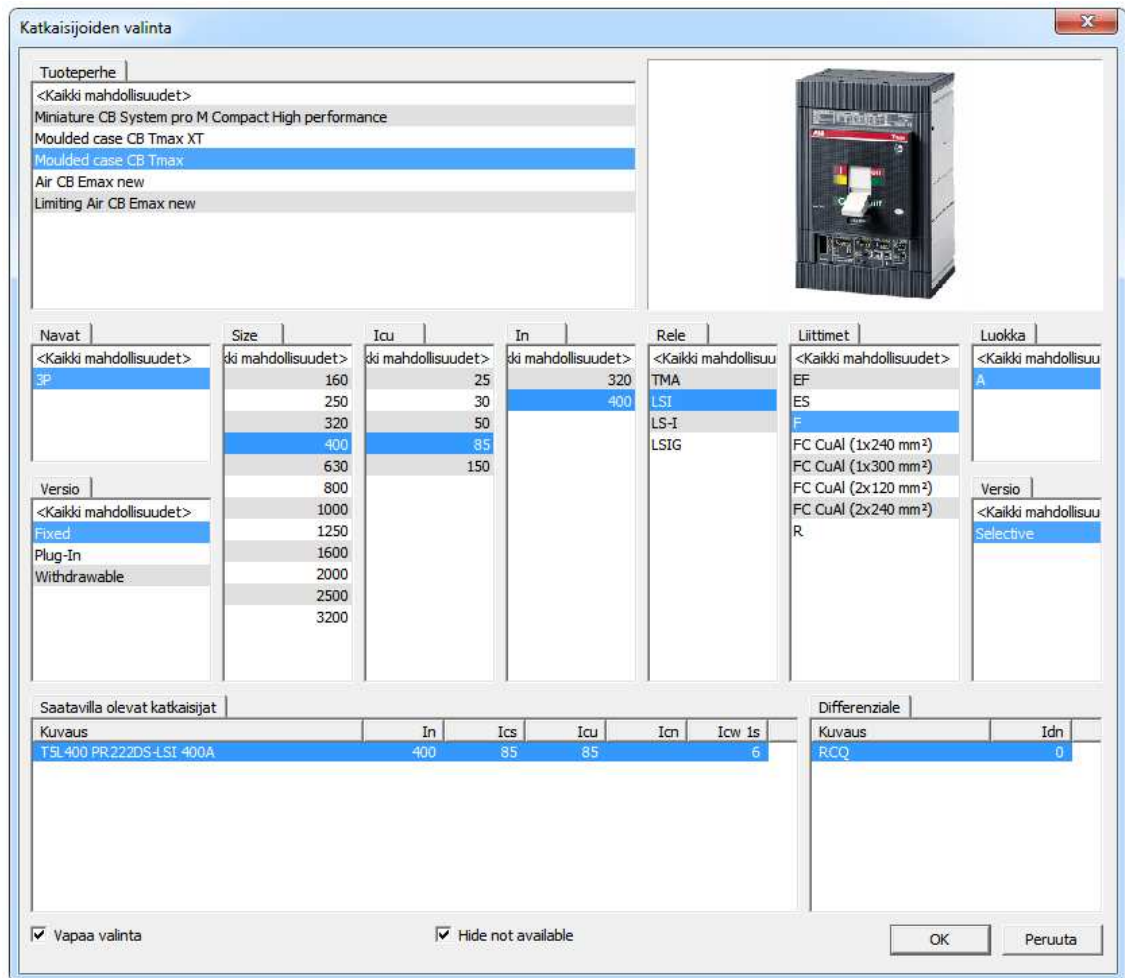
Kolmannen yliaallon

Minimi Iz/Ib sallittu 1.1

OK Peruuta

KUVA 8. Kaapelin lisäasetukset

Katkaisijoiden ja moottorinsuojien valinta tapahtuu kuvassa 9 esitetyn valikon avulla. Ensiksi valitaan haluttu tuoteperhe, jonka jälkeen katkaisijan kokoluokan ja virtaominaisuuksien perusteella valitaan oikeanlainen komponentti. Tutkimustyön aikana huomattiin, että alussa valittu järjestelmän jännitetaso rajaa osan saatavilla olevista katkaisijoista pois. Esimerkiksi 400V / 50 Hz jännitetasolla oli ABB:n katkaisijoita saatavana useammalla oikosulkukestoisuuden arvoilla, kuin 480 / 60 Hz jännitteellä. Tämän takia osassa moottorilähtöjen suojauksessa jouduttiin valitsemaan normaalia mitoitusta suurempi moottorinsuojakytkin, koska pienemmissä malleissa oikosulkukestoisuudet eivät riittäneet mitoitukseen. Automaattisessa laitteiston määrittelyssä DOC jätti tyypittämättä kyseiset komponentit.



KUVA 9. Katkaisijan määrittely valikko

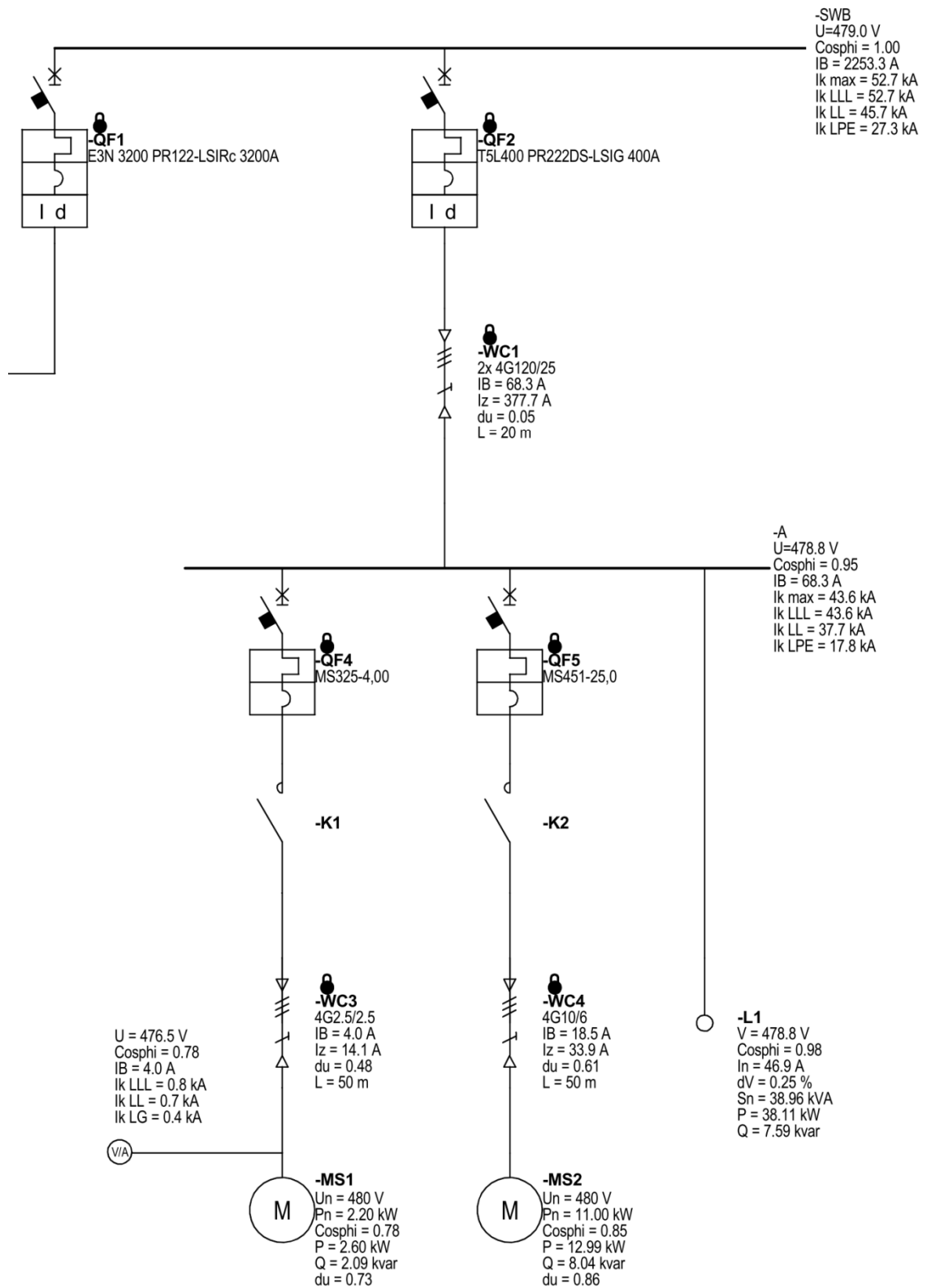
## 4.2 Muutosten vertailu

Taulukkoon 10 on koottu DOC –laskentaohjelmiston määrittelemät tulokset sähköjälkijärjestelmän laitteiston syötölle.

TAULUKKO 10. DOC:n laskemat syötön arvot

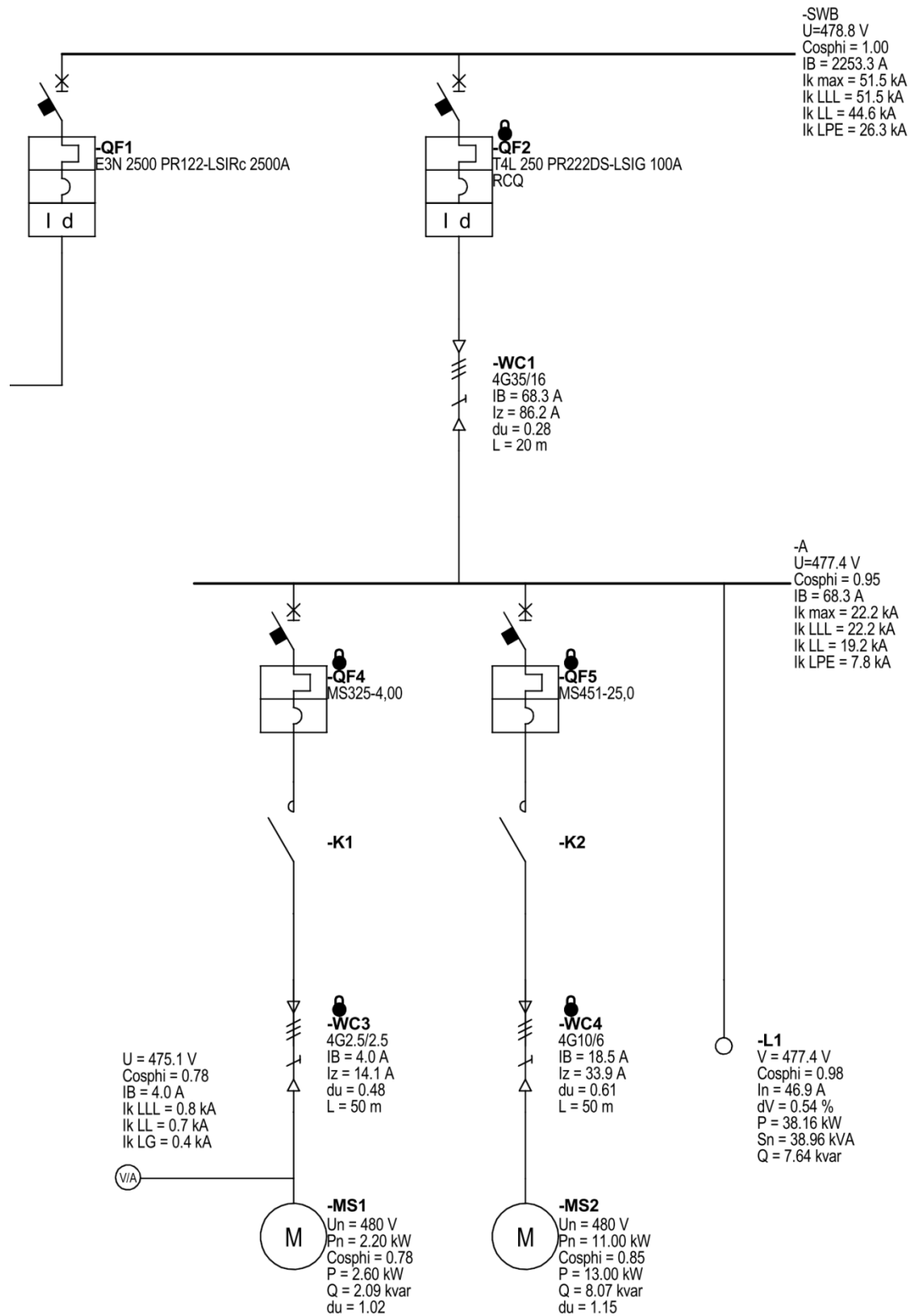
Syöttö DOC	
$U_n$ (V)	480
$I_{k\_LLL}$ (kA)	57,5
$I_{k\_LN}$ (kA)	34,5
$I_{k\_LPE}$ (kA)	34,5
P (kW)	1869,4
Q (kvar)	122,5

Kuvassa 10 on nähtävissä yhden prosessikeskuksen syöttö. Tunnus -SWB (Switchboard) kuvaa jakelukeskuksen kiskostoa ja tunnus -A kuvaa alakeskuksen kiskostoa.



KUVA 10. Alakeskuksen A alkuperäinen syöttö

Kun komponentit oli saatu määritettyä, aukaistaan katkaisijan ja alakeskuksen kaapeloinnin lukitukset ja käynnistetään laskenta uudelleen. Nyt DOC määrittelee automaattisesti sopivan kokoiset laitteistot lukitsemattomille komponenteille. Muutos on nähtävissä kuvassa 11.



KUVA 11. Alakeskuksen A syöttö, johon DOC mitoitannut syöttökaapelin ja katkaisijan

Kiskostojen perässä nähdään DOC:n laskemat oikosulkuarvot, joista pystytään näkemään, kuinka kaapelointi ja suojalaitteet vaimentavat oikosulkuvirran arvoa keskusten välillä. Huomaamisen arvoista on nähdä, kuinka paljon pienemmällä syöttökaapelilla DOC:n mukaan alakeskuksen A syöttö pystyttäisiin toteuttamaan. Kaapeloinnin pienentäminen vaikuttaa taas olennaisesti alakeskuksen oikosulkuarvoihin, jolloin pystytään valikoimaan keskuksen laitteistot pienemmällä oikosulkukestoisuuden arvolla. DOC laskennan tuloksia on tarkasteltu tarkemmin tulevissa kappaleissa.

### 4.3 Kaapeleiden tarkastelu

Seuraavassa tarkastelussa on kiinnitetty huomioita jakelukeskuksen ja alakeskuksen väliseen kaapelointiin, sekä suurten yksittäisten syöttöjen kaapelointiin. Jakelu- ja alakeskukset sijaitsevat samassa ilmastoidussa sähkötilassa noin 20 metrin etäisyydellä toisistaan. Prosessitiloihin menevien syöttöjen pituutena tutkimuksessa käytettiin 50 metriä. Aluksi tutkimus tehtiin sähkötilan lämpötilana +40 °C ja prosessitilassa +50 °C. Taulukosta 11 nähdään miten DOC mitoittamat kaapelit eroavat alkuperäisen mitoituksen kaapeleihin.

TAULUKKO 11. ABB DOC:n määrittelemät kaapelit

Syöttö	Kaapeli	Alkuperäinen		ABB DOC		Lämpötila (°C)
		kpl	Tyyppi	kpl	Tyyppi	
A	WC1	2	4G120/25	1	4G35/16	40
B	WC2	2	4G120/25	2	4G95/50	40
C	WC7	2	4G120/25	2	4G120/70	40
D	WC8	2	4G120/25	1	4G185/95	40
E	WC13	2	4G120/25	1	4G50/25	40
F	WC14	2	4G120/25	2	4G95/50	40
Kompensointi	WC19	2	4G120/25	2	4G150/95	40
185 kW	WC20	2	4G120/25	2	4G95/50	50
185 kW	WC21	2	4G120/25	2	4G95/50	50
185 kW	WC22	2	4G120/25	2	4G95/50	50
55 kW	WC23	1	4G50/25	1	4G50/25	50
55 kW	WC24	1	4G50/25	1	4G50/25	50
75 kW	WC25	1	4G70/35	1	4G95/50	50
75 kW	WC26	1	4G70/35	1	4G95/50	50
45 kW	WC27	1	4G35/16	1	4G35/16	50

Ympäristön lämpötila vaikuttaa olennaisesti kaapeleiden kuormitettavuuteen. Laitteiston mitoituksen lähtökohtana on pahin laitteistoon vaikuttava olosuhde ja vertailun vuoksi tämän vaikutus tuotiin kaapeleiden tarkastelussa esille. Taulukosta 12 nähdään miten kaapelointi muuttuisi alkuperäiseen nähden, jos lämpötilana nostetaan sähkötilassa +45 °C ja prosessitilassa +55 °C.

TAULUKKO 12. ABB DOC:n määrittelemät kaapelit, kun lämpötilaa nostettu

Syöttö	Kaapeli	Alkuperäinen		ABB DOC		Lämpötila (°C)
		kpl	Tyyppi	kpl	Tyyppi	
A	WC1	2	4G120/25	1	4G35/16	45
B	WC2	2	4G120/25	2	4G95/35	45
C	WC7	2	4G120/25	2	4G150/95	45
D	WC8	2	4G120/25	1	4G185/95	45
E	WC13	2	4G120/25	1	4G70/35	45
F	WC14	2	4G120/25	2	4G95/50	45
Kompensointi	WC19	2	4G120/25	2	4G150/95	45
185 kW	WC20	2	4G120/25	2	4G120/70	55
185 kW	WC21	2	4G120/25	2	4G120/70	55
185 kW	WC22	2	4G120/25	2	4G120/70	55
55 kW	WC23	1	4G50/25	1	4G70/35	55
55 kW	WC24	1	4G50/25	1	4G70/35	55
75 kW	WC25	1	4G70/35	1	4G120/70	55
75 kW	WC26	1	4G70/35	1	4G120/70	55
45 kW	WC27	1	4G35/16	1	4G50/25	55

Taulukkojen 11 ja 12 DOC:n määrittelemiä kaapeleita verratessa, huomataan että lämpötilan nosto viidellä asteella vaikuttaa eniten prosessitilassa kulkevien kaapeleiden poikkipinta-alaan. Tämä selittyy pidemmällä matkalla ja korkeamman ympäristönlämpötilan tuomalla heikommalla korjauskertoimella.

Kaapeleiden kustannuksissa kaapeleiden hinnat on poimittu Meinhart:n hinnastosta. Taulukkoon 13 on laskettu alkuperäisen suunnitelman mukaisen kaapeloinnin kustannukset. Taulukosta 13 nähdään DOC:n mitoittaman kaapeloinnin kustannus arvio.

TAULUKO 13. Alkuperäisten syöttökaapeleiden kustannukset

Syöttö	Kaapeli	Tyyppi	kpl	Matka (m)	€/m	Yht. €
A	WC1	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
B	WC2	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
C	WC7	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
D	WC8	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
E	WC13	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
F	WC14	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
Kompensointi	WC19	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
185 kW	WC20	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
185 kW	WC21	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
185 kW	WC22	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
55 kW	WC23	3x50SM/25	1	50	17,34	867,24
55 kW	WC24	3x50SM/25	1	50	17,34	867,24
75 kW	WC25	3x70SM/35	1	50	23,11	1155,48
75 kW	WC26	3x70SM/35	1	50	23,11	1155,48
45 kW	WC27	3x35SM/16	1	50	12,90	645,11
					Yhteensä €	27364,14

TAULUKKO 14. Kaapelointi kustannukset, sähkötila 40 °C ja prosessitila 50 °C

Syöttö	Kaapeli	Tyyppi	kpl	Matka (m)	€/m	Yht. €
A	WC1	3x35SM/16	1	20	12,90	258,04
B	WC2	3x95SM/50	2	20	30,48	1219,11
C	WC7	3x120SM/70	2	20	39,09	1563,70
D	WC8	3x185SM/95	1	20	55,51	1110,26
E	WC13	3x50SM/25	1	20	17,34	346,90
F	WC14	3x95SM/50	2	20	30,48	1219,11
Kompensointi	WC19	3x150SM/95	2	20	44,24	1769,48
185 kW	WC20	3x95SM/50	2	50	30,48	3047,78
185 kW	WC21	3x95SM/50	2	50	30,48	3047,78
185 kW	WC22	3x95SM/50	2	50	30,48	3047,78
55 kW	WC23	3x50SM/25	1	50	17,34	867,24
55 kW	WC24	3x50SM/25	1	50	17,34	867,24
75 kW	WC25	3x95SM/50	1	50	30,48	1523,89
75 kW	WC26	3x95SM/50	1	50	30,48	1523,89
45 kW	WC27	3x35SM/16	1	50	12,90	645,11
					Yhteensä €	22057,31

Lämpötilan nosto vaikutti kaapeleiden kuormitettavuuteen jolloin kaapeleiden poikkipinta-alat kasvoivat. Verrattaessa taulukon 14 ja 15 yhteenlaskettuja kustannuksia toisiinsa, saadaan käsitys siitä kuinka paljon kustannus nousee lämpötilan nousun takia.

TAULUKKO 15. Kaapelointi kustannukset, sähkötila 45 °C ja prosessitila 55 °C

Syöttö	Kaapeli	Tyyppi	kpl	Matka (m)	€/m	Yht. €
A	WC1	3x35SM/16	1	20	12,90	258,04
B	WC2	3x95SM/50	2	20	30,48	1219,11
C	WC7	3x150SM/95	2	20	44,24	1769,48
D	WC8	3x185SM/95	1	20	55,51	1110,26
E	WC13	3x70SM/35	1	20	23,11	462,19
F	WC14	3x95SM/50	2	20	30,48	1219,11
Kompensointi	WC19	3x150SM95	2	20	44,24	1769,48
185 kW	WC20	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
185 kW	WC21	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
185 kW	WC22	3x120SM/70	2	50	39,09	3909,24
55 kW	WC23	3x70SM/35	1	50	23,11	1155,48
55 kW	WC24	3x70SM/35	1	50	23,11	1155,48
75 kW	WC25	3x120SM/70	1	50	39,09	1954,62
75 kW	WC26	3x120SM/70	1	50	39,09	1954,62
45 kW	WC27	3x50SM/25	1	50	17,34	867,24
					<b>Yhteensä €</b>	<b>26622,85</b>

Kaapeleiden kuormitettavuuden ja kustannustehokkaiden ratkaisujen takia suunnittelussa on tarpeellista selvittää tarkasti laitteistoihin kohdistuvat ympäristöjen olosuhteet.

#### 4.4 Katkaisijoiden tarkastelu

Alkuperäisistä jännitteenjakelukeskuksen katkaisijoista ei ollut tarkempia tietoja, kuin mitä jännitteenjakelukaaviosta pystyi saamaan selville. Kaikki jakelukeskukselta lähtevät syötöt olivat toteutettu katkaisijoilla. Alakeskusten, kompensointilaitteiston ja 185 kW:n suorien moottorilähtöjen katkaisijoiden kohdalla oli merkintä LSIG. ABB:ltä toimitetussa pienjännitetuotteiden hinnastossa oli katkaisijoiden kohdalla selvitetty eri lyhenteiden tarkoitukset. Alapuolelle on poimittu opinnäytetyössä käytettyjen lyhenteiden selitykset.

L on ylikuormitussuojaus

S on hidastettu oikosulkusuojaus (selektiivinen)

I on oikosulun pikalaukaisu

G on maasulkusuojaus

TMA on termomagneettinen rele, jossa terminen ja magneettinen laukaisu säädettävissä

MP tarkoittaa moottorin suojaus, ylikuormitus, oikosulku, jumisuojaus, vaihevalvonta

PR222 on rele, LSI tai LSIG suojauksella

Taulukossa 16 on esitetty ABB:n katkaisijoiden runkokokojen T4 ja T5 rungon suurin katkaisukykyvirta ( $I_{cu}$ ) ja katkaisijan nimellinen sulkemiskykyvirta ( $I_{cm}$ ) erijännitetasolla. Katkaisija valintaa tehtäessä 480 V jännitetasolla käytetään 500 V valinta saraketta.

TAULUKKO 16. ABB:n T4 ja T5 katkaisijoiden runkokokojen oikosulkuarvot

Runkokoko		N	S	H	L	V
400 V	$I_{cu}$ (kA)	36	50	70	120	200
	$I_{cm}$ (kA)	75,6	105	154	264	440
500 V	$I_{cu}$ (kA)	25	30	50	85	150
	$I_{cm}$ (kA)	52,5	63	105	187	330
690 V	$I_{cu}$ (kA)	20	25	40	70	80
	$I_{cm}$ (kA)	40	52,5	84	154	176

Taulukkoon 16 on kerätty keskusten oikosulkukestoisuudet, minkä mukaan katkaisijoiden ja moottorinsuojakytkimien runkokokojen valinta tapahtuu. Oikosulkukestoisuuksien tarkastelua varten sähköjakelujärjestelmään kytketyt suorat moottorilähdöt on poistettu, koska todellisuudessa kaikkia ohjataan taajuusmuuttajilla. Poistettujen moottoreiden tilalle kytketään yleinen kuorma, jonka kuormitukseksi asetetaan poistettujen moottoreiden yhteenlaskettu pätöteho 860 kW. Näin pidetään jännitteenjakelulaitteiston kuormitus alkuperäisen suuruisena, ilman oikosulkumoottoreiden aiheuttamia oikosulkuvirtaa kasvattavia ominaisuuksia.

TAULUKKO 17. Keskusten suurimmat oikosulkuvirrat

Keskus	Alkuperäinen		ABB DOC		ABB DOC	
	$I_{k,max}$ (kA)	Lämpötila (°C)	$I_{k,max}$ (kA)	Lämpötila (°C)	$I_{k,max}$ (kA)	Lämpötila (°C)
SWB	52,7	40	51,5	40	51,5	45
A	42,7	50	22,2	50	22,2	55
B	42,7	50	41,8	50	41,8	55
C	42,7	50	42,7	50	43,2	55
D	42,7	50	37,5	50	37,5	55
E	42,7	50	27,1	50	31,1	55
F	42,7	50	41,8	50	42,7	55

Katkaisijoiden tarkastelussa pyrittiin pitämään suojauksen toiminta samanlaisena, kuin alkuperäisessä laitteistossa. Aluksi DOC:n mitoitti sopivan kokoisen katkaisijan, jonka jälkeen valitulle katkaisijalle haettiin manuaalisesti valikoiden kautta haluttu toiminta.

Näin saatiin yhtenäinen laitteistokokonaisuus, joka myös helpottaa taloudellista tarkastelua. Taulukoon 18 on laskettu alkuperäisen laitteiston kustannukset.

TAULUKKO 18. Alkuperäiset jännitteenjakelukeskuksen katkaisijat

Syöttö	Katkaisijan tyyppi	$I_n$ (A)	$I_{cu}$ (kA)	Ovh. (€)
MB	E3N 3200 PR122-LSIG FHR	3200	65	8180,00
A	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
B	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
C	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
D	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
E	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
F	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
Kompensointi	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
185 kW	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
185 kW	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
185 kW	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1890,00
55 kW	T4L 250 PR222MP	160	85	839,00
55 kW	T4L 250 PR222MP	160	85	839,00
75 kW	T4L 250 PR222MP	200	85	993,00
75 kW	T4L 250 PR222MP	200	85	993,00
45 kW	T4L 250 PR222MP	100	85	756,00
Yhteensä €				31500,00

Alkuperäisten katkaisijoiden mitoitus noudattaa alkuperäisten kaapeleiden toteutusta, jossa kaikkien alakeskusten katkaisijat ja kaapelit ovat samankokoisia. Taulukkoon 19 on koottu DOC:n uudelleen mitoittamat jännitteenjakelukeskuksen katkaisijat.

TAULUKKO 19. DOC:n mitoittamat jännitteenjakelukeskuksen katkaisijat

Syöttö	Katkaisijan tyyppi	$I_n$ (A)	$I_{cu}$ (kA)	Ovh. (€)
MB	E3N 2500 PR122-LSIG FHR	2500	65	7160,00
A	T4L 250 PR222DS-LSIG	100	85	868,00
B	T4L 320 PR222DS-LSIG	320	85	1380,00
C	T5L 400 PR222DS-LSIG	400	85	1480,00
D	T4L 250 PR222DS-LSIG	250	85	1110,00
E	T4L 250 PR222DS-LSIG	100	85	868,00
F	T4L 320 PR222DS-LSIG	320	85	1380,00
Kompensointi	T5L 630 PR222DS-LSIG	630	85	1610,00
185 kW	T4L 250 PR222DS-LSIG	250	85	1110,00
185 kW	T4L 250 PR222DS-LSIG	250	85	1110,00
185 kW	T4L 250 PR222DS-LSIG	250	85	1110,00
55 kW	T4L 250 TMA80-800	80	85	449,00
55 kW	T4L 250 TMA80-800	80	85	449,00
75 kW	T4L 250 TMA 125-1250	125	85	454,00
75 kW	T4L 250 TMA 125-1250	125	85	454,00
45 kW	T4L 250 TMA80 - 800	80	85	449,00
			Yhteensä €	21441,00

Verrattaessa taulukoita 18 ja 19 huomataan, että katkaisijoiden kohdalla suurimmat muutokset ovat tapahtuneet katkaisijoiden nimellisvirroissa. Katkaisijoiden runkoko ei muuttunut, koska muuntajalta tulevan syöttökiskoston uudelleen mitoitus 3,2 kA kiskosta 2,5 kA kiskoon vaikuttaa jännitteenjakelukeskuksen kiskoston oikosulkuvirtaan erittäin vähän. Kiskoston uudelleen mitoituksen vaikutukset jakelukeskuksen kiskoston oikosulkuvirtaan ovat nähtävissä taulukossa 17.

Lämpötilan nostaminen ei vaikuttanut muuntajalta tulevan kiskoston poikkipinta-alaan, jolloin ei myöskään jakelukeskuksen kiskoston oikosulkuvirrassa tapahtunut muutosta. Oikosulkuvirtojen pysyminen ennallaan, mahdollistaa DOC:n taulukkoon 19 määrittelmien katkaisijoiden käytön korkeamassa lämpötilassa. Keskusten suojalaitteiden kohdalla lämpötilan nostaminen vaikuttaa ensimmäisenä alakeskusten komponentteihin. Lämpötilan nostaminen heikensi kaapeleiden kuormitettavuutta, joka näkyi osassa jakelukeskuksen ja alakeskusten välisissä kaapeloinneissa. Kuten taulukosta 17 nähdään, alakeskuksen E kiskostossa 40 °C lämpötilassa suurimman oikosulkuvirran suuruus on 27,1 kA, jolloin voidaan käyttää taulukon 16 mukaan runkokoon S katkaisijoita, joiden äärimmäisen oikosulunkatkaisukyky on 30 kA. Lämpötilan nostaminen 45 °C kasvattaa alakeskuksen E syöttökaapelin poikkipinta-alaa taulukoiden 14 ja 15 mukaan 50 mm<sup>2</sup> kaapelista 70 mm<sup>2</sup> kaapeliin. Kaapelin poikkipinta-alan johdosta kiskoston suurin oikosulkuvirta kasvaa 31 kA, jolloin esimerkiksi katkaisijoiden valinnassa joudutaan tau-

lukon 16 mukaan käyttämään runkokoon H katkaisijoita. Alakeskuksen kiskoton oikosulkuvirran nouseminen vaikuttaa, myös muihin alakeskuksen sisältämien komponenttien valintaa, kuten esimerkiksi moottorinsuojakytkimiin.

#### 4.5 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensointi laitteisto koostui 6 kpl 50 kVAr kondensaattoriparistoja, jotka kytkeytyvät automaattisesti loistehon kompensointi tarpeen mukaan. DOC tarkastelussa aseteltiin kompensointi kuvassa 12 esitetyn valintataulukon kautta.

Syötön ominaisuudet

Kondensaattoriparistot (-C1) | PJ-kaapeli (-WC19) | Katkaisija (-QF35)

Käyttäjä

LLL 480 [V]  
TN-S 60 [Hz]

Laskettu jännite 480.5557 [V]  
Maks. dV 4 [%]  
Laskettu dV 0 [%]

Todellinen tehokerroin  $\cos\varphi_n$  1  
Kapastiivinen loisteho  $Q_n$  300 [kVAr]

Laske

Symboli <oletus>

OK Peruuta

KUVA 12. Loistehon kompensoinnin asettelu

Valintaikkunan kautta on mahdollista laskea laitteiston tarvitseman kompensoinnin tarve syöttämällä haluttu tehokerroin. Opinnäytetyössä loistehon kompensointi määritettiin syöttämällä kapasitiiviseksi loistehoksi 300 kVAr. Jakelukeskuksen kiskoston tehokertoimena kompensointi laitteiston kytkemisen jälkeen on 1. Kun loistehon kompensointilaitteisto poistettiin järjestelmästä, tehokertoimeksi saatiin 0,98.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tehtaan olosuhteet on arvioitu karkeasti ja tästä syystä lämpötilan nostamisella pyrittiin hakemaan laitteiston mitoituksen luotettavuutta. DOC:n toteuttamat mitoitukset perustuivat IEC:n laatimiin standardeihin. Opinnäytetyössä käsin laskemalla haetut arvot vastasivat likimain DOC:n laskemia tuloksia. Kuitenkin tarkempaa tarkastelua tulisi tehdä muun muassa komponenttien vaikutuksesta laitteiston oikosulkuvirtoihin. Yhdysvaltojen 480 V jännitetaso aiheutti DOC:n kanssa ongelmia ja varsinkin oikean kokoisten moottorinsuojakytkimien valinta ei onnistunut toivotulla tavalla. Jännitetaso rajaa ABB:n tuotteita, jolloin oikean oikosulkukestoisuuden valinta ei DOC:lla onnistunut, vaan kaikissa katkaisijoissa on tarkastelussa käytetty samaa 85 kA oikosulkukestoisuuden arvoa. Katkaisijoita ja kaapeleita tarkasteltaessa DOC mitoitti osan laitteistosta alkuperäistä pienemmäksi, jolloin myös oikosulkuvirrat alenivat järjestelmän eriosissa. Oikosulkuvirran alentuminen selittyy uudelleen mitoitetujen jakelukeskukselta lähtevien katkaisijoiden ja kaapeleiden kokoluokan pienenemisellä, koska komponentit rajoittavat oikosulkuvirtaa. Alentunut oikosulkuvirta mahdollistaa muun muassa runkokooltaan pienempien moottorinsuojakytkimien käytön.

DOC –laskentaohjelmistolla ei ole mahdollista mallintaa taajuusmuuttajakäyttöjä. Tästä syystä jakelukeskukselta syötetyt taajuusmuuttajakäytöt on DOC tarkastelussa mallinnettu suoraan verkkoon kytkettyinä (D.O.L) käyttöinä. Näiden osalta saadut tulokset ovat todennäköisesti normaalia suuremmat, koska taajuusmuuttajakäytöt rajoittavat muun muassa moottoreiden käynnistysvirtaa. Toinen taajuusmuuttajien ominaisuus on estää moottoreiden toimiminen verkkoa kuormittavina generaattoreina. Muun verkon tarkastelun ajaksi suorat moottori käytöt muutettiin yleiseksi kuormitukseksi jakelukeskukselle. Muutoksen johdosta jakelukeskuksen suurin oikosulkuvirran arvo pieneni.

Jakelujärjestelmän uudelleenmitoituksen tulokset alensivat eniten katkaisijoiden kokoluokitusta, tämä myös näkyy selkeästi katkaisijoiden kustannusten pienenemisellä. Tuloksia verratessa on kuitenkin muistettava, että laitteiston suunnittelussa on huomioitava muutkin laitoksen osa-alueet, kuin mitkä opinnäytetyöhön on rajattu. Myös mahdollinen prosessin laajeneminen tulee huomioida, eikä tästä syystä laitteiston mitoittamista ääri-rajalle ole suotavaa. Mielestäni opinnäytetyön tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, joita tulevaisuuden projekteissa on hyvä ottaa huomioon.

## LÄHTEET

ABB:n TTT –käsikirja 2000-07

ABB:n Pienjännitekojehinnasto, 2013

AWG kaapeleiden muunnostaulukko

[http://www.hmwire.com/New%20PDFs/American\\_Wire\\_Gauge\\_to\\_Square\\_mm\\_Cross\\_Sectional\\_Area\\_Chart\\_1.3.15.10.pdf](http://www.hmwire.com/New%20PDFs/American_Wire_Gauge_to_Square_mm_Cross_Sectional_Area_Chart_1.3.15.10.pdf)

CENELEC CLC/TR 50480 2011, Determination of cross-sectional area of conductors and selection of protective devices. Suom. Suomen standardisoimisliitto SFS Ry

ESFI. Luettu 14.05.2013

[http://www.esfi.org/index.cfm/page/National-Electrical-Code-\(NEC\)/pid/10860](http://www.esfi.org/index.cfm/page/National-Electrical-Code-(NEC)/pid/10860)

IEC-60909 -0 Short-circuit currents in three-pase a.c systems, Part 0: Calculations of currents, 2001

IEC-60909 -1 Short-circuit currents in three-pase a.c systems, Part 1: Factors for the calculation of short-circuit current according IEC 60909-0, 2002

Janhunen Matti, Diplomityö, Sellutehtaan varavoimajärjestelmän mitoitus ja teknista-loudellinen vertailu 400 ja 690 voltin jännitteillä, 2004

Järvinen J. specialist. 2013. Haastattelu 29.05.2013. Haastattelija Sipiläinen, N. Tampe-re

Lakervi, E. Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki, Otatieto Oy  
Meinhart Katalog, Cables and wires, 2009

Pulkkinen Jani, Opinnäytetyö, Teollisuuden kompensointi ja yliaaltosuodatus, 2012

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40659/Pulkkinen\\_Jani.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40659/Pulkkinen_Jani.pdf?sequence=1)

Saarela Joonas, Opinnäytetyö, Pienjännitekatkaisijoiden säätö, 2011

Sesko Ry. Luettu 09.04.2013

<http://www.sesko.fi/portal/fi/standardisointijarjestelma/iec/>

ST-Käsikirja 20, Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät, Sähkötieto Ry. Luettu 11.04.2013

ST-kortisto, ST–kortti 51.14, Jakelukiskojärjestelmät, 2008

ST-kortisto, ST–kortti 52.15, Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa, 2004

ST-kortisto, ST–kortti 52.16, Kompensointi- ja yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus sähköverkossa, 2004

ST-kortisto, ST–kortti 53.13, Kiinteistön sähköverkon selektiivisyys, 2008

ST-kortisto, ST-kortti 53.24, Ohjeita kiinteistöjen enintään 1000 V johtojen mitoituksen ja suojaukseen, 2008

ST-kortisto, ST-kortti 53.45 Sulakkeeton suojaus, 2004

Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2012. SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset. Luku 433.4. Rinnankytkettyjen johtimien ylikuormitussuojaus

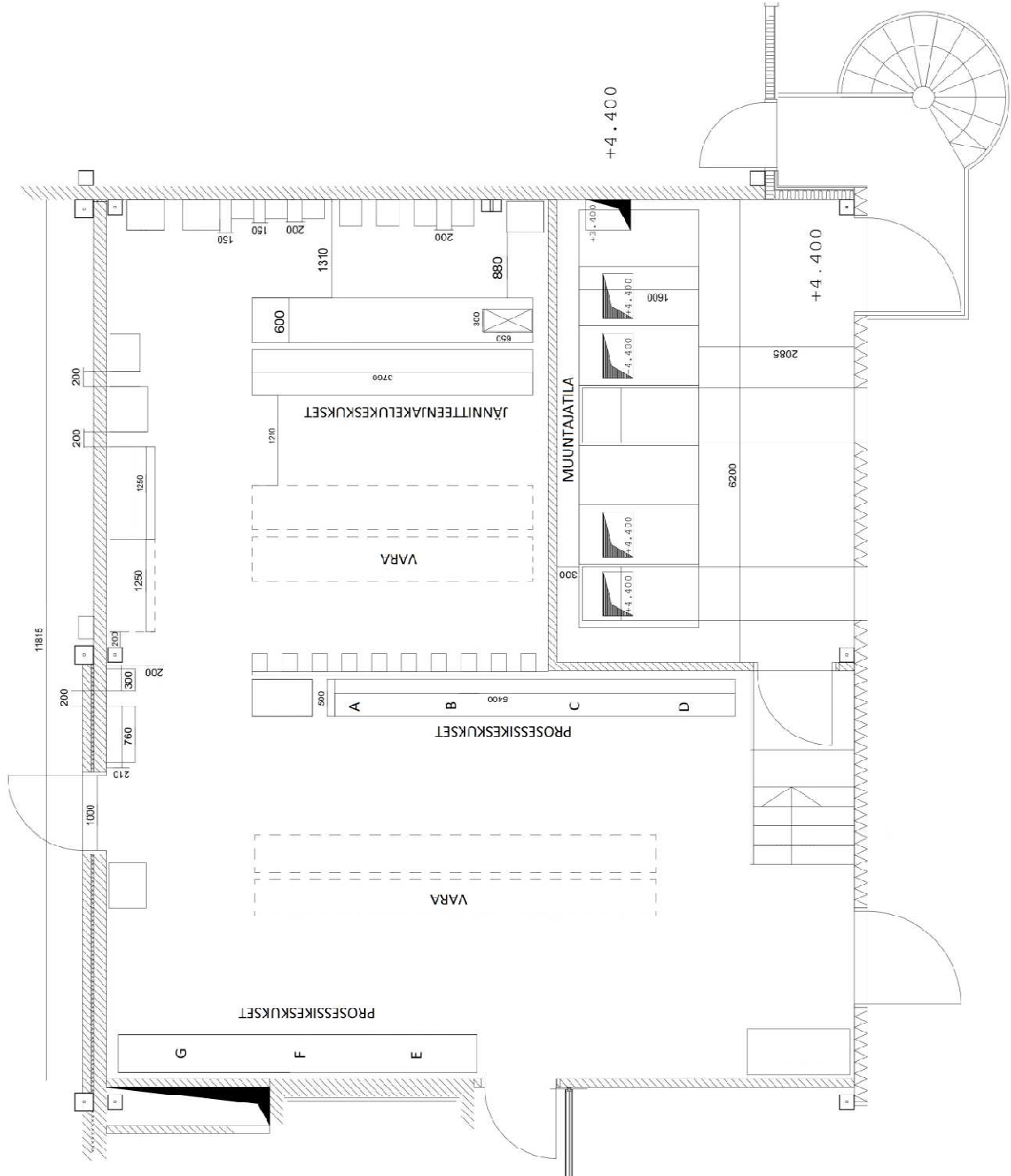
Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2012. SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset. Luku 434.4. Rinnankytkettyjen johtimien oikosulkusuojaus

Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2008. SFS 60204 Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteistot. Osa 32: Vaatimukset nostokoneille

Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry, 2012. EN 60947-2, Pienjännitekytkinlaitteet, Osa 2: Kytkinlaitteet

## LIITTEET

## Liite 1. Sähkötötilan pohjapiirustus



## Liite 2. AWG –kaapeleiden muunnostaulukko

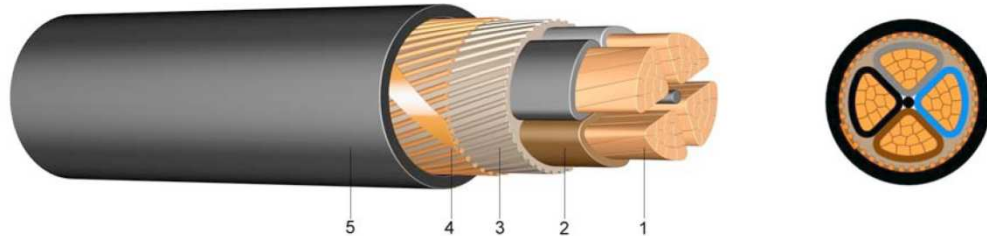
<b>HM Wire International, Inc.</b> <b>Ph: 330-244-8501 Fax: 330-244-8561</b> <b>www.litz-wire.com info@litz-wire.com www.hmwire.com</b>			
<b>AMERICAN WIRE GAUGE TO SQUARE MM CROSS SECTIONAL AREA CHART</b>			
AWG	DIAMETER (IN)	DIAMETER (MM)	CROSS SECTIONAL AREA (MM <sup>2</sup> )
0000	0.46	11.68	107.16
000	0.4096	10.40	84.97
00	0.3648	9.27	67.4
0	0.3249	8.25	53.46
1	0.2893	7.35	42.39
2	0.2576	6.54	33.61
3	0.2294	5.83	26.65
4	0.2043	5.19	21.14
5	0.1819	4.62	16.76
6	0.162	4.11	13.29
7	0.1443	3.67	10.55
8	0.1285	3.26	8.36
9	0.1144	2.91	6.63
10	0.1019	2.59	5.26
11	0.0907	2.30	4.17
12	0.0808	2.05	3.31
13	0.072	1.83	2.63
14	0.0641	1.63	2.08
15	0.0571	1.45	1.65
16	0.0508	1.29	1.31
17	0.0453	1.15	1.04
18	0.0403	1.02	0.82
19	0.0359	0.91	0.65
20	0.032	0.81	0.52
21	0.0285	0.72	0.41
22	0.0254	0.65	0.33
23	0.0226	0.57	0.26
24	0.0201	0.51	0.20
25	0.0179	0.45	0.16
26	0.0159	0.40	0.13
27	0.0142	0.361	0.10
28	0.0126	0.330	0.08
29	0.0113	0.287	0.065
30	0.0100	0.254	0.05
31	0.0089	0.226	0.04
32	0.0080	0.203	0.032
33	0.0071	0.180	0.025

This is to be used as a guideline only.

Copyright 2010 Hm Wire International R.1.3.15.10

**NYCWY****PCV Insulated Heavy Current Cable  
with Concentric Conductor****Application:**

In dry, humid and wet locations, cable ducts, outdoors, underground and in water.

**Construction:**

- 1 ..... solid or stranded bare copper wire
- 2 ..... core insulation of polyvinylchloride (PVC)
- 3 ..... PVC core covering
- 4 ..... concentric conductor of copper wires and copper tape applied helically
- 5 ..... outer sheath of polyvinylchloride (PVC), black

**Standards:**

DIN VDE 0276-603  
 HD 627 S1:1996 part 1 4H1, 4H2.7H  
 DIN EN 60228 class 1 and 2 (construction)  
 HD 308 S2 (core identification)

**Technical data:**

Nominal voltage U <sub>0</sub> /U		[V]	600 / 1000 Volt
Test voltage		[V] <sub>AC</sub>	4000
Temperature range	in motion fixed		- 5°C till +70°C -20°C till +70°C
Operating temperature	short circuit max.	°C	160
Short circuit time		[sec]	5
Bending radius	one time / fixed	x diameter	12
Bending radius	in motion	x diameter	15
Flammability	standard		EN 60332-1-2

Number of cores and nominal cross section	Price	Copper figure	Overall diameter	Weight	Current carrying capacity ground	Current carrying capacity air
2 x 10 RE/ 10	<b>4.643,60</b>	325	19	660	79	60
3 x 10 RE/ 10	<b>5.447,66</b>	425	20	760	79	60
3 x 16 RE/ 16	<b>7.414,10</b>	670	22	1.040	102	80
3 x 25 RM/ 16	<b>11.576,64</b>	940	26	1.490	133	108
3 x 25 RM/ 25	<b>12.185,68</b>	1.045	26	1.580	133	108
3 x 35 SM/ 16	<b>12.902,18</b>	1.240	27	1.800	160	132
3 x 35 SM/ 35	<b>14.654,56</b>	1.460	29	1.880	160	132
3 x 50 SM/ 25	<b>17.344,76</b>	1.795	30	2.260	190	160
3 x 50 SM/ 50	<b>18.970,95</b>	2.083	31	2.460	190	160
3 x 70 SM/ 35	<b>23.109,57</b>	2.510	33	3.060	234	202
3 x 70 SM/ 70	<b>25.792,34</b>	2.913	34	3.310	234	202
3 x 95 SM/ 50	<b>30.477,79</b>	3.433	38	4.080	280	249
3 x 95 SM/ 95	<b>34.141,68</b>	3.949	40	4.510	280	249
3 x 120 SM/ 70	<b>39.092,43</b>	4.413	42	5.040	319	289
3 x 120 SM/120	<b>43.222,01</b>	4.985	43	5.490	319	289

## Liite 3. Meinhart katalogi, NYCWY –kaapelin valintataulukko

2(2)

<b>Number of cores and nominal cross section</b>	<b>Price</b>	<b>Copper figure</b>	<b>Overall diameter</b>	<b>Weight</b>	<b>Current carrying capacity ground</b>	<b>Current carrying capacity air</b>
<b>mm<sup>2</sup></b>	<b>EUR / km</b>	<b>kg/km</b>	<b>appr. mm</b>	<b>appr. kg / km</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
3 x 150 SM/ 70	<b>44.237,00</b>	5.313	46	6.040	357	329
3 x 150 SM/150	<b>50.479,00</b>	6.219	47	6.750	357	329
3 x 185 SM/ 95	<b>55.513,09</b>	6.649	51	7.510	402	377
3 x 240 SM/120	<b>71.499,46</b>	8.585	57	9.640	463	377
4 x 10 RE/ 10	<b>7.062,13</b>	525	21	890	79	60
4 x 16 RE/ 16	<b>9.280,41</b>	829	23	1.240	102	80
4 x 25 RM/ 16	<b>12.621,43</b>	1.190	28	1.800	133	108
4 x 35 SM/ 16	<b>16.138,60</b>	1.590	28	2.130	160	132
4 x 50 SM/ 25	<b>20.684,08</b>	2.295	33	2.870	190	160
4 x 70 SM/ 35	<b>29.139,02</b>	3.210	36	3.870	234	202
4 x 95 SM/ 50	<b>38.716,06</b>	4.383	43	5.303	280	249
4 x 120 SM/ 70	<b>45.946,91</b>	5.613	46	6.380	319	289
4 x 150 SM/ 70	<b>54.175,63</b>	6.813	51	7.730	357	329
4 x 185 SM/ 95	<b>67.435,82</b>	8.499	57	9.770	402	377
4 x 240 SM/120	<b>88.297,20</b>	10.913	64	12.540	463	443

<p><b>Customer:</b> <b>Project:</b></p>	<p><b>Elomatic Oy</b> <b>54313 Opinnäytetyö</b></p>
<p><b>Notes:</b></p>	
<p><b>Designed by:</b></p>	<p>N.Sipiläinen</p>

Rev. n°1	Call:	22.05.2013
Rev. n°2	Drafter:	
Rev. n°3	Design:	N.Sipiläinen
REVISIONS	Date:	Signature

Calculator:	DOC
Filename:	
Record #:	

**Calculation and dimensioning criteria**

Calculation method-standard	IEC 60909-1
Standard for cable dimensioning	IEC 60364
Overload	Overload verifications are made according the following relations: $I_b \leq I_n \leq I_z$ and $I_2 \leq 1,45 \cdot I_z$ Legend: $I_b$ = the current for which the circuit is designed $I_n$ = nominal current of the protective device (For adjustable protective devices, the nominal current $I_n$ is the current setting selected). $I_2$ = current ensuring effective operation in the conventional time of the protective device $I_z$ = cable carrying capacity according the chosen standard
Short Circuit	Circuit breakers and fuses are dimensioned with a breaking capacity higher than the maximum short circuit current in the point of installation Circuit breakers dimensioned according to IEC 60497-2 are also chosen with the making capacity $I_m$ higher than the maximum peak current The protection against short circuit must satisfy the rule $I_2 I \leq K^2 S^2$ Legend: $I_2 I$ = let-through energy at the maximum short circuit current (defined by the producer) $S$ = size of the conductors $K$ = factor defined in IEC60364-4-43 table 43A and IEC60364-5-54 tables A.54.2, A.54.4 and A-54.5
Indirect touch	TT systems: the verification is $I_{dn} \cdot R_t \leq V_o$ , or $I_m \leq I_k \cdot \min$ TN systems: the verification is $I_m \leq I_k \cdot \min$ Legend: $I_{dn}$ = sensitivity of the residual current device $R_t$ = earthing resistance $V_o$ = max admitted contact voltage $I_m$ = tripping value of the protective device at time limit $I_k \cdot \min$ = minimum short circuit current at line end
Discrimination and Back-up	The discrimination and back-up values are determined by the producer with laboratory tests

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

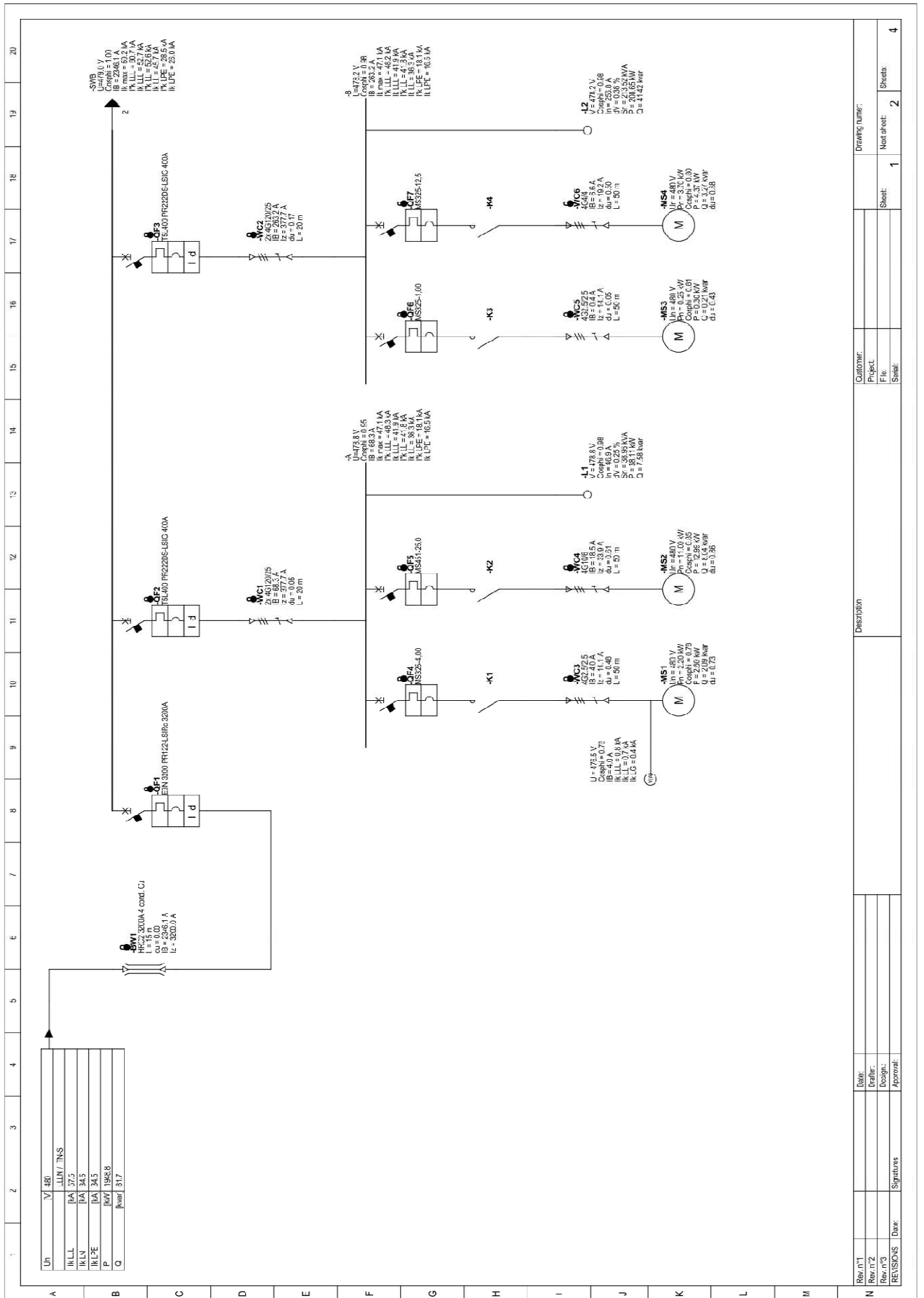
**Short-circuit calculation hypothesis for IEC 60909-0**

<b>Calculation algorithm</b>	
The calculation of maximum and minimum, balanced and unbalanced, short-circuit currents is made by application of symmetrical components.	
<b>General conditions</b>	
The calculation of maximum and minimum short-circuit currents is based on the following simplifications.	
a) For the duration of the short circuit there is no change in the type of short circuit involved (a three-phase short circuit remains three-phase)	
b) For the duration of the short circuit, there is no change in the network involved.	
c) The impedance of the transformers is referred to the tap-changer in main position.	
d) Arc resistances are not taken into account.	
e) All line capacitances and shunt admittances and non-rotating loads, except those of the zero-sequence system, are neglected.	
<b>Maximum short-circuit currents</b>	
In the calculation of maximum short-circuit currents, the following conditions have been considered:	
- it is applied the voltage factor $c_{max}$ according to table 1, IEC 60909-0	
=- It is chosen the network configuration which lead to the maximum value of short-circuit current at the short-circuit location	
- the contribution of asynchronous motors is considered if their contribution is higher than 5% of the initial short-circuit current calculated without motors	
- resistance RL of lines (overhead lines and cables) are introduced at a temperature of 20 °C	
<b>Minimum short-circuit currents</b>	
In the calculation of minimum short-circuit currents, the following conditions have been considered:	
- it is applied the voltage factor $c_{min}$ according to table 1, IEC 60909-0	
=- It is chosen the network configuration which lead to the minimum value of short-circuit current at the short-circuit location	
=- the contribution of asynchronous motors is neglected	
- resistance RL of lines (overhead lines and cables) are introduced at a temperature of 80 °C	

Rev. n°1	Date:	Description		Customer:	Drawing number	
Rev. n°2	Creator:			Project:	Sheet	Shalls:
Rev. n°3	Design:			File:	1	
REVISIONS	Date:	Signature:	Approval:	Serial:		

Liite 4. Alkuperäinen jännitteenjakaavaio

4(8)



Rev n°1	Date:	Description	Customer:	Drawing name:
Rev n°2	Drifte:		Project:	
REVISIONS	Design:		Sheet:	1
	Approval:		Next sheet:	2
	Signature:		Sheets:	4
	Date:			







**Distribution**

Reference voltage	[V]	480
Circuit		.LLN
Distribution system		TN-S
Active power P	[kW]	1948.78
Reactive power Q	[kvar]	81.73
I <sub>b</sub> (A)	[A]	2346.08
Power factor Cosφ <sub>i</sub>		1.00

Symmetrical short circuit current I <sub>k</sub> LLL	[kA]	57.53
Line-Neutral short circuit current I <sub>k</sub> LN	[kA]	34.52
Line-Ground short circuit current I <sub>k</sub> LPE	[kA]	34.52
C <sub>ritik</sub>		1.10
Resistance at Reference voltage	[mOhm]	0.530
Reactance at Reference voltage	[mOhm]	5.273
Impedance at Reference voltage	[mOhm]	5.299

Rev r1	Date:		Description	Customer: Project: File: Serial:	Drawing number:
Rev r2	Date:				
Rev r3	Date:				
REVISIONS	Signatures	Approval:	Sheet:	Next sheet:	Sheets:
			1	1	1