

Mika Koskela

JÄNNITTEENJAKELUN MITOITUS PROSESSITEOLLISUUDESSA

Sähkökeskusten oikosulkukestoisuus

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Maaliskuu 2019**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Maaliskuu 2019	Tekijä/tekijät Mika Koskela
Koulutusohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn nimi JÄNNITTEENJAKELUN MITOITUS PROSESSITEOLLISUUDESSA. Sähkökeskusten oikosulkukestoisuus		
Työn ohjaaja Joni Jämsä	Sivumäärä 40 + 4	
Työelämäohjaaja Kenneth Grankull		
<p>Opinnäytetyö tilaajana toimi Apex Automation Oy, jonka toimipaikka on Kokkolassa. Apex Automation Oy on vuonna 1993 perustettu teollisuuden automaatioon erikoistunut suunnittelutoimisto, joka työllistää yli 50 alan ammattilaista.</p> <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin prosessiteollisuuden jännitejakeluun ja sen mitoitukseen liittyvään teoriaan. Työssä keskityttiin oikosulkuvirtoihin, joiden rasitukset on sähkökeskusten kestettävä. Työssä on käsitelty verkon suojalaitteita, keskusten ja virtakiskojen oikosulkukestoisuutta, selektiivisyystarkastelua ja sulakkeiden ominaisuuksia.</p> <p>Työssä on myös käsitelty esisuunnittelussa ja mitoituksessa apuna käytetyn Siemens SIMARIS – ohjelman suunnittelua ja ohjelmasta saatujen tulosten vertailua käsin laskettuihin arvoihin. Myös ohjelman luotettavuutta on arvioitu saatujen tulosten perusteella. Saatujen tulosten pohjalta voitiin todeta, että SIMARIS – ohjelma on laskennassa luotettava, mutta puutteitakin ohjelmassa on. Ohjelmaa voi suunnittelussa hyödyntää, jos tiedostaa sen laskentatavat.</p> <p>Opinnäytetyö liittyi toteutettuun prosessiteollisuusprojektiin, jossa suunniteltiin sähkönjakelu ja automaatio sisältäen laitetoimitukset sähkökeskusten ja automaation osalta. Tämän opinnäytetyön perimmäinen tarkoitus oli tuottaa ohjeistus jännitejakelun mitoitukseen, jonka mukaan voidaan mitoittaa jännitteenjakelepiirit prosessikeskuksessa.</p> <p>Opinnäytetyön pohjalta voitiin tarkentaa vaatimuksia tuleville projekteille, jotta keskuksset voidaan merkitä oikosulkukestoisuuden kannalta standardin määrittämällä tavalla.</p>		

Asiasanat

Jännitteenjakele, oikosulkukestoisuus, oikosulkuvirta, SIMARIS, sulakkeen virranrajoitus

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date March 2019	Author/s Mika Koskela
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis PLANNING OF VOLTAGE DISTRIBUTION IN THE PROCESS INDUSTRY. Short-circuit resistance of electric cabinets		
Instructor Joni Jämsä	Pages 40 + 4	
Supervisor Kenneth Grankull		
<p>The thesis was commissioned by Apex Automation Oy, based in Kokkola. Founded in 1993, Apex Automation Oy is an industrial automation company that employs over 50 professionals.</p> <p>The thesis explored the voltage distribution of the process industry and the theory related to its dimensioning. The work focused on short-circuit currents, the stresses of which must be borne by the power centers. Network protection devices, short-circuit resistance of switches and busbars, selectivity analysis and fuse characteristics have been discussed.</p> <p>The design of Siemens SIMARIS software used in pre-design and dimensioning and the comparison of the results obtained from the program with the manually calculated values have also been discussed. The reliability of the program has also been assessed on the basis of the results obtained. On the basis of the results, it was found that the Simaris program is reliable in the calculation, but there are also shortcomings in the program. The program can be utilized in design if one is aware of its calculation methods.</p> <p>The thesis was related to the implemented process industry project, which planned the distribution of electricity and automation, including equipment deliveries for power centers and automation. The ultimate purpose of this thesis was to provide guidelines for voltage distribution dimensioning, according to which voltage distribution circuits can be dimensioned in the process center.</p> <p>On the basis of the thesis, the requirements for future projects could be specified to enable the centers to be marked in terms of short-circuit resistance as defined by the standard.</p>		

<p>Key words Current limiting, voltage distribution, short-circuit current, short-circuit limitation by fuse, SIMARIS</p>
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

φ	Vaihe-ero, vaihesiirtymä [°]
ΔU	Jännitteenalenema [V]
I_C	Oikosulkuvirta [A]
I_{CC}	Suojalaitteella rajoitettu oikosulkuvirta [A]
I_P, I_{CP}	Prospektiivinen oikosulkuvirta [A]
I_{CW}	Keskuksen tai komponentin lyhytaikainen oikosulkuvirran kesto [A]
I_K	Pysyvän oikosulun tehollisarvo [A]
I_K''	Oikosulkuvirran tehollisarvo symmetrisen oikosulun syntyhetkellä [A]
I_{knet}	Verkon oikosulkuvirta [A]
I_N	Nimellisvirta [A]
I_{pk}	Dynaaminen oikosulkuvirta [A]
I_{th}	Lyhytkestoinen termisen oikosulkuvirta [A]
k	kerroin, sysäyskerroin
n	kerroin, dynaamisen ja termisen oikosulkuvirran suhde
ρ	Resistiivisyys [$\mu\Omega$ m]
P_{cu}	kuparihäviöt [W]
r	johtimen ominaisresistanssi [Ω /m]
R_C	Johtimen resistanssi [Ω]
R_M	Muuntajan resistanssi [Ω]
R_{net}	Verkon resistanssi [Ω]
S_{net}	Verkon näennäisteho [VA]
U	Pääjännite [V]
u_k	Muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi [%]
U_N	Nimellisjännite [V]
U_{net}	Verkon pääjännite [V]
x	johtimen ominaisreaktanssi [Ω /m]
X_C	Kaapelin reaktanssi [Ω]
X_M	Muuntajan reaktanssi [Ω]
X_{net}	Verkon reaktanssi [Ω]
Z_m	Muuntajan impedanssi [Ω]
Z_{net}	Verkon impedanssi [Ω]

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
ESIPUHE
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 OIKOSULKUVIRTALASKENTA	2
2.1 Jakeluverkon lähtötiedot	2
2.1.1 Syöttävä verkko	3
2.1.2 Jakelumuuntaja.....	4
2.2 Kaapelit virtapiirissä	5
2.2.1 Kaapelin resistanssit.....	5
2.2.2 Kaapelin reaktanssit.....	6
2.3 Oikosulkuvirrat	7
2.3.1 Yleistä oikosulkuvirroista	7
2.3.2 Oikosulkuvirta I_C	8
2.3.3 Prospektiivinen oikosulkuvirta I_P	9
2.3.4 Dynaaminen oikosulkuvirta I_{pk}	10
2.3.5 Terminen oikosulkuvirta I_{th} ja I_{CW}	11
2.3.6 Ehdolliset oikosulkuvirrat $I_{CC,th}$ ja $I_{CC,dyn}$	12
2.3.7 Komponentin oikosulkukestoisuusvaatimuksen pienentäminen	12
2.4 Jännitteenalenema	13
3 SUOJAUS	15
3.1 Sulakkeellinen suojaus	15
3.1.1 Tulppasulakkeet.....	15
3.1.2 Kahvasulakkeet.....	16
3.1.3 Sulakkeen virranrajoitus	17
3.1.4 Sulakkeen I^2t – arvot.....	18
3.2 Sulakkeeton suojaus.....	19
3.2.1 Johdonsuojakatkaisijat	19
3.2.2 Katkaisijat ja suojaireleet.....	19
3.2.3 Moottorinsuojakatkaisijat.....	21
3.3 Selektiivisyys.....	21
3.4 Poiskytkennän ehdon toteutuminen.....	22
4. KESKUKSEN OIKOSULKUKESTOISUUS	23
4.1 Oikosulkurasitukset	23
4.2 Virtakiskot keskuksessa.....	23
4.3 Oikosulkukestoisuus	25
4.4 Keskuksen oikosulkukestoisuuden merkitseminen	26
5. SOVELTAMINEN SUUNNITTELUSSA	29
5.1 Lähtötiedot.....	29
5.2 Nimellisvirran määrittely	30
5.3 Oikosulkuvirran määrittely	30
5.4 Syöttöpiirin rakenne keskuksessa.....	30
5.5 Komponentin I^2t tarkastelu.....	31
5.6 Oikosulkuvirran rajoittaminen.....	31

5.7 Selektiivisyystarkastelu	32
6 SIEMENS SIMARIS – MITOITUSOHJELMA	34
6.1 Yleistä SIMARIS – ohjelmasta	34
6.2 Vertailu laskentaan.....	35
6.3 Luotettavuus.....	36
7 POHDINTA.....	37
LÄHTEET	39
LIITTEET	
LIITE 1. Kaapelien sähköisiä arvoja	
LIITE 2. Virtakiskojen jatkuva kuormittaminen	
LIITE 3. gG -sulakkeiden toimintavirrat	
LIITE 4. Vertailulaskenta SIMARIS – ohjelman kanssa	
KUVIOT	
KUVIO 1. Sijaiskytkennän laskenta	2
KUVIO 2. Oikosulkuvirran kuvaaja vaihtosähköpiirissä.	8
KUVIO 3. 500V gG-kahvasulakkeen toiminta-ajat.	16
KUVIO 4. 500V gG-sulakkeen virran huippuarvot.....	17
KUVIO 5. 500V gG-sulakkeen I^2t -arvot.....	18
KUVIO 6. Kompaktin katkaisijan katkaisutapahtuma	20
KUVIO 7. Ylivirtasuojien toimintakäyrät, esimerkkitapaus.....	22
KUVIO 8. Kiskoston standardin mukainen korjauskerroin k_2	24
KUVIO 9. Virtakiskon kannattimien välisen etäisyyden vaikutus oikosulkukestoisuuteen.....	25
KUVIO 10. Periaatteellinen sähkönjakelukaavio	29
KUVAT	
KUVA 1. Esimerkki keskuksen tyyppikilven merkinnöistä	27
KUVA 2. Esimerkki keskuksen tyyppikilven merkinnöistä	28
KUVA 3. Selektiivisyyskuvaaja tarkasteltavalta kulutuskojeelta	33
KUVA 4. SIMARIS-ohjelman käyttöliittymä	35
TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Johtimen resistiivisyys	6
TAULUKKO 2. Dynaamisen oikosulkuvirran määrittäminen kertoimella n	11
TAULUKKO 3. Laskentatulosten vertailu	35

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on keskeisten jännitejakelun mitoitusperusteiden läpikäyminen prosessiteollisuuden automaatioprosessin mitoittamiseksi. Opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Apex Automation Oy:n kanssa. Opinnäytetyö toteutettiin automaatioprosessin sähkösuunnittelun yhteydessä siten, että tässä työssä esitetyjä laskentakaavoja ja mitoitusarvoja käytettiin todellisen teollisuusprosessien mitoituksessa. Opinnäytetyön kirjallisesta osuudesta tehdään yrityksen sisäiseen käyttöön erillinen ohjeistus, jonka tarkoituksena on opastaa oikosulkuvirtojen laskennassa ja keskuksen oikosulkukestoisuuden määrittämisessä.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään jännitteenjakeluverkon mitoitusta ja oikosulkuvirtojen laskentaa alkaen pienjänniteliittymän muuntamolta. Työssä käsitellään sulakkeellista ja sulakkeetonta suojausta, virtakiskosten mitoitusta sekä selektiivisyystarkastelua. Opinnäytetyössä käsitellään jännitejakelun teorian lisäksi myös Siemens SIMARIS – mitoitusohjelmaa, joka on verkonmitoituksen suunnitteluohjelma. Työssä verrataan SIMARIS – ohjelman antamia raportteja ja mitoitustuloksia laskennalla saatuihin mitoitusarvoihin. Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, miten luotettava ja millaisia tuloksia SIMARIS – ohjelma antaa käyttäjälleen ulos. Yksi työn tavoitteista olikin ohjelman hyödynnettävyyden selvittäminen suunnittelutyössä.

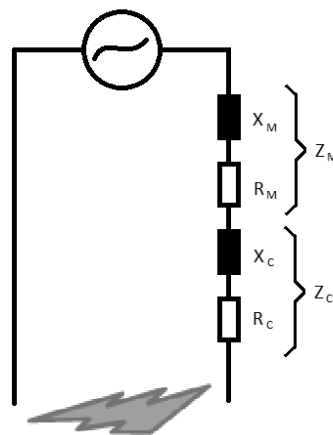
Yksi tämän työn keskeinen asia on sulakkeen laukaisukäyrien tulkinta, jossa tutkitaan sulakkeen oikosulkuvirtaa rajoittavaa ominaisuutta ja sen hyödyllisyyttä suurien oikosulkuvirtojen rajoittajana. Yksi oleellinen osa tätä aihetta on myös keskuksen leimattavien oikosulkuvirtojen selvittäminen.

Käytännön toteutuksesta on kerrottu luvussa viisi, jossa käsitellään jännitteenjakelun suunnittelun mitoitusta ja komponenttivalintoja. Komponenttivalintoihin vaikuttavat tekijät on pyritty mitoittamaan ja perustelemaan.

2 OIKOSULKUVIRTALASKENTA

Tässä luvussa käsitellään jännitteenjakeluverkon teoriaa oikosulkuvirtojen laskennan kannalta. Teoriassa on mukana kaavoja, jotka ovat tarpeellisia oikosulkuvirtojen laskennassa ja jännitteenjakelun suunnittelussa.

Verkon mitoitukseen on olemassa useita tapoja, joilla päästään haluttuun lopputulokseen. Mitoitus voidaan tehdä laskemalla tai tietokoneohjelmalla. Tietokoneohjelmalla mitoittaessa voidaan käyttää siihen käyttöön suunniteltuja ohjelmistoja, joista esimerkkinä Siemens SIMARIS, FebDok, Doc2 ja Schneider Ecodial Advanced Calculator. Myös myynnissä olevia Excel-pohjaisia laskentaohjelmia on saatavilla. Siemens SIMARIS –ohjelmaa käsitellään lähinnä luvussa 6. Laskemalla yleinen tapa on käyttää sähköisen sijaiskytkennän laskentatapaa, jolla päästään mitoituksen kannalta riittävän tarkkaan lopputulokseen. Laskentatavan perusperiaate on esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1. Sijaiskytkennän laskentatapa (mukaillen Ensto 2008)

2.1 Jakeluverkon lähtötiedot

Laskettaessa piirin oikosulkuvirtoja ja mitoittaessa jännitteenjakeluverkkoa tarvitaan lähtötiedot jostain jakeluverkon pisteestä. Tyypillisesti tiedot annetaan joko jakelumuuntajan toisiopuolelta tai sähköpääkeskukselta, mutta joissain tapauksissa tiedot voidaan antaa myös

jakelumuuntajan ensiöpuolelta. Tiedot jakeluverkosta saadaan jakeluverkkoa ylläpitävältä verkkoyhtiöltä, joilla on velvollisuus antaa tarvittavat tiedot. Mitoituksen kannalta tarvittavat tiedot ovat esimerkiksi kolmivaiheinen oikosulkuvirta, nimellisvirta, jännite ja verkon impedanssi. (Ensto 2008.)

2.1.1 Syöttävä verkko

Syöttävän verkon impedanssi, resistanssi ja reaktanssi saadaan laskettua, kun tiedetään verkon oikosulkuvirta. Oikosulkuvirta voi olla tiedossa joko keskijänniteverkolta, jakelumuuntajalta tai pääkeskukselta. Ennen muuntajaa oleva syöttävä verkko on yleensä hyvin pieni-impedanssinen, ja sen oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus on vähäinen. Muuntajaa ennen oleva verkko voidaan jättää huomioimatta, jos laskennassa on tarkoitus saada likiarvot komponenttivalintoja varten. Verkon näennäisteho saadaan laskettua kaavalla 1. (Ensto 2008.)

Käytännössä etenkin maaseudulla saattaa verkon impedanssi olla sen verran suuri, että sen jättäminen pois laskuista saattaa vääristää oikosulkuvirtoja ylöspäin. Tämä taas voi aiheuttaa sen, että automaattisen poiskytkennän ehdot eivät käytännössä täyty, vaikka laskennallisesti ne vaikuttaisivat täyttyvän.

Syöttävän verkon näennäisteho:

$$S_{net} = \sqrt{3} * U_{net} * I_{Knet} \quad (1)$$

jossa U_{net} on verkon pääjännite
 I_{Knet} on verkon oikosulkuvirta (Ensto 2008)

Kun verkon näennäisteho on tiedossa, voidaan sen perusteella laskea verkon impedanssi:

$$Z_{net} = \frac{U_N^2}{S_{net}} \quad (2)$$

jossa U_N on verkon nimellispääjännite
 S_{net} on verkon näennäisteho (Ensto 2008)

Verkon impedanssin perusteella saadaan laskettua verkon reaktanssi (Ensto 2008):

$$X_{net} = 0,995 * Z_{net} \quad (3)$$

Verkon impedanssin perusteella saadaan myös laskettua verkon resistanssi (Ensto 2008):

$$R_{net} = 0,1 * Z_{net} \quad (4)$$

2.1.2 Jakelumuuntaja

Jakelumuuntajan tiedot ovat tarpeelliset siinä tapauksessa, jos jokin lähtötieto annetaan jakelumuuntajan ensiöpuolelle tai oikosulkuvirtoja ei ole tiedossa. Verkkoyhtiö voi esimerkiksi ilmoittaa verkon oikosulkuvirran muuntajan ensiöpuolelle, jolloin lasketaan mukaan myös muuntajan impedanssi kaavalla 5. Tällöin on syytä olla tiedossa myös muuntajan kilpitiedot. Impedanssin perusteella voidaan määrittää muuntajan resistanssi ja reaktanssit oikosulkuvirtojen laskentaa varten kaavoilla 6 ja 7. (Ensto 2008.)

Muuntajan impedanssi lasketaan:

$$Z_M = \frac{U_N^2}{S_N} * \frac{u_k}{100} = [\Omega] \quad (5)$$

jossa U_N on nimellispääjännite
 S_N on muuntajan nimellisteho
 u_k on muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi [%].
 (Ensto 2008)

Muuntajan resistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_M = \frac{P_{CU}}{3 * I_N^2} = [\Omega] \quad (6)$$

jossa P_{CU} on kuparihäviöt
 I_N on nimellisvirta (Ensto 2008)

Muuntajan reaktanssi lasketaan kaavalla:

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = [\Omega] \quad (7)$$

jossa Z_M on muuntajan impedanssi
 R_M on muuntajan resistanssi (Ensto 2008)

2.2 Kaapelit virtapiirissä

Kaapelissa kulkevan virran vaikutuksesta kaapeli lämpenee, eikä liiallinen lämpö ole toivottavaa. Kaapelit saavat lämmitä eristeestä riippuen 70–90°C lämpötilaan. Lämpeneminen on kuitenkin hukkalämpöä, jota pyritään mitoituksella välttämään. Kaapelin lämpeneminen aiheuttaa kaapelissa jännitealenemaa, joka on sallittua tietyissä rajoissa.

(Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy 2018, 6-7.)

Kaapelit ovat oikosulkuvirran laskennan kannalta keskeisin virtaa rajoittava piirin osa. Lyhyen kaapelin päässä muuntajalta olevalla keskuksella saattaa tulla ongelmaksi liian suuri oikosulkuvirta. Toisaalta kaukana muuntajasta olevalla keskuksella saattaa ongelmana olla pieni oikosulkuvirta, jolloin täytyy suojalaitteiden toimintaan kiinnittää erityistä huomiota.

2.2.1 Kaapelin resistanssit

Kaapelin resistanssiin vaikuttaa kaapelin pituus, poikkipinta-ala ja johdinmateriaali. Usein kaapelin valmistaja ilmoittaa kaapelin tuotetiedoissa resistanssin kilometriä kohden, mutta tarvittaessa resistanssi voidaan myös laskea kaavalla 8. Liitteessä 1 on listattu kaapelien resistanssit eri lämpötiloille.

Kaapelien resistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_C = \frac{\rho * l}{A} \quad (8)$$

jossa ρ on resistiivisyys
 l on pituus
 A on johtimen poikkipinta-ala.
 (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2001, 120)

Koska johdinmateriaalin resistiivisyys ρ on riippuvainen lämpötilasta, on valittava oikeaa lämpötilaa vastaava arvo taulukosta 1. Laskettaessa suurinta oikosulkuvirtaa käytetään resistiivisyydelle 20 °C taulukkoarvoja. Laskettaessa termistä oikosulkuvirtaa käytetään kaapelin suurimman käyttölämpötilan resistiivisyysarvoa. Suurin käyttölämpötila PVC-eristeisillä kaapeleilla on 70 °C ja EPR/PEX-eristeisillä kaapeleilla 90 °C.

TAULUKKO 1. Johtimen resistiivisyys

Johdinaine	Resistiivisyys ρ [$\mu\Omega\text{m}$]		
	T=20°C	T=70°C	T=90°C
Cu	0,0185	0,0222	0,0237
Al	0,0294	0,0359	0,0376

2.2.2 Kaapelin reaktanssit

Pienjänniteverkon oikosulkuvirran laskennan kannalta kaapelien reaktanssit ovat suhteellisen pienet, eivätkä ne juuri vaikuta laskentatulokseen. Tästä johtuen alle 50mm²:n kaapeleilla reaktanssit voidaan jättää laskuissa huomioimatta, ellei laskennassa ole erityistä tarvetta saada tarkkoja laskentatuloksia. Yli 50mm²:n kaapeleille voidaan käyttää reaktanssin likiarvoa 0,08 Ω/km . (Ensto 2008.)

Jos on tarpeen selvittää kaapelin tarkka reaktanssi, voi sen laskea kaavalla 9. Kaapelin induktanssi selviää kaapelivalmistajan tuotetiedoista, tai tarvittaessa induktanssina voidaan myös käyttää eri valmistajan samantyyppisen kaapelin induktanssia.

Kaapelin reaktanssi saadaan laskettua, kun tiedetään sen induktanssi:

$$X_C = 2 * \pi * f * L_C \quad (9)$$

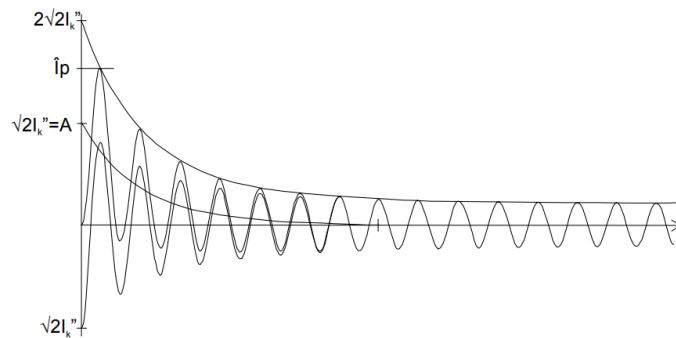
jossa f on taajuus
 L_C on kaapelin induktanssi
 (Mäkelä ym. 2001, 126)

2.3 Oikosulkuvirrat

Verkon mitoituksen kannalta on tunnettava oikosulkuvirtojen merkitys eri kohdissa verkkoa, jotta verkot voidaan suunnitella turvallisiksi. Verkot tulisi suunnitella sellaisiksi, että mahdolliset viat laitteissa tai oikosulut verkon missä tahansa kohdassa ei aiheuttaisi sen muissa osissa vaaratilanteita. (ABB 2000, 1.)

2.3.1 Yleistä oikosulkuvirroista

Oikosulku voi esiintyä virtapiirissä monessa eri kohdassa ja oikosulku voi olla kolmivaiheisessa virtapiirissä symmetrinen tai epäsymmetrinen. Vastukseton symmetrinen oikosulku aiheuttaa yleensä suurimman mahdollisen oikosulkuvirran, joka voi olla jopa 40-kertainen piirin nimellisvirtaan nähden. Suurinta oikosulkuvirran arvoa käytetään valittaessa virtapiirin laitteita. Muita mahdollisia oikosulkutilanteita ovat kaksivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen maasulku ja yksivaiheinen maasulku. Näistä viimeisin eli yksivaiheinen maasulku on oikosulkutilanne, joka aiheuttaa pienimmän oikosulkuvirran virtapiirissä. Pienitä oikosulkuvirtaa tarvitaan tarkisteltaessa automaattisen poiskytkennän ehdon toteutumista. (Korpinen 2019, 1-3.)



KUVIO 2. Oikosulkuvirran kuvaaja vaihtosähköpiirissä (ABB 2000, 1)

Kuviossa 2 on esitetty oikosulkuvirran käyttäytyminen sen alkuhetkestä eteenpäin. Kuviossa A on oikosulussa esiintyvä tasavirtakomponentti, jonka suuruuteen vaikuttaa oikosulun synnytyhetki ja se on vaimeneva resistanssin ja reaktanssin suhteessa. Generaattorin tai suurten moottorien läheisyydessä saattaa esiintyä myös vaimeneva vaihtovirtakomponentti, jossa generaattori tai moottorit syöttävät oikosulun alkuhetkellä virtaa oikosulkupisteeseen.

(ABB 2000, 1; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 73.)

2.3.2 Oikosulkuvirta I_C

Oikosulkuvirrasta I_C puhuttaessa tarkoitetaan virtaa, joka aiheutuu sähköjärjestelmässä laitevian, kaapelivian tai virheellisen kytkennän seurauksena. Oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttavat syöttävän verkon lisäksi myös kaikki piiriin liittyvät resistanssit ja reaktanssit. Oikosulkuvirtaa käsitellään standardissa IEC 60909-0, kohdassa 1.3.2.

Kolmivaiheinen oikosulku, jossa kaikki kolme vaihetta ovat oikosulussa keskenään, aiheuttaa suurimman oikosulkuvirran. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 10. Laskettaessa maksimioikosulkuvirtaa k – kertoimen arvo on 1, ja laskettaessa termistä oikosulkuvirtaa, missä huomioidaan myös kaapelin lämpeneminen, k on 0,95. (Ensto 2008.)

Tavoiteltaessa tarkkoja termisen oikosulkuvirran arvoja voidaan kaapeleille käyttää niiden maksimilämpötilaa vastaavia arvoja. Tällöin k – kerroin kaavassa on 1.

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua, kun virtapiirin impedanssit ovat tiedossa:

$$I_{C,3L} = \frac{k*U}{\sqrt{3*\sqrt{(R_{net}+R_M+R_C)^2+(X_{net}+X_M+X_C)^2}}} \quad (10)$$

jossa k on jännitealenemakerroin
 U on pääjännite
 R on resistanssi
 X on reaktanssi (Ensto 2008)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta on tarpeen selvittää silloin, kun tarkastellaan automaattisen poiskytkennän ehtojen täyttymistä. Yksivaiheinen oikosulku, jossa yksi vaihe on oikosulussa joko suojamaan tai nolajohtimen kanssa, saadaan laskettua kaavalla 11. Samalla yksivaiheisen oikosulkuvirran kaavalla voidaan myös laskea muita oikosulkuvirran variaatioita, jossa huomioidaan virran kulkureitin kaapelit laskuihin. (Ensto 2008.)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua, kun huomioidaan myös suojamaajohtimen impedanssit:

$$I_{C,LPEN} = \frac{k*U}{\sqrt{3*\sqrt{(R_{net}+R_M+R_{C,L}+R_{C,PE})^2+(X_{net}+X_M+X_{C,L}+X_{C,PE})^2}}} \quad (11)$$

jossa $R_{C,PE}$ on suojamaajohtimen resistanssi
 $X_{C,PE}$ on suojamaajohtimen reaktanssi (Ensto 2008)

2.3.3 Prospektiivinen oikosulkuvirta I_p

Prospektiivinen oikosulkuvirta on virran tehollisarvo oikosulussa, jossa oletetaan kaikkien kytkinlaitteiden ja suojalaitteiden impedanssiksi 0Ω . Käsite tulee vastaan usein muun muassa sulakkeiden laukaisukäyrien tulkinnassa. Prospektiivista oikosulkuvirtaa käsitellään IEC-60909-0 -standardin kohdassa 1.3.3. (Ensto 2008.)

2.3.4 Dynaaminen oikosulkuvirta I_{pk}

Dynaaminen oikosulkuvirta (I_{pk} tai I_{dyn}) on suurin hetkellinen oikosulkuvirran arvo, josta puhutaan usein myös nimellä sysäysoikosulkuvirta. Dynaaminen oikosulkuvirta koostuu vaihtovirtakomponentista ja vaimenevasta tasavirtakomponentista. Jos kyseessä on symmetrinen oikosulku, jossa kaikki kolme vaihetta ovat oikosulussa keskenään symmetrisesti, ei tasavirtakomponenttia esiinny. (Ensto 2008; ABB 2000, 7.)

Epäsymmetrisessä oikosulussa esiintyvä tasavirtakomponentti on oikosulun alkuhetkellä suurin ja vaimenee oikosulun jatkuessa. Tasavirtakomponentti on riippuvainen oikosulun hetkellisestä jännitteen arvosta ja virtapiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta. Dynaamista oikosulkuvirtaa käsitellään IEC-60909-0 -standardin kohdassa 1.3.8.

(Ensto 2008; ABB 2000, 7.)

Oikosulun suurin hetkellinen arvo määrittää laitteen komponenttivalinnat, jotta ne kestäisivät mekaanisesti suurimman virran vaikutuksen. Dynaaminen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 12, jonka suuruuteen vaikuttaa virtapiirin resistanssin ja reaktanssin suhde. Tyypillisesti laskettaessa pienjänniteverkon oikosulkuvirtoja, on sysäyskerroin k luokkaa 1,4-1,5. Sysäyskerroin voidaan määrittää myös kaavalla 13. (Ensto 2008; Korpinen 2019, 5.)

Dynaamisen oikosulkuvirran laskenta:

$$I_{pk} = k\sqrt{2}I_c \quad (12)$$

jossa I_c on oikosulkuvirran tehollisarvo
 k on sysäyskerroin (Ensto 2008)

Dynaamisen oikosulkuvirran laskennassa käytettävä kerroin on riippuvainen resistanssin ja reaktanssin suhteesta:

$$k = 1,022 + 0,969 * e^{\frac{-3,03 * R}{X}} \quad (13)$$

jossa R on resistanssi
 X on reaktanssi (Ensto 2008)

Standardissa SFS-EN 61439-1 on mukana taulukko, jota voidaan käyttää dynaamisen oikosulkuvirran määrittämiseen. Tällöin dynaaminen oikosulkuvirta saadaan kertomalla oikosulkuvirran tehollisarvo taulukon 2 kertoimella n .

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 160.)

TAULUKKO 2. Dynaamisen oikosulkuvirran määrittäminen kertoimella n

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 160)

Oikosulkuvirran tehollisarvo [kA]	kerroin n	$\cos\phi$
$I \leq 5$	1,5	0,7
$5 < I \leq 10$	1,7	0,5
$10 < I \leq 20$	2	0,3
$20 < I \leq 50$	2,1	0,25
$50 < I$	2,2	0,2

2.3.5 Terminen oikosulkuvirta I_{th} ja I_{CW}

Terminen oikosulkuvirta I_{th} on lyhytaikainen oikosulkuvirran tehollisarvo, joka kohdistuu keskukseseen tai komponenttiin oikosulkutilanteessa. Terminen oikosulkuvirrankestoisuus I_{CW} on lyhytaikainen oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka keskuksen tai komponentin on kestävä testiolosuhteissa. Komponenttivalmistajat ilmoittavat yleensä komponenteille yhden sekunnin I_{CW} - arvon, joka on leimattu komponenttien päälle. Keskuksien oikosulkukestoisuudelle ilmoitetaan vastaavasti I_{CW} - arvo, joka leimataan keskuksen arvokilpeen. (Ensto 2008.)

Terminen oikosulkuvirta saadaan laskettua:

$$I_{th} = I_C * \sqrt{m + n} \quad (14)$$

jossa I_C on oikosulkuvirta
 m on tasavirtakomponentin huomioon ottava kerroin
 n on vaihtovirtakomponentin huomioon ottava kerroin
 (Ensto 2008)

2.3.6 Ehdolliset oikosulkuvirrat $I_{CC,th}$ ja $I_{CC,dyn}$

Ehdolliset keskuksen oikosulkuvirrat ovat arvoja, jotka on saavutettu rajoittamalla oikosulkuvirtaa suojalaitteella. $I_{CC,th}$ on suojalaitteella rajoitettu oikosulun tehollisarvo, jonka keskuksen komponentit kestävät yhden sekunnin ajan. Keskuksen valmistaja voi myös määrittää $I_{CC,th}$ -arvon lyhemmälle ajalle, joka voi tyypillisesti olla esimerkiksi 0,3 s. Ehdollinen terminen oikosulkukestoisuus perustuu suojalaitteen läpäisemään energiaan.

(Sähkötieto ry 2018, 9; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 75.)

$I_{CC,dyn}$ on suojalaitteella rajoitettu oikosulkuvirran huippuarvo, jonka keskuksen komponentit kestävät mekaanisesti (Sähkötieto ry 2018, 9). Oikosulkuvirran huippuarvo saadaan tulkittua suojalaitteen teknisissä tiedoissa olevasta kaaviosta, jota käsitellään luvussa 3.1.3. Keskuksen merkitsemistä ehdollisilla arvoilla käsitellään luvussa 4.4.

2.3.7 Komponentin oikosulkukestoisuusvaatimuksen pienentäminen

Laittevalmistajat ilmoittavat komponenteille 1 s termisen oikosulkuvirtakestoisuuden arvon, joka löytyy myös komponenttiin painettuna tekstinä. Jos oikosulku kyetään kytkemään pois alle yhden sekunnin aikana, voidaan komponentille laskea sen oikosulkukestoisuus lyhemmälle ajalle (Ensto 2008).

Komponentin terminen oikosulkukestoisuusvaatimus voidaan laskea:

$$I_{CW,2} = I_{CW,1s} * \sqrt{t_{K2}} \quad (15)$$

jossa $I_{CW,1s}$ on terminen oikosulkukestoisuus(1s)
 t_{K2} on oikosulun kokonaiskesto aika (Ensto 2008)

Komponentin terminen oikosulkukestoisuus täyttyy, kun seuraavat epäyhtälöt ovat voimassa:

$$I_{CW} \leq I_{CW,N} \quad \text{kun} \quad t \geq t_N \quad \text{tai} \quad (16)$$

$$I_{CW} \leq I_{CW,N} * \sqrt{\frac{t_N}{t}} \quad \text{kun} \quad t \leq t_N$$

joissa $I_{CW,N}$ on komponentin nimellinen terminen oikosulkukestoisuus
 t_N on komponentin nimellistä termistä oikosulkukestoisuutta vastaava aika
 (ABB 2000, 9)

2.4 Jännitteenalenema

Jännitteenalenema johtuu pääasiassa virtapiirin johtimien resistansseista. Jännitealenemaa on syytä tarkastella suunnitteluvaiheessa, kun johtimien pituudet kasvavat useampaan kymmeneen metriin. Standardissa SFS 6000 on suosituksia jännitteenalenemasta, mutta ne eivät ole sitovia, ellei erikseen siitä mainita. Taloudellisessa mielessä jännitteenalenema on syytä pitää pienenä, koska jännitehäviö aiheuttaa energianhukkaa. Myös jännitteenaleneman kasvassa on suojalaitteen kyettävä katkaisemaan virtapiiri vikatilanteessa. Usein tilaajalla tai suunnittelijalla on omat vaatimuksensa jännitteenaleneman suhteen.

(Sähkötieto ry 2017a, 5; Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy 2018, 7.)

Jännitteenaleneman suuruuteen vaikuttaa johtimen resistanssi ja reaktanssi sekä kuormitusvirta. Jännitteenalenema voidaan laskea kaavoilla 17 ja 18, joissa plus – merkkiä käytetään induktiivisella ja miinus – merkkiä kapasitiivisella kuormalla. Standardin SFS 6000 liitteessä 52 G on myös vaihtoehtoisia kaavoja jännitealeneman laskemiseksi. (Sähkötieto ry 2017a, 5)

Jännitealenema kolmivaiheiselle vaihtojännitteelle:

$$\Delta U = I * l * \sqrt{3} * (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (17)$$

jossa *I* on kuormitusvirta
l on johtopituus
r on johtimen ominaisresistanssi [Ω/m]
x on johtimen ominaisreaktanssi [Ω/m]
 (Tiainen 2009, 226.)

Jännitealenema yksivaiheiselle vaihtojännitteelle:

$$\Delta U = I * 2 * l * (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (18)$$

jossa *I* on kuormitusvirta
l on johtopituus
r on johtimen ominaisresistanssi
x on johtimen ominaisreaktanssi.
 (Tiainen 2009, 226)

3 SUOJAUS

Suojalaitteen tarkoitus virtapiirissä on suojata virtapiiriä ylivirralla, jonka voi aiheuttaa virtapiirissä tapahtuva laiterikko, kaapelivika, virheellinen kytkentä tai jokin muu vastaava tilanne. Vikatilanteessa virtapiirin impedanssin pieneneminen aiheuttaa virran kasvamista. Virran kasvaessa virtapiirissä yli sallitun arvon on suojalaitteen katkaistava virtapiiri. (Tiainen 2009, 244.)

3.1 Sulakkeellinen suojaus

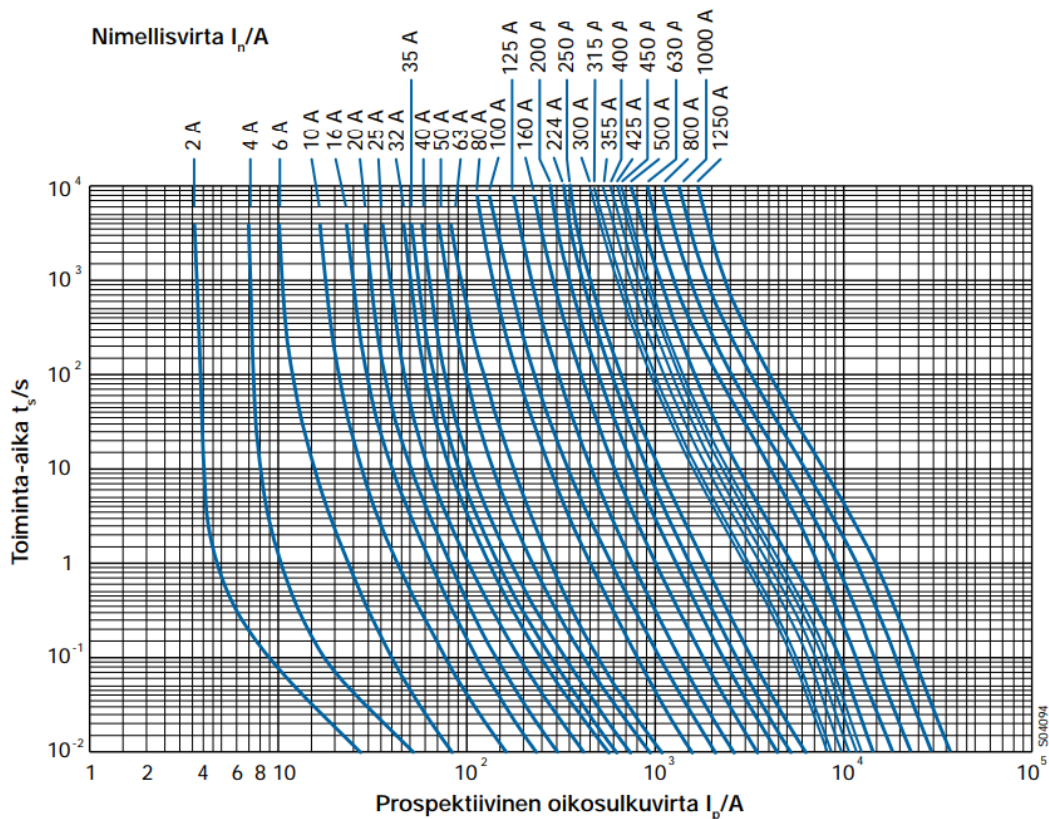
Sulakesuojauksen suosio on laskenut viimeisen kymmenen vuoden aikana merkittävästi, mutta sulakesuojaus on edelleen tarpeellinen. Sulakkeet rajoittavat oikosulkuvirtaa ja ovat hyvin selektiivisiä keskenään. Nämä ovat kaksi tärkeää ominaisuutta, miksi sulakkeen käyttö on yhä perusteltua. Sulakkeen toiminta-ajat on kuvattu sulakkeen teknisissä tiedoissa, josta ilmenee sulakkeen palamiseen tarvittava virta ja aika. Sulakkeen toiminta-ajat on säädetty standardissa SFS-EN 60269. (Sähkötieto ry 2017a, 7.)

3.1.1 Tulppasulakkeet

Tulppasulakkeet soveltuvat ylivirta- ja oikosulkusuojaukseen. Tulppasulakkeita on perinteisesti käytetty rakennusten ryhmäjohtimien suojaamiseen, mutta nykyään ylivirtasuojaksi niiden tilalle on alettu asentaa johdonsuojakatkaisijoita. Standardin mukaan 500V tulppasulakkeen katkaisukyky on 20kA. Liitteessä 3 on listattu standardin mukaiset toimintavirrat automaattisen poiskytkennän vaatimille toiminta-ajoille. (Tiainen 2009, 248.)

3.1.2 Kahvasulakkeet

Kahvasulakkeet, joista puhutaan usein myös nimellä kahvavarokkeet, soveltuvat erinomaisesti oikosulkusuojaksi. Kahvasulakkeen katkaisukyky on yleensä 50kA, ellei valmistaja sitä erikseen ilmoita. Yleensä valmistajan ilmoittama katkaisukyky on 50-100kA välillä (Tiainen 2009, 248.) Kahvasulakkeiden toiminta-ajat on kuvattu sulakkeen teknisissä tiedoissa, josta esimerkkinä ABB:n gG – sulakkeen toiminta-aikakuvaaja (KUVIO 3).



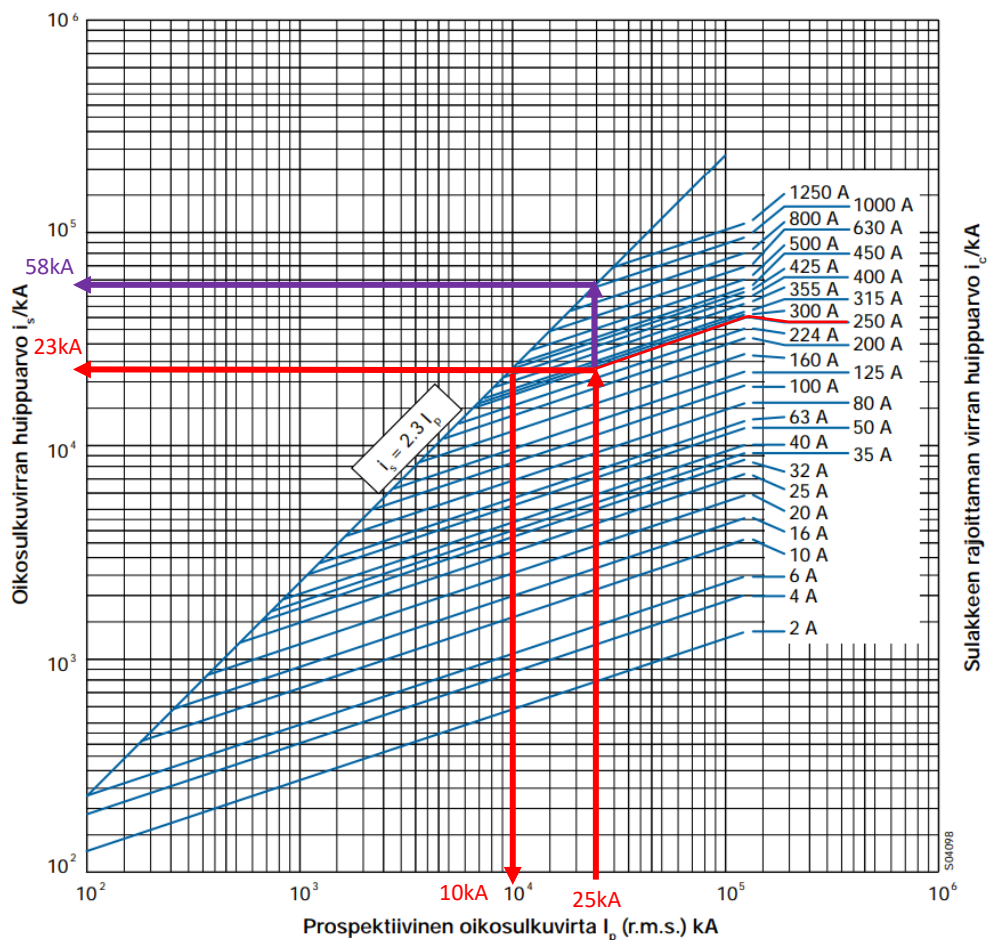
KUVIO 3. 500V gG-kahvasulakkeen toiminta-ajat (ABB 2009, 25)

Sulakkeiden toiminta-ajat kuvataan 0,1 sekunnista tai 0,01 sekunnista ylöspäin. Alle 0,1s arvot ilmoitetaan sulakkeen I^2t – arvoina, joista käy ilmi ennen sulakkeen palamista läpimenevä energia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 75.)

3.1.3 Sulakkeen virranrajoitus

Sulakkeilla on dynaamista oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus, joka on hyödyllinen sähkönjakelun suunnittelussa. Sulakkeen virranrajoituksella saadaan tarvittaessa pienennettyä keskuksen tai yksittäisen komponentin oikosulkuvirtaa merkittävästi. Komponenttien oikosulkuvirrankesto vaikuttaa yleensä komponentin hintaan, jolloin suurempi oikosulkukestoisuus maksaa enemmän. (Sähkötieto ry 2018, 9.)

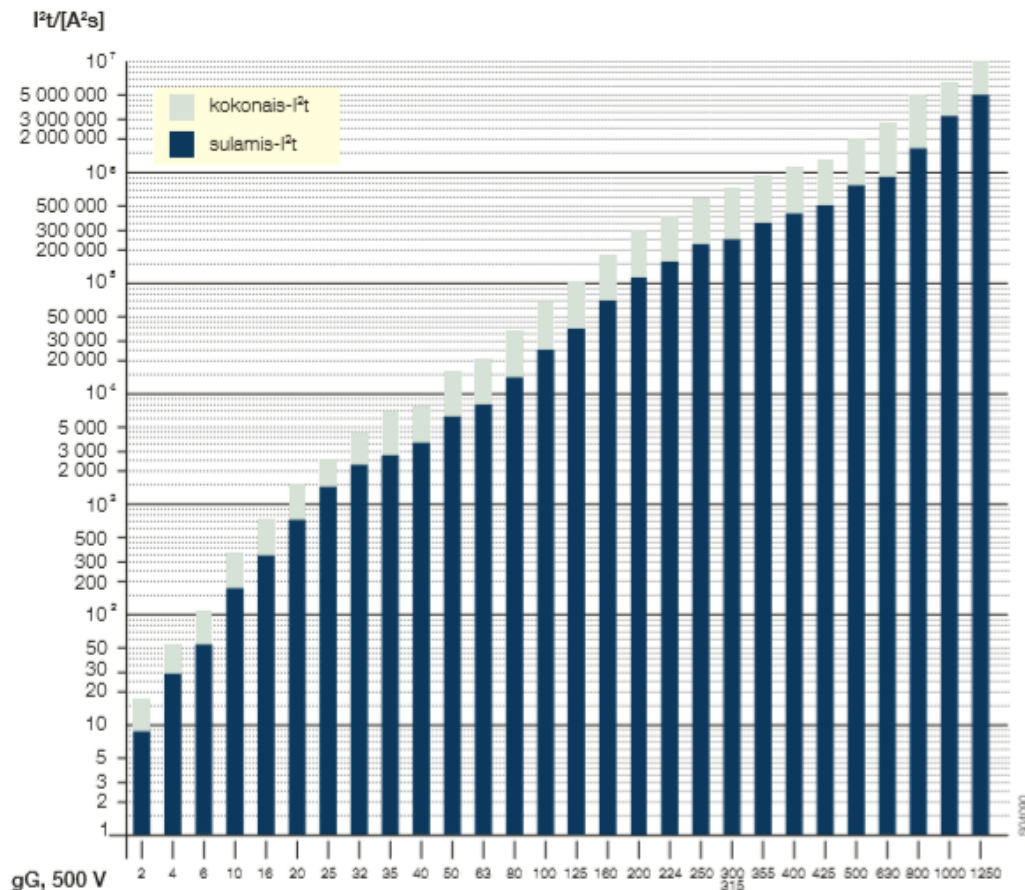
Esimerkiksi keskuksen suojaavan sulakkeen ollessa tyypiltään ABB:n valmistama 250A gG-kahvasulake ja tiedetään sulakkeelle kohdistuvaksi prospektiiviseksi oikosulkuvirraksi 25kA, saadaan kaaviosta (KUVIO 4) tulkitsemalla sulakkeen jälkeiseksi sysäysoikosulkuvirraksi 23kA ja sulakkeen jälkeiseksi oikosulkuvirraksi 10kA. Ilman sulaketta sysäysoikosulkuvirta olisi noin 58kA. (Sähkötieto ry 2018, 9.)



KUVIO 4. 500V gG-sulakkeen virran huippuarvot (ABB 2009, 32; tulkittu: Sähkötieto ry 2018, 9 mukaan)

3.1.4 Sulakkeen I^2t – arvot

Sulakkeet läpäisevät tietyn määrää energiaa oikosulun aikana, ennen kuin ne katkaisevat virtapiirin. Tällöin puhutaan sulakkeen I^2t – arvosta, joka koostuu sulamisen I^2t – arvosta ja valokaaren I^2t – arvosta. I^2t – arvot saadaan tulkittua sulakkeen teknisissä tiedoissa olevasta kaaviosta. Kuviossa 5 on ABB:n kahvasulakkeiden I^2t – arvot. (ABB 2000, 20.)



KUVIO 5. 500V gG-sulakkeen I^2t –arvot (ABB 2009, 39)

Komponentin I^2t – arvo on oltava suurempi, kuin sitä suojaavan sulakkeen sulamis- I^2t – arvo, jotta komponentti kestää siihen kohdistuvan oikosulkuvirran energian. Komponenttien I^2t – arvo saadaan yleensä komponentin teknisistä tiedoista. Se voidaan myös määrittää yleisenä taulukkoarvona, jos I^2t – arvoa ei ole muuten saatavilla. (Tiainen 2009, 254.) Yleistä taulukkoarvoa suositeltavampi vaihtoehto on tarkastella komponentin oikosulkukestoisuusvaatimusta sulakkeen palamisajalle, jota on käsitelty luvussa 2.3.7.

3.2 Sulakkeeton suojaus

Sulakkeettomalla suojauksella tarkoitetaan johtimien ja laitteiden suojausta siten, että kyseinen kuormitusryhmä katkaistaan vikatilanteessa irti virtapiiristä muulla kuin sulakkeen palamisesta johtuvalla virtapiirin katkeamisella. Sulakkeettomia katkaisijoita ovat muun muassa johdonsuojakatkaisijat, kompakti- ja ilmakatkaisijat sekä moottorinsuojakatkaisijat (Sähkötieto ry 2015).

3.2.1 Johdonsuojakatkaisijat

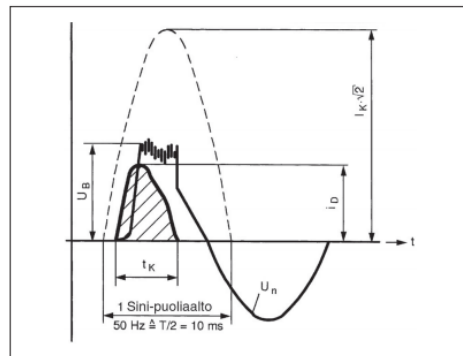
Johdonsuojakatkaisijassa on kahden eri laukaisualan yhdistelmä, jossa terminen laukaisuala toimii ylikuormituksen suojana ja magneettinen laukaisuala suojaa oikosulun sattuessa. Virtapiirin mitoituksen kannalta johdonsuoja tulee toimia magneettisella laukaisualueella. Standardissa SFS-EN 60898 käsitellään johdonsuojakatkaisijoita tarkemmin. (Tiainen 2009, 249; Sähkötieto ry 2015, 3.)

Johdonsuojakatkaisijoita valittaessa täytyy kiinnittää huomiota sen nimellisvirtaan ja nimelliskäynnin jännitteeseen, katkaisukykyyn ja laukaisukäyrään. Yleensä johdonsuojakatkaisijan katkaisukyky on 400V:n jännitteellä 6kA, mutta teollisuusolosuhteissa voidaan käyttää suuremman katkaisukykyyn omaavia johdonsuojakatkaisijoita aina 25kA:iin asti. (Sähkötieto ry 2015, 3.)

3.2.2 Katkaisijat ja suojareleet

Viime vuosina on kehitetty etenkin sulakkeetonta suojausta eli katkaisijoilla toteutettua suojausta. Muun muassa prosessoripohjaiset ratkaisut suojareleistä ovat kehittyneet nopeasti ja suojalaitteen ominaisuudet ovat kasvaneet valtavasti. Suojareleiden monipuolisuus aiheuttaa sen, että niiden suojauksen asetteluun tarvitaan asiantuntemusta huomattavasti aiempaa enemmän. Suojareleet voidaan jakaa kahteen ryhmään, kompakti- ja ilmakatkaisijoihin. (Sähkötieto ry 2017a, 5.)

Kompaktit katkaisijat ovat rakenteeltaan umpinaisia, ja niissä rakenne on kiinteäksi valettu. Katkaisijan käyttövipu kääntää suoraan pääkoskettimia mekaanisesti. Yleensä kompaktikatkaisijoita käytetään johtojen, kiskostojen, pienempien keskusten ja moottorien suojaukseen. Kompakteilla katkaisijoilla on mahdollista rajoittaa oikosulkuvirran huippuarvoa merkittävästi, joten ne soveltuvat myös rajoittamaan keskuksen oikosulkuvirtaa ja läpimenoenergiaa. (Sähkötieto ry 2015, 4, 6, 12.) Katkaisutapahtuma kuormitus- ja oikosulkutilanteessa kuluttaa katkaisijoiden kärkiä, jolloin niitä ei voi suositella toistuvaan kuorman katkaisuun. Katkaisutapahtuma on kuvattu kuviossa 6, josta ilmenee katkaisijan kärjille kohdistuva rasitus.



KUVIO 6. Kompaktin katkaisijan katkaisutapahtuma (Sähkötieto ry 2015, 12)

Ilmakatkaisijat ovat suuremmille virroille tarkoitettuja katkaisijoita, joiden pääkoskettimia ei voida kääntää mekaanisesti. Pääkoskettimien ohjaus tapahtuu jousivoimalla ja jousivoima viritetään joko käsikäytöllä tai moottorilla. Pääkoskettimien ohjaus tapahtuu katkaisijan paneelista tai esimerkiksi etäohjauksella. (Sähkötieto ry 2015, 5.)

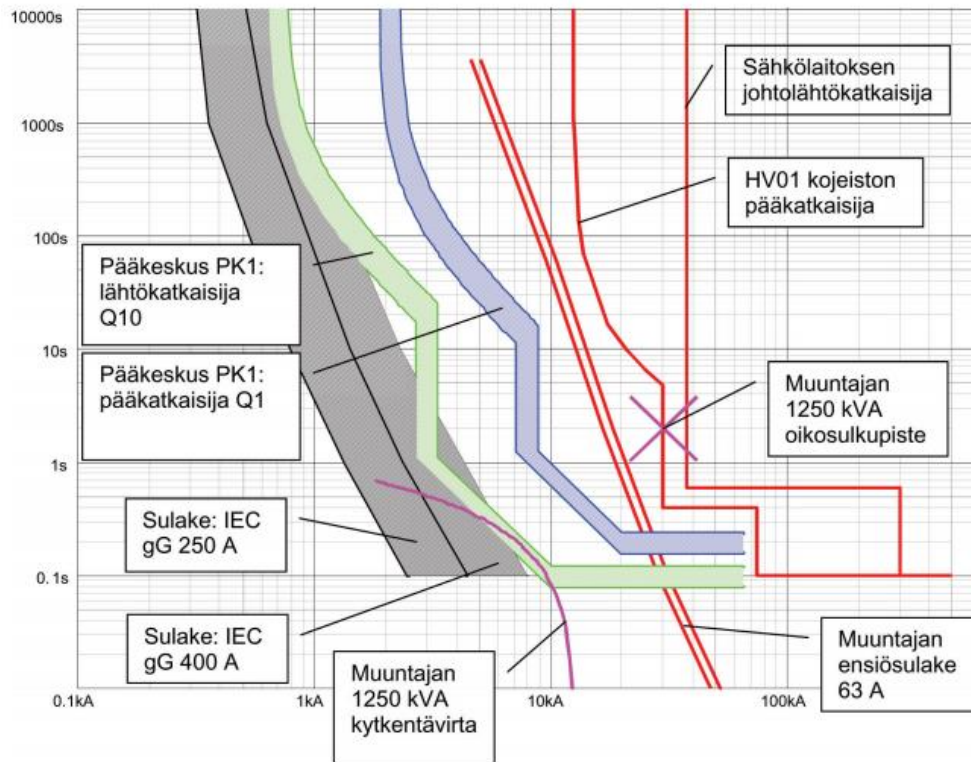
3.2.3 Moottorinsuojakatkaisijat

Pääasiassa moottoreiden suojaukseen tarkoitettut moottorinsuojakatkaisijat ovat 3-napaisia ylikuormitussuojia, joissa ylikuormitussuoja on säädettävissä tietyllä alueella ja ylikuormitussuoja on lämpötilakompensoitu. Moottorinsuojakatkaisija sisältää myös kiinteän magneettisen pikalaukaisun ja vaihevahdin. Moottorinsuojakatkaisijoiden tyypillinen katkaisukyky on 50kA / 400V. Suuremmilla, yli 100A:n moottorivirroilla voidaan käyttää myös erityisiä niitä varten suunniteltuja kompaktikatkaisijoita, joiden etuna on tarkempi aseteltavuus. Kompakteilla moottorinsuojareleillä on muun muassa mahdollisuus vaikuttaa laukaisuluokkaan, hetkelliseen käynnistysvirran valvontaan ja moottorin jumiutumisen tarkkailuun. (Sähkötieto ry 2015, 6.)

3.3 Selektiivisyys

Selektiivisyydellä tarkoitetaan suojalaitteiden valintaa siten, että suojalaite toimii ylivirtatilanteessa ainoastaan sille tarkoitettulla alueella. Selektiivisyydellä saadaan ylivirran aiheuttama vikatilanne rajautumaan mahdollisimman pienelle alueelle. Oikein suunnitellussa piirissä vain vikapaikan etupuolinen suojalaite katkaisee virtapiirin. Täydellinen selektiivisyys voi kuitenkin aiheuttaa kohtuuttomia kustannuksia, eikä se aina ole tarpeen. Selektiivisyydestä tarkastelu tehdään aina suunnitteluvaiheessa tapauskohtaisesti. (Tiainen 2009, 256.)

Erityyppisillä suojalaitteilla on erilaiset laukaisukäyrät, josta esimerkkinä kuvio 7, jossa on kuvattu yhden esimerkkitapauksen pääkeskuksen suojalaitteiden laukaisukäyrät. Kuviosta käy ilmi, että suojalaitteiden laukaisukäyrät ovat osin päällekkäisiä, joka voi tietyissä tapauksissa aiheuttaa näiden suojalaitteiden laukeamisen samanaikaisesti.



KUVIO 7. Ylivirtasuojien toimintakäyrät, esimerkkitapaus (Sähkötieto ry 2017b, 10)

3.4 Poiskytkennän ehdon toteutuminen

Oikosulkuvirran laskiessa pitkillä etäisyyksillä aiheuttaa se suojalaitteiden ja kaapeleiden välille omat haasteensa. Suojalaitteiden poiskytkennälle on standardissa SFS 6000 luvussa 131 asetettu ehdot, jotka tulee täyttyä. Selvitettäessä automaattisen poiskytkennän ehdon toteutumista, on ensin selvitettävä pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta vaihe- ja suojajohtimen välillä. Pienin oikosulkuvirta selvitetään oletettuun kaukaisimpaan pisteeseen, jossa todennäköisimmin esiintyy pienin oikosulkuvirta. (Tiainen 2009, 90, 92.)

Laskennalla saatua tulosta verrataan suojalaitteen toimintarajavirtaan, jolloin oikosulkuvirta on oltava suojalaitteen toimintarajavirta-arvoa suurempi. Mittaamalla todettujen oikosulkuvirran arvojen on oltava 25 % suurempia kuin suojalaitteen toimintaraja-arvot. Enintään 32A:n ylivirtasuojilla suojatut virtapiirit on kyettävä katkaisemaan alle 0,4 sekunnin aikana jännitteettömäksi. Yli 32A:n virtapiirit on katkaistava jännitteettömäksi viiden sekunnin kuluessa oikosulusta. (Tiainen 2009, 90-93.)

4. KESKUKSEN OIKOSULKUKESTOISUUS

Oikosululla tarkoitetaan johtimien tai kiskostojen vaiheiden koskettamista toisiinsa vastuksettomasti, jolloin tapahtuu oikosulku. Oikosulku voi tapahtua myös vaiheen ja suojamaan välillä, jolloin puhutaan maasulusta. Tapahtumana nämä ovat kuitenkin hyvin samantapaisia. Oikosulku on vaarallinen tapahtuma, etenkin jos kyseessä on suuret oikosulkuvirrat. Suuret oikosulkuvirrat aiheuttavat palovaaran valokaaren ja muiden korkeiden lämpötilojen takia. Oikosulkuvirrat aiheuttavat myös ylipainetta keskuksen sisälle.

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 73.)

4.1 Oikosulkurasitukset

Oikosulussa keskukselle aiheutuu termisiä ja dynaamisia rasituksia, joista termiset rasitukset eivät yleensä ole suuri ongelma. Dynaaminen oikosulkuvirta aiheuttaa keskuksen kiskoille ja komponenteille suurimman rasituksen. Etenkin kiskolle kohdistuvat rasitukset voivat aiheuttaa kiskoston värähtelyä, venymistä ja lopulta katkeamisen. Dynaamiset rasitukset kohdistuvat kiskoston lisäksi myös kiskoston tukieristimiin, joiden mitoitus on todettava testaamalla (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 73). Yleensä kiskostojen valmistajat testaavat omat kiskostonsa ja saattavat julkaista oikosulkukestoisuuden suunnitteluun ohjeistuksia.

4.2 Virtakiskot keskuksessa

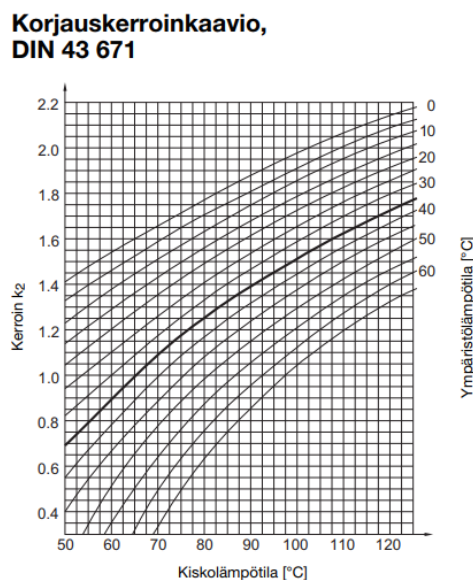
Virtakiskot ovat yleensä keskuksen sisälle asennettavia jännitteen jakeluun liittyviä johtimia, joista saadaan otettua jännitesyöttöjä liitäntäadaptoreilla eri kuormitusryhmille. Virtakiskojen valintaan vaikuttavat nimellisvirta, lämpötilat ja oikosulkuvirrat. Virtakiskoista löytyy eri poikkipinta-alalla olevia kiskoja ja joillain valmistajilla on olemassa usean tyyppisiä virtakiskoja. Jos virtakiskon valmistaja on julkaissut kiskoston suunnitteluun ohjeistuksia, kannatta virtakiskot suunnitella niiden mukaan.

Standardi DIN 43 671 määrittää kiskostojen suurimmat jatkuvat virrat kiskoston ollessa 65 °C ja ympäristön 35 °C lämpötilassa, josta taulukko on liitteenä (LIITE 2). Käytännössä näistä arvoista voidaan poiketa, jos kiskostolla on standardissa määriteltyä parempi haihtumisaste. Esimerkiksi Rittalin valmistamille paljaille Cu–kiskostolle voidaan laskea 6-10 % ja oksidoidulle Cu-kiskolle jopa 60 % taulukkoarvoja korkeammat virrat. Myös kiskoston lämpötila saa nousta korkeammaksi kuin standardin arvot, mutta ei saa ylittää kiskostolle määriteltyä maksimi lämpötilaa, joka on Rittal RiLine –kiskolle 85 °C. (Rittal 2014b, 1.)

Virtakiskon maksiminimellisvirta voidaan määrittää standardin lämpötilaa suuremmalle lämpötila-arvolle seuraavalla laskentakaavalla:

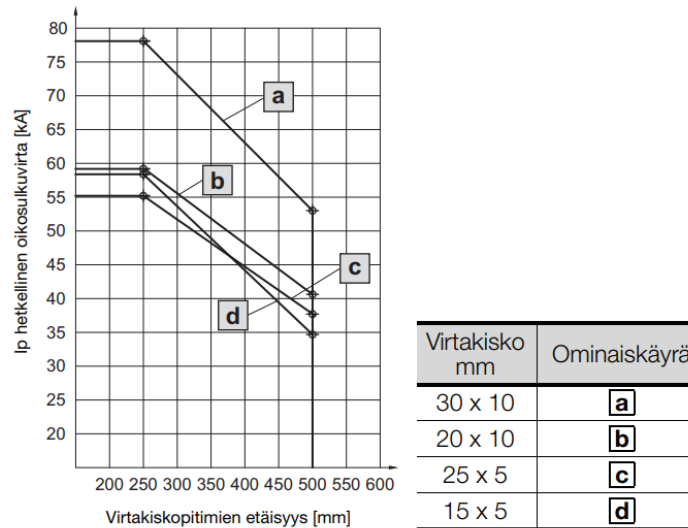
$$I_{n(85^{\circ}\text{C})} = I_{n(65^{\circ}\text{C})} * k_2 * k_{ha} \quad (19)$$

jossa $I_{n(65^{\circ}\text{C})}$ on standardin mukainen jatkuvan virran taulukkoarvo
 K_2 on kiskoston standardin mukainen korjauskerroin, joka tulkitaan kuviosta 8
 k_{ha} on haihtumisasteen kerroin (Rittal 2014b, 1)



KUVIO 8. Kiskoston standardin mukainen korjauskerroin k_2 (Rittal 2014b, 1)

Virtakiskojen oikosulkukestoisuuteen vaikuttaa virtakiskojen kannattimien välinen etäisyys. Esimerkiksi RiLine -virtakiskojen kannattimien asennusvälin pienentäminen 500mm:stä 250mm:iin kasvattaa kiskoston oikosulkukestoisuutta lähes kaksinkertaiseksi. Kuviossa 9 on esitetty RiLine – virtakiskoston kannattimien etäisyyden vaikutus 1 s oikosulkukestoisuuteen.



KUVIO 9. Virtakiskon kannattimien välisen etäisyyden vaikutus oikosulkukestoisuuteen (Rittal 2014a, 1)

4.3 Oikosulkukestoisuus

Laitteen oikosulkukestoisuuden tarkoitus on suojata ihmisiä vahingoittumasta ja samalla estää laitetta aiheuttamasta vahinkoa ympäristöönsä. Sähkökeskuksen osalta kyse on kokonaisuudesta, jossa keskus on yksi osakokonaisuus. Keskuksen on säilyttävä käyttökuntoisena oikosulusta huolimatta. Keskuksen täytyy kestää siihen kohdistuvat oikosulkuvirran aiheuttaman termiset ja dynaamiset rasitukset sen käyttöpaikassa. Tämä tarkoittaa myös, että keskuksen valmistajan tulisi tietää käyttöpaikassa keskukselle kohdistuvat oikosulkuvirrat. Toisaalta keskus voidaan valmistaa tietyn oikosulkukestoisuuden mukaisesti, mutta tilaajalle keskuksen oikosulkukestoisuus on tuotava ilmi jo tarjousvaiheessa.

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 74.)

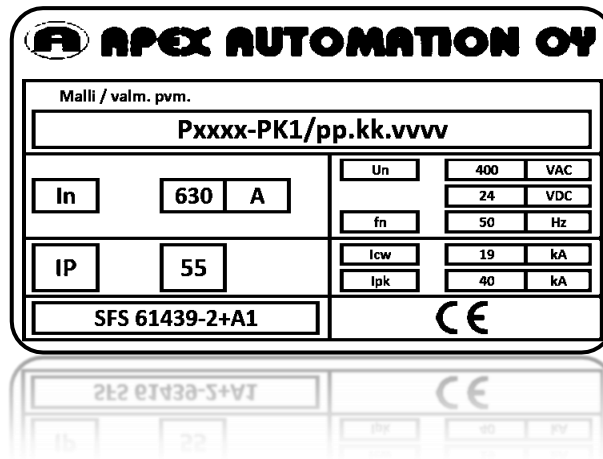
Keskuksen mitoitus tehdään prospektiivisen oikosulkuvirran mukaan silloin, kun keskuksessa tai keskuksen syöttävässä piirissä ei ole oikosulkuvirtaa rajoittavia suojalaitteita. Tällainen tilanne on yleensä silloin, jos pääkeskusta syötetään suoraan generaattorilta tai muuntajalta. Keskus voidaan mitoittaa vaihtoehtoisesti ehdollisen oikosulkuvirran mukaan, jolloin keskuksen oikosulkuvirtaa rajoitetaan suojalaitteella. Standardin SFS-EN 61439-1 mukaan keskuksen oikosulkukestävyys on varmistettava testaamalla. Toisaalta standardi ei vaadi testaamista alle 10kA:n termisellä mitoituskestovirralla tai ehdollisella mitoitusvirralla. Testaamista ei myöskään vaadita, jos keskus suojataan virtaa rajoittavalla suojalaitteella ja dynaaminen oikosulkuvirta ei ylitä 17kA keskuksella. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 74.)

4.4 Keskuksen oikosulkukestoisuuden merkitseminen

Keskuksen oikosulkukestoisuus määräytyy prospektiivisen oikosulkuvirran I_P mukaan, jos suojalaitteena ei ole oikosulkuvirtaa rajoittavia suojalaitteita. Tällöin keskuksen lyhytaikainen mitoituskestovirta I_{CW} on oltava prospektiivista oikosulkuvirtaa I_P suurempi. Keskuksessa merkitään lyhytaikaisen mitoituskestovirran I_{CW} mukaan, jonka keskuksen komponenttien on kestävä määritellyn ajan. Mitoituskestovirran huippuarvo on standardin SFS-EN 61439-1 mukaan $2.1 * I_{CW}$, joka merkitään keskuksen arvokilpeen tunnuksella I_{pk} .

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 74.)

Esimerkiksi keskukselle kohdistuva prospektiivinen oikosulkuvirta I_P on 18,2kA. Tällöin voidaan keskuksen lyhytaikaisen mitoituskestovirran I_{CW} – arvoksi merkitä 19kA ja I_{pk} – arvoksi 40kA. Arvokilpi keskuksessa voisi olla esimerkiksi kuvan 1 mukainen.



KUVA 1. Esimerkki keskuksen tyyppikilven merkinnöistä

Jos suojalaite rajoittaa keskukselle kohdistuvaa oikosulkuvirtaa, käytetään keskuksen merkitsemiseen ehdollisia oikosulkukestoisuuden arvoja. Sulakkeen rajoittamat ehdolliset oikosulkuvirrat saadaan tulkitsemalla prospektiivisen oikosulkuvirran I_P avulla virranrajoituskaaviota. Sulakkeen virranrajoitusta on käsitelty luvussa 3.1.3.

Ehdolliset keskusten arvot merkitään suojalaitteella rajoitettujen arvojen mukaan, jotka voidaan ilmoittaa ehdollisena oikosulkukestoisuutena I_{CC} ja ehdollisena oikosulkuvirran huippuarvona I_{pk} . Lyhenteinä käytetään myös $I_{CC,th}$ ja $I_{CC,dyn}$ – merkintöjä. Ehdollisia oikosulkukestoisuuden arvoja käytettäessä on ilmoitettava, millä suojalaitteella kyseiset arvot on saavutettu. Suojalaite, jolla oikosulkuvirran arvot on saavutettu, tulee ilmetä keskuksen dokumenteista. Ehdollisten oikosulkuvirtojen merkitsemiseen voidaan käyttää myös vaihtoehtoisia merkintätapoja, esimerkiksi 630A gG -etusulakkeella saavutetut arvot: I_{CW} 8 kA, 0,3s ja I_{pk} 37 kA. Toinen vaihtoehtoinen tapa on merkitä sulakkeen koko mukaan, jolloin I_{pk} – arvoa ei tarvitse erikseen ilmoittaa, esimerkiksi: I_{CC} 40 kA sulake 400A.

(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2016, 75.)

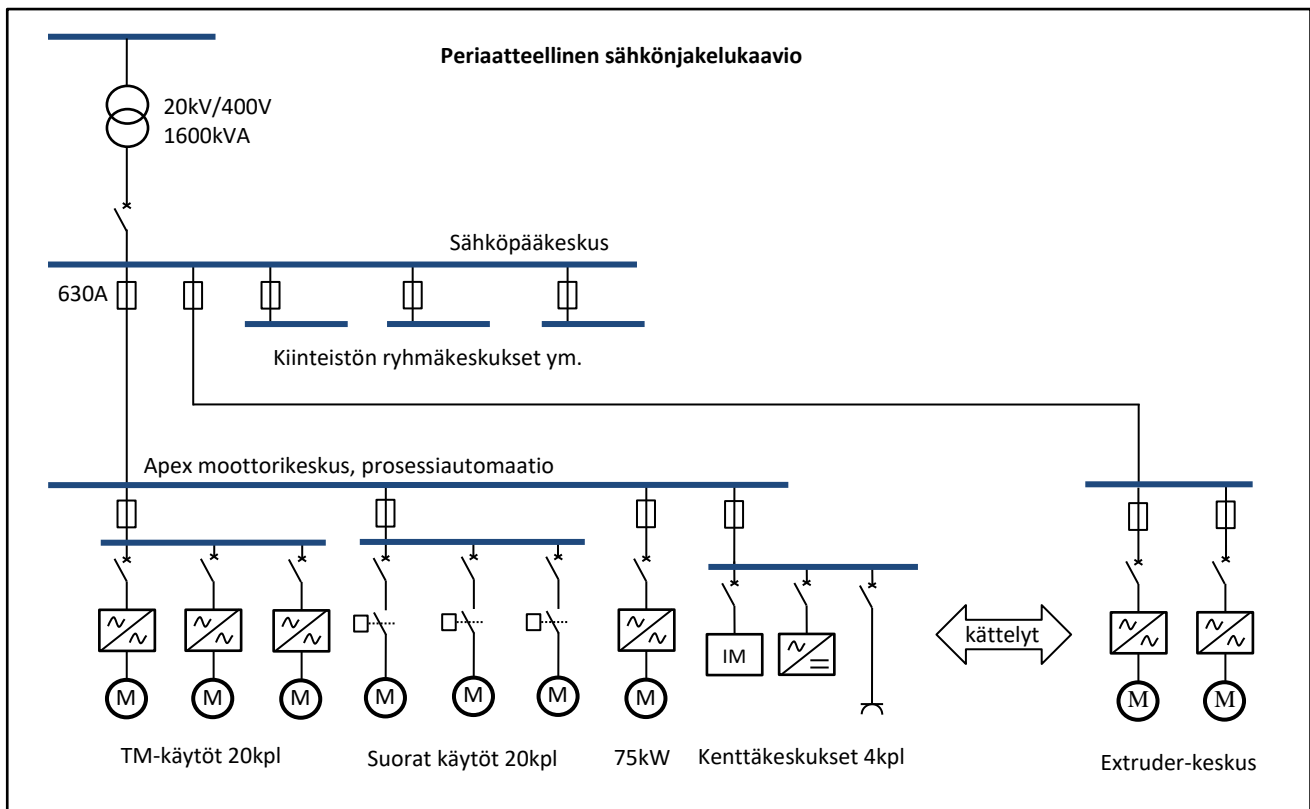
Ehdollisilla oikosulkukestoisuuden arvoilla keskuksen arvokilpi voi olla esimerkiksi kuvan 2 mukainen.

APEX AUTOMATION OY			
Malli / valm. pvm.			
Pxxxx-PK1/pp.kk.vvvv			
In	630	A	Un
			400 VAC
			fn
			24 VDC
			50 Hz
IP	55		Icw
			≤ 10 kA, 0.3s
			Ipk
			37 kA
SFS 61439-2+A1			CE

KUVA 2. Esimerkki keskuksen tyyppikilvestä, jossa on käytössä ehdolliset oikosulkukestoisuuden arvot

5. SOVELTAMINEN SUUNNITTELUSSA

Opinnäytetyön käytännön osuus liittyi samanaikaisesti toteutettuun prosessiautomaatioprojektiin, jossa asiakkaalle suunniteltiin prosessin jännitteenjakelu. Sen lisäksi asiakkaalle toimitettiin koko prosessin kattavat sähkösuunnitelmat, automaatiokeskukset ja automaatio suunnittelut. Lisäksi myös automaation käyttöönotto kuului toteutettuun kokonaisuuteen. Sähkönjakelun periaatekaavio on esitetty kuviossa 10.



KUVIO 10. Periaatteellinen sähkönjakelukaavio

5.1 Lähtötiedot

Sähkösuunnittelu alkoi asiakkaan tilauspäätöksestä, jolloin oli myös määritelty aikataulukus projektin etenemiselle. Projektin alkaessa sähkönsyötön lähtötietoina olivat oikosulkuvirrat jakelumuuntajan ensiöpuolella, jakelumuuntajan tiedot, syöttökaapelit pääkeskukselle ja arvio oikosulkuvirroista pääkeskuksella. Muita suunnittelun lähtötietoja olivat muun muassa laite-

luettelo, jossa oli mukana prosessiin kytkettävät laitteet. Esisuunnittelu projektille oli tehty jo tarjousvaiheessa, jolloin arvio nimellisvirrasta oli tiedossa.

5.2 Nimellisvirran määrittäminen

Alussa selvitetiin liitettävien laitteiden virrankulutus ja arvioitiin niiden käyttöaste. Samalla arvioitiin keskuksen laajennustarpeen virrankulutus, joiden perusteella voitiin määrittää keskuksen nimellisvirta. Nimellisvirta määrää päävirtakatkaisijan nimellisvirran, joka valittiin riittävän suureksi. Keskuksen syöttökaapeli valittiin nimellisvirran mukaan, jossa huomioitiin myös kaapelin asennustapa ja asennusolosuhteet. Kaapelin poikkipinta-alat valittiin standardin SFS-6000 mukaan.

5.3 Oikosulkuvirran määrittäminen

Teoriaosuudessa luvussa 2.3.2 on käsitelty oikosulkuvirran laskentaan tarvittava teoria, jonka mukaan voidaan määrittää keskuksen oikosulkuvirta. Kaavassa 10 tarvittavat resistanssit ja reaktanssit saadaan laskettua teoriaosuudessa käsiteltyjen kaavojen avulla. Lähtötiedoissa oikosulkuvirta oli annettu ennen muuntajaa, jolloin myös muuntajan resistanssi ja reaktanssi otettiin laskuihin mukaan. Muuntajan arvot määritin laskemalla ne muuntajan kilpitiedoista. Muuntajan laskennan teoriaa on käsitelty luvussa 2.1.2. Laskin oikosulkuvirrat pääkeskukselle ja samalla vertasin Siemens SIMARIS – ohjelman antamia arvoja laskennalla saatuihin tuloksiin. Laskennassa käytin mahdollisimman tarkkoja arvoja, jolloin kaapelien resistansseina ja reaktansseina käytin valmistajan ilmoittamia arvoja. Laskentaesimerkit on esitetty tämän työn lopussa, jotka löytyvät liitteistä 4.

5.4 Syöttöpiirin rakenne keskuksessa

Keskuksen jännitteenjakelu toteutettiin virtakiskolla, josta voitiin ottaa syötöt liitäntäadapterilla kulutusryhmille. Virtakiskoksi valittiin Rittal PLS800 – kiskotyyppi, jonka nimellisvirta on 800A.

Prosessikeskuksen oikosulkuvirrat olivat n. 19kA:n luokkaa, jolloin oikosulkuvirtaa oli tarpeen rajoittaa. Oikosulkuvirtaa rajoitettiin valitsemalla liitäntäadapterit, joissa oli mukana kahvasulakesuojaus. Näin kaikkien kuormitusryhmien oikosulkuvirtoja voitiin rajoittaa heti virtakiskon jälkeen, eikä komponenteilta vaadittu niin suurta oikosulkukestoisuutta.

5.5 Komponentin I^2t tarkastelu

Virtapiirin komponenttien on kestettävä oikosulkuvirran aiheuttamat termiset ja dynaamiset rasitukset. Eräässä tapauksessa virtapiirin valittiin komponentti, johon oli leimattu I_{CW} – arvoksi 10kA. Komponentin täytyy siis kestää tätä suurempi oikosulkuvirta. Todellisuudessa komponenttiin kohdistuvan oikosulkuvirran kesto on huomattavasti lyhempi kuin oikosulkukestoisuuden määrittämisessä käytetty yhden sekunnin laskenta-aika. Komponentin etusulakkeena oli 250A gG – kahvasulake, jolloin sen taulukon mukainen I^2t –arvo oli n. 300 kA²s. Komponentin siis täytyi kestää kyseinen energia rikkoutumatta mekaanisesti. Komponentin teknisissä tiedoissa ei suoraan ilmoitettu sen I^2t -kestoisuutta, mutta teknisissä tiedoissa oli määritelty suositeltu etusulake. Suositellun sulakkeen I^2t – arvo on taulukon mukaan n. 500 kA²s. Näin ollen suojalaitteena oleva kahvasulake palaa huomattavasti aiemmin kuin komponentti kerkeää vaurioitua.

Vaihtoehtoinen tarkastelu voidaan tehdä teorian luvun 2.3.7 mukaan, jossa arvioidaan ensin sulakkeen palamiseen kuuluva aika kyseisellä oikosulkuvirralla. Sen jälkeen määritetään komponentille sen vaadittu oikosulkukestoisuus sulakkeen palamisajalle.

5.6 Oikosulkuvirran rajoittaminen

Keskuksessa käytimme 6kA:n oikosulkuvirrankestolla olevia johdonsuojakatkaisijoita, jotka ryhmiteltiin pienempiin ryhmiin ja etusulakkeeksi valittiin 25A-63A:n kahvavarokelähdöt. Myös muut kiskon lähdöt suojattiin kahvavarokelähdöillä. Teoriaosuudessa on käsitelty luvussa 3.1.3 kahvasulakkeen virranrajoitusominaisuutta, jonka perusteella voidaan tulkita, että esimerkiksi 40A:n kahvasulake pienentää 20 kA:n oikosulkuvirran tehollisarvoa noin 1,5kA:iin ja

sysäysoikosulkuvirtaa noin 6kA:iin. Tämän pohjalta valitut johdonsuojakatkaisijat voitiin asentaa etusulakkeella suojattuna keskukseseen.

Teorian 3.1.3 mukaan voidaan myös keskuksen oikosulkuvirran kestovaatimusta pienentää, kun huomioidaan keskuksen syöttävän sulakkeen oikosulkuvirran rajoitus. Kyseisessä keskuksessa syötön suojalaitteena oli 630A:n gG-kahvasulake. 630A:n kahvasulakkeen tarkastelu 19kA:n prospektiivisellä oikosulkuvirralla ei rajoita keskuksen oikosulkuvirtaa juuri yhtään, jolloin keskukseseen kohdistuvaksi oikosulkuvirraksi ei kannata tässä tapauksessa määrittää ehdollista oikosulkuvirtaa $I_{cc,th}$. Toisaalta myös komponenttien oikosulkukestoisuus täyttyy, jolloin ehdolliseen määrittelyyn ei ole tarvetta.

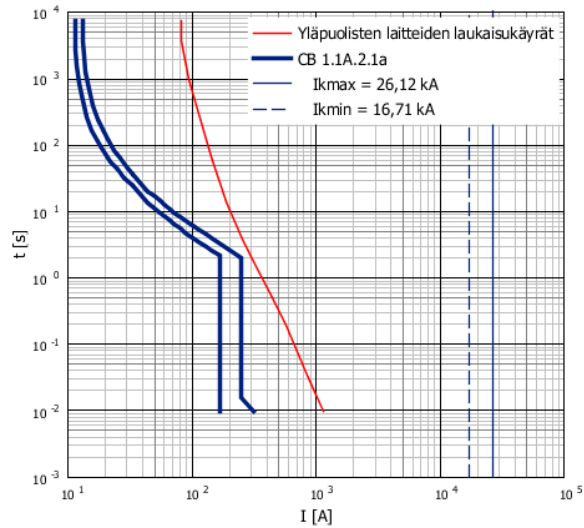
Jos keskuksen suojaava sulake olisi esimerkiksi 500A:n gG-kahvasulake, voitaisiin keskukseseen leimata ehdollinen oikosulkukestoisuus $I_{cc,th}$ 15kA ja ehdollinen sysäysoikosulkuvirran kestoisuus $I_{cc,dyn}$ 32kA. Tällöin pitäisi myös olla määritettynä, että oikosulkukestoisuus on saavutettu 500A:n gG – kahvasulakkeella.

5.7 Selektiivisyystarkastelu

Selektiivisyys toteutui jännitteenjakelun osalta hyvin, koska syöttöpiirissä oli pääasiassa gG-kahvasulakkeita, jotka ovat hyvin selektiivisiä keskenään. Peräkkäisten sulakkeiden koot olivat pääasiassa seuraavia: 630A gG -> 250A-25A gG -> 63A-10A C-johdonsuojakatkaisijat. Jos tarkkaillaan yhden kulutuskojeen suojalaitteiden selektiivisyyttä, niin sen sulakekoot olivat esimerkkitapauksessa seuraavat:

- Keskuksen syötön suojaavat 630A:n gG - sulakkeet
- Virtakiskoston liitäntäadapteri, jossa 63A:n gG – sulakkeet
- Johdonsuojakatkaisija C 16A

Näistä voidaan päätellä, että gG-sulakkeet ovat keskenään selektiivisiä. Johdonsuojakatkaisijan laukaisukäyrä on erityyppinen kuin gG-sulakkeella, joten selektiivisyys tarkastettiin laukaisukäyrien perusteella. Kuvassa 3 on esitetty SIMARIS – ohjelman antamat laukaisukäyrät kyseisistä suojalaitteista, joissa selektiivisyys toteutuu.



KUVA 3. Selektiivisyyskuvaaja tarkasteltavalta kulutuskojeelta. Kuvakaappaus SIMARIS -ohjelmasta

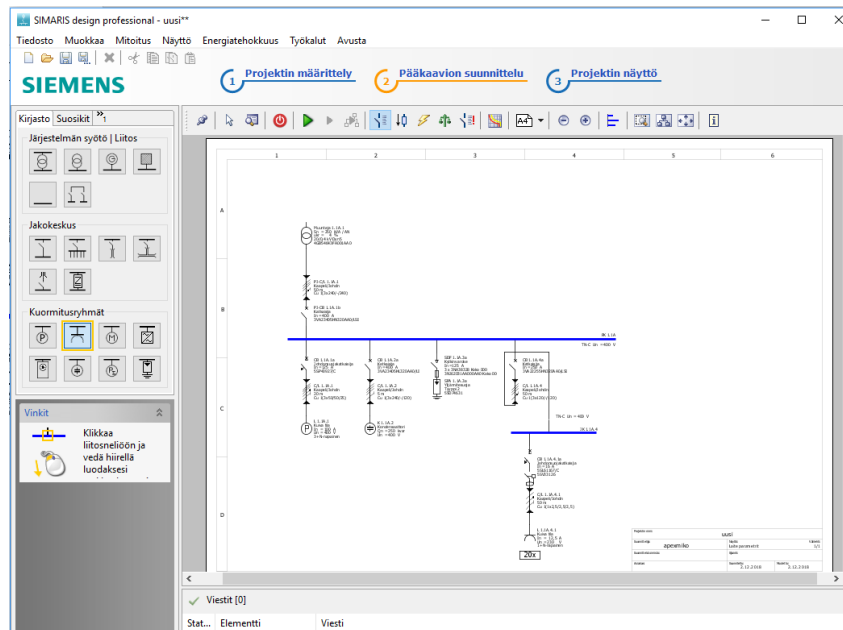
Kaikissa tapauksissa selektiivisyys ei toteutunut yhtä hyvin kuin tässä tapauksessa, vaan laukaisukäyrät leikkasivat toisiaan tietyllä alueella. Ylikuormitustilanteissa selektiivisyys toteutuu hyvin, mutta oikosulkutilanteissa saattaa selektiivisyys olla huonompi.

6 SIEMENS SIMARIS – MITOITUSOHJELMA

Sähköverkkojen mitoitukseen suunnitellulla SIMARIS design – ohjelmistolla voidaan mitoittaa jännitteenjakelupiirit noudattaen VDE- ja IEC – standardeja. Mitoitus voidaan tehdä myös hyödyntäen erilaisia käyttötiloja. SIMARIS – ohjelma mitoittaa oikosulkuvirrat ja kuormitusvirrat keskijännitesyötöltä pistorasioille asti. Ohjelma valitsee automaattisesti piiriin sopivat komponentit ja ohjelma sisältää myös valmiita moottorikäynnistinlohkoja. Ammattikäyttöön tarkoitettu Professional-versio mahdollistaa myös rinnakkaisten syöttöjen ja generaattorisyöttöjen mitoituksen. (Siemens 2015, 5.)

6.1 Yleistä SIMARIS – ohjelmasta

Suunnittelu ohjelmalla on tehty selkeäksi ja tarvittavat toiminnot ovat pikapainikkeina. Suunnittelu on tehty kolmivaiheiseksi, josta ensimmäisessä vaiheessa määritetään asiakastiedot ja kohteeseen syöttävän verkon lähtötiedot keskijännite ja pienjänniteosalle. Toinen vaihe on pääkaaviosuunnittelu, jossa itse suunnittelutyö tapahtuu. Kolmannessa vaiheessa eli projektin näyttövaiheessa saadaan tulostettua suunnitelmat ja erilaiset laskelmat. SIMARIS – ohjelma antaa raportit oikosulkuvirroista ja selektiivisyydestä. Myös erilaisia kaapeliluetteloita ja kaavioita voidaan ohjelmasta tallentaa.



KUVA 4. SIMARIS -ohjelman käyttöliittymä

6.2 Vertailu laskentaan

Vertailu SIMARIS – ohjelman ja kaavoilla laskettujen oikosulkuvirtojen välillä antoi hyvän käsityksen siitä, miten luotettavia tulokset ovat, kunhan lähtötiedot jakeluverkolle on annettu oikein ja ohjelman ymmärtämässä muodossa. Laskentatulosten poikkeamat jäivät alle 10 %:iin, joten voidaan todeta, että tulokset täsmäävät riittävän tarkasti. Laskentavertailua tehtiin myös muilla laskelmilla, joissa tulokset olivat samansuuntaisia. Kahden esimerkkilaskelman tulokset on listattu taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. Laskentatulosten vertailu SIMARIS – ohjelman ja perinteisen laskennan välillä

	I_p	I_{pk}	I_{TH}	$I_{CL,PEN}$
Esimerkki PK	23,6kA	49,6kA	22,4kA	17,2kA
Esimerkki PK, SIMARIS	24,3kA	46kA	19,7kA	17kA
Esimerkki MCC1	18,6kA	37,2kA	17,7kA	10kA
Esimerkki MCC1, SIMARIS	19kA	33,8kA	15,4kA	10,4kA

6.3 Luotettavuus

Mielestäni SIMARIS -ohjelman tulokset ovat luotettavia siinä määrin, että niitä voidaan hyödyntää suunnittelussa. Tulokset kannattaa kuitenkin tarkistaa laskemalla esimerkiksi syötöstä pääkeskukselle, jotta varmistutaan verkon määrittelyn oikeellisuudesta. Ohjelman syöttöpiirin vaihtoehtoja on ohjelmassa useita, joista tarkimmin omia laskelmiani vastasi ”muuntaja keskijänniteliitynnällä”. Kyseiselle syöttöpiirille voidaan tarkemmin määrittää muun muassa keskijänniteverkon oikosulkuvirta. Ilman keskijänniteliityntää pelkällä muuntajalla oikosulkuvirrat olivat reilusti yläkantissa. Tämä johtuu esimerkkitapauksen suhteellisen pienistä oikosulkuvirroista keskijänniteverkolla.

On kuitenkin huomioitava, että laskentaohjelman oikosulkuvirrat ovat prospektiivisiä oikosulkuvirtoja. Kun asian tiedostaa, voi ohjelmaa soveltaa mitoituksessa. Toisaalta tämä voi olla hyvä asia siltä kannalta, ettei keskuksia vahingossa tai tietämättä leimata ehdollisilla oikosulkuvirran arvoilla. Todelliset keskukseen kohdistuvat oikosulkuvirrat voidaan selvittää, kun tulkitaan prospektiivisen oikosulkuvirran avulla sulakkeen virranrajoituskaaviota. Sulakkeen rajoittama dynaaminen oikosulkuvirta saadaan myös suoraan ohjelmasta, joka esitetään nimellä \hat{i}_c . Tästä arvosta voidaan laskea keskukselle kohdistuva terminen oikosulkuvirta.

7 POHDINTA

Opinnäytetyöstä tuli varsin teoriapainotteinen, ja perehtyminen oikosulkuvirtojen laskentaan oli keskeisessä osassa. Aiheena oikosulkuvirrat olivat itselleni aika tuntemattomia, joskin niitä jonkin verran olimme opiskelun aikana käsitelleet.

Opinnäytetyön alkaessa olin työskennellyt Apex Automation Oy:n sähkösuunnittelijana jo jonkin aikaa, jolloin jännitteenjakelun suunnittelut olivat tulleet jokseenkin tutuiksi. Oikosulkuvirtoihin ei kuitenkaan sitä ennen ollut tarvinnut perehtyä.

Aiheen rajaus oli alkuun vaikeaa, koska jännitteenjakelu on aiheena erittäin laaja. Opinnäytetyöhön pyrin ottamaan mukaan sellaisia aiheita, jotka ovat tulleet suunnittelutyössä vastaan ja jotka ovat suunnittelun kannalta merkittäviä. Tavoitteena oli jännitejakelun mitoitusperusteiden läpikäyminen, joka aiheen laajuuden vuoksi rajautui oikosulkuvirtojen ympärille. Opinnäytetyöstä on tarkoituksella jätetty pois muun muassa kaapelien mitoittamiseen liittyvää asiaa, joka suunnittelijoille on jokapäiväistä työtä.

Oikosulkuvirrat ovat oleellinen osa keskusten suunnittelua, joihin kannattaisi kiinnittää enemmän huomiota projektin alkuvaiheessa. Usein pienemmät keskuksat suunnitellaan siten, ettei niiden oikosulkuvirta ole tiedossa. On mahdollista, että keskuksat voidaan asentaa sellaisen syötön perään, jossa niiden oikosulkukestoisuus ylittyy. Tällainen voi tapahtua esimerkiksi silloin, jos syöttöä suojaava suojalaitte on toteutettu kompaktilla katkaisijalla, joka ei rajoita sysäysoikosulkuvirtaa. Toisaalta toimitettavan keskuksen tyyppikilvessä lukee sen oikosulkukestoisuus, joka asennusvaiheessa tulee ottaa huomioon.

Tavoitteena oli selvittää SIMARIS – ohjelman hyödynnettävyys suunnittelussa. SIMARIS – ohjelman laskentatulokset ovat hyvin lähellä laskennalla saatuja arvoja, mutta ohjelmaan kannatta perehtyä ennen sen käyttöä suunnittelussa. Etenkin verkon syöttöjä sai alkuun kokeilla moneen kertaan, ennen kuin ohjelman sai täsmäämään laskelmien kanssa. SIMARIS – ohjelman laskemia oikosulkuvirtoja voidaan hyödyntää sellaisenaan, jos verkot ovat sellaisia, että niissä ei esiinny oikosulkuvirtaa rajoittavia suojalaitteita. Jos oikosulkuvirtaa rajoittavia suojalaitteita käytetään, ei suojalaitteen jälkeen saatava oikosulkuvirta ole todellinen. Todelli-

nen keskukseen kohdistuva oikosulkuvirta saadaan ohjelmasta, kun tarkkaillaan suojalaitteen \hat{I}_c -arvoa.

Oikosulkulaskennat ovat usein valtavan pitkiä numerosarjoja, joissa tapahtuu helposti näppäilyvirheitä laskimella laskettaessa. Niinpä otin itselleni apuun Excelin, johon tein laskentataulukot oikosulkuvirtojen laskentaan. Tämän jälkeen laskenta helpottui huomattavasti, eikä näppäilyvirheitä enää laskelmissa sattunut. Tekemäni taulukkolaskenta jää todennäköisesti käyttöön, ja myös jatkossa laskea sillä tarvittavia oikosulkulaskentoja.

Opinnäytetyön keskeiset tavoitteet onnistuttiin saavuttamaan ja oma osaamiseni aiheesta laajeni. Opinnäytetyön aikana myös käytiin keskustelua, miten keskukseen vaikuttavat oikosulkuvirrat tulisi ottaa huomioon jo tarjousvaiheessa. Myös keskuksien kilpitietoihin tehdään todennäköisesti pieniä muutoksia, jotta ehdollisten oikosulkuvirtojen merkinnät tulevat selvemmin esille.

LÄHTEET

- ABB. 2009. Kahvasulakkeet gG ja aM-tyypit. Esite OF1FI 11-09. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/1SCC317002C1801.pdf>
Viitattu: 26.1.2019.
- ABB. 2000. TTT-käsikirja, Luku 7, oikosulkusuojaus. Pdf-dokumentti. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/07_1_Oikosulkusuojaus%20ja%20sulakkeet.pdf
Viitattu: 19.1.2019.
- Ensto. 2008. Ensto Pro -koulutusaineisto. Www-sivusto. Saatavissa: <http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1204792797383/1210598828380/1211200962452/1211200997922.html>
Viitattu: 19.1.2019.
- Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy. 2018. Sähköturvallisuusmääräykset käytännössä 2018. Espoo: Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy.
- Korpinen, L. 2019. Vikatilanteet. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf>
Viitattu: 19.1.2019.
- Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. & Öistämö, J. 2001. Tekniikan kaavasto, 2.painos, Jyväskylä: Tammertekniikka.
- Rittal. 2014a. Oikosulkukestoisuus IEC:n mukaan, virranjakelu, virtakiskot. Pdf-dokumentti. Saatavissa: http://www.rittal.com/imf/none/3_4128/Rittal_9600000_Oikosulkukestoisuus_3_4128.pdf
Viitattu 6.2.2019.
- Rittal. 2014b. E-Cu (DIN 43 671) -virtakiskojen nimellisvirrat. Pdf-dokumentti. Saatavissa: http://www.rittal.com/imf/none/3_4127/Rittal_3509000_Tekniset_erittelyt_3_4127.pdf
Viitattu 6.2.2019.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2016. SFS-käsikirja 640. Sähkökeskukset. 1.painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Siemens AG. 2015. SIMARIS design help v9.0.0. Munich Germany. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/consultant-support/electrical-planning-software/service-support/support-documents/Documents/Help_SIMARIS_design_9_en.pdf
Viitattu 22.2.2019.
- Sähkötieto ry. 2018. ST 53.14. Ohjeet perinteisten sulakkeiden valinnasta ja käytöstä, alle 1000 V:n sähköjärjestelmät. Päivitetty: 13.11.2018. Saatavissa: ST-kortisto.

Sähkötieto ry. 2017a. ST 53.24. Ohjeita kiinteistöjen enintään 1000 V johtojen mitoituksista ja suojauksesta. Päivitetty: 23.11.2017. Espoo: Sähköinfo Oy. Saatavissa: ST-kortisto.

Sähkötieto ry. 2017b. ST 53.13. Kiinteistön sähköverkon suojauksen selektiivisyys. Päivitetty: 17.10.2017. Espoo: Sähköinfo Oy. Saatavissa: ST-kortisto.

Sähkötieto ry. 2015. ST 53.45. Sulakkeeton suojaus. Päivitetty: 15.9.2015. Espoo: Sähköinfo Oy. Saatavissa: ST-kortisto.

Tiainen, E. 2009. D1-2009 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, 15.painos, Espoo: Sähköinfo Oy.

Kaapelien sähköisiä arvoja. Koottu useasta datalehdessä.
(Prysmia Group, kaapelien tekniset tiedot)

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI			MCMK 2x1,5/1,5 1 kV	MCMK 2x2,5/2,5 1 kV	MCMK 2x6/6 1 kV	MCMK 2x10/10 RM 1 kV	MCMK 3x1,5/1,5 1 kV	MCMK 3x2,5/2,5 1 kV	MCMK 3x6/6 1 kV	MCMK 3x10/10 RM 1 kV	MCMK 3x16/16 RM 1 kV
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)											
Vaihe- ja nolajohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20 °C	Ω/km	12,1	7,41	3,08	1,83	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70 °C	Ω/km	14,5	8,87	3,69	2,19	14,5	8,87	3,69	2,19	1,38
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20 °C	Ω/km	12,1	7,41	3,08	1,83	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,34	0,32	0,30	0,28	0,34	0,32	0,30	0,28	0,26
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,25	0,30	0,35	0,40	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI			MCMK-HF C-PRo 4x25/16	MCMK-HF C-PRo 4x35/16	MCMK-HF C-PRo 4x50/25	MCMK-HF C-PRo 4x70/35	MCMK-HF C-PRo 4x95/50	MCMK-HF C-PRo 4x120/70	MCMK-HF C-PRo 4x150/70	MCMK-HF C-PRo 4x185/95	MCMK-HF C-PRo 4x240/120	MCMK-HF C-PRo 4x300/150
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)												
Vaihe- ja nolajohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,727	0,524	0,387	0,268	0,193	0,153	0,124	0,0991	0,0754	0,0601
Vaihe- ja nolajohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	0,87	0,63	0,47	0,32	0,23	0,19	0,15	0,12	0,097	0,076
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,15	1,15	0,727	0,524	0,387	0,268	0,268	0,193	0,153	0,124
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,30	0,32	0,35	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,52	0,55

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI			AMCMK 3x16/10 1 kV	AMCMK 3x25/16 1 kV	AMCMK 3x35/16 AN 1 kV	AMCMK 3x50/16 AN 1 kV	AMCMK 3x70/21 AN 1 kV	AMCMK 3x95/29 AN 1 kV	AMCMK 3x120/41 AN 1 kV	AMCMK 3x150/41 AN 1 kV	AMCMK 3x185/57 AN 1 kV	AMCMK 3x240/72 AN 1 kV
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)												
Vaihejohtimen maks. tasavirta-resistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,91	1,20	0,868	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125
Vaihejohtimen vaihtovirta-resistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	2,3	1,4	1,0	0,77	0,53	0,39	0,31	0,25	0,20	0,15
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,83	1,15	1,15	1,15	0,868	0,641	0,443	0,443	0,320	0,253
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,28	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,40	0,45	0,55	0,60	0,65	0,75	0,80	0,80	0,85	0,85

Virtakiskojen jatkuva kuormittaminen. Rittal, E-Cu (DIN 43 671) -virtakiskojen nimellisvirrat (Rittal 2014b).

Virtakiskojen jatkuva virta

Poikkipinnaltaan suorakulmaiselle E-Cu-kiskolle sisäasennuksissa 35 °C ilman lämpötilassa ja 65 °C kiskon lämpötilassa pysty- tai vaaka-asennossa kiskon leveyden suhteen.

Leveys x paksuus mm	Halkaisija mm ²	Paino ¹⁾	Materiaali ²⁾	Jatkuva virta A			
				Vaihtovirta 60 Hz asti		Tasavirta + vaihtovirta 16 Hz	
				paljas kisko	maalattu kisko	paljas kisko	maalattu kisko
12 x 2	23,5	0,209	E-Cu F30	108	123	108	123
15 x 2	29,5	0,262		128	148	128	148
15 x 3	44,5	0,396		162	187	162	187
20 x 2	39,5	0,351		162	189	162	189
20 x 3	59,5	0,529		204	237	204	237
20 x 5	99,1	0,882		274	319	274	320
20 x 10	199,0	1,770		427	497	428	499
25 x 3	74,5	0,663		245	287	245	287
25 x 5	124,0	1,110		327	384	327	384
30 x 3	89,5	0,796		285	337	286	337
30 x 5	149,0	1,330		379	447	380	448
30 x 10	299,0	2,660		573	676	579	683
40 x 3	119,0	1,060		366	435	367	436
40 x 5	199,0	1,770		482	573	484	576
40 x 10	399,0	3,550		715	850	728	865
50 x 5	249,0	2,220		583	697	588	703
50 x 10	499,0	4,440		852	1020	875	1050
60 x 5	299,0	2,660		688	826	696	836
60 x 10	599,0	5,330		985	1180	1020	1230
80 x 5	399,0	3,550		885	1070	902	1090
80 x 10	799,0	7,110	1240	1500	1310	1590	
100 x 10	999,0	8,890	1490	1810	1600	1940	

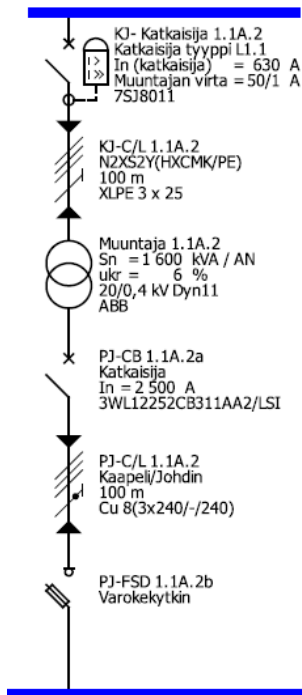
¹⁾ Laskettu tiheydellä 8,9 kg/dm³

²⁾ Määrittelyperuste jatkuvan virran arvoille (arvot standardista DIN 43 671)

gG -sulakkeiden toimintavirrat

gG sulakkeen toimintavirrat automaattisen poiskytkennän vaatimilla toiminta-ajoilla		
Mitoitusvirta I_N (A)	Pienimmät toimintavirrat (A)	
	Toiminta-aika $\leq 0,4$ s	Toiminta-aika $\leq 5,0$ s
2	16	9
4	32	18
6	46,5	28
10	82	46,5
16	110	65
20	145	85
25	180	110
32	270	150
35		165
40	315	190
50	470	250
63	550	320
80	840	425
100	1000	580
125	1450	715
160	1600	950
200	2100	1250
250	2800	1650
315	3700	2200
400	4800	2840
500	6400	3800
630	8500	5100

Vertailulaskenta SIMARIS – ohjelman kanssa



Verkon laskenta:

$$S_{net} = \sqrt{3} * U_{net} * I_{Knet} = \sqrt{3} * 20kV * 2071A = 71,7415MVA$$

$$Z_{net} = \frac{U_N^2}{S_{net}} = \frac{410V^2}{71,7415MVA} = 2,343m\Omega$$

$$X_{net} = 0,995 * Z_{net} = 0,995 * 2,343m\Omega = 2,3314m\Omega$$

$$R_{net} = 0,1 * Z_{net} = 0,1 * 2,343m\Omega = 0,2343m\Omega$$

Jakelumuuntajan laskenta:

$$Z_M = \frac{U_N^2}{S_N} * \frac{u_K}{100} = \frac{410V^2}{1600kVA} * \frac{6\%}{100} = 6,304m\Omega$$

$$R_M = \frac{P_{Cu}}{3 * I_N^2} = \frac{13783W}{3 * 2253A^2} = 0,9051m\Omega$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = \sqrt{6,304m\Omega^2 - 0,9051m\Omega^2} = 6,24m\Omega$$

Kaapelien resistanssin määrittäminen:

$$R_{C1} = \frac{0,0754\Omega}{km} * \frac{100m}{1000m} = 7,54m\Omega$$

$$\frac{1}{R_C} = \frac{1}{75,4m\Omega} + \frac{1}{75,4m\Omega} + \dots + \frac{1}{75,4m\Omega} = 1061 \Rightarrow R_C = 0,9425m\Omega$$

Kaapelien reaktanssin määrittäminen:

$$X_{C1(1km)} = 2 * \pi * f * L_C = 2 * \pi * 50hz * \frac{0,25mH}{km} = \frac{0,0785\Omega}{km}$$

$$\Rightarrow X_{C1} = \frac{0,0785\Omega}{km} * \frac{100m}{1000m} = 7,85m\Omega$$

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{7,85m\Omega} + \frac{1}{7,85m\Omega} + \dots + \frac{1}{7,85m\Omega} = 1019 \Rightarrow X_C = 0,982m\Omega$$

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran määrittäminen PK1:

$$I_{C,3L} = \frac{k * U}{\sqrt{3} * \sqrt{(R_{net} + R_M + R_C)^2 + (X_{net} + X_M + X_C)^2}}$$

$$I_{C,3L} = \frac{1 * 400V}{\sqrt{3} * \sqrt{0,2343m\Omega + 0,9051m\Omega + 0,9425m\Omega)^2 + (2,3314m\Omega + 6,24m\Omega + 0,982m\Omega)^2}}$$

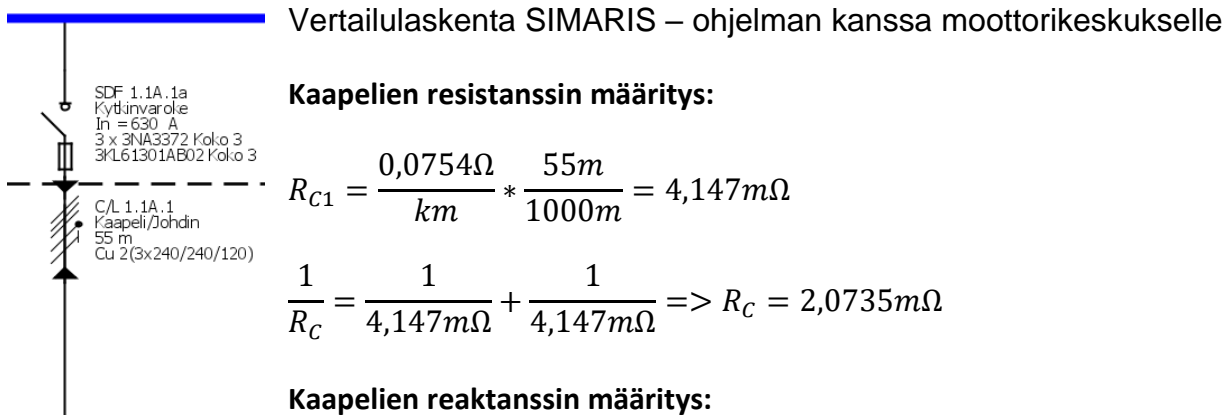
$$I_{C,3L} = \mathbf{23,64kA} \text{ (SIMARIS, 24,3kA)}$$

Kolmivaiheisen tehollisen oikosulkuvirran määrittäminen PK1:

$$I_{TH} = 0,95 * I_{C,3L} = \mathbf{22,44kA} \text{ (SIMARIS, 19,7kA)}$$

Dynaamisen oikosulkuvirran määrittäminen PK1:

$$I_{pk} = 2,1 * I_{C,3L} \approx \mathbf{49,6kA} \text{ (SIMARIS, 46kA)}$$



$$X_{C1(1km)} = 2 * \pi * f * L_C = 2 * \pi * 50hz * \frac{0,25mH}{km} = \frac{0,0785\Omega}{km}$$

$$\Rightarrow X_{C1} = \frac{0,0785\Omega}{km} * \frac{55m}{1000m} = 4,3175m\Omega$$

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{4,3175m\Omega} + \frac{1}{4,3175m\Omega} = 463 \Rightarrow R_C = 2,159m\Omega$$

Oikosulkuvirrat MCC1 -keskukselle:

$$I_{C,3L} = \frac{1 * 400V}{\sqrt{3} * \sqrt{0,2343m\Omega + 0,9051m\Omega + 0,9425m\Omega + 2,0735m\Omega)^2 + (2,3314m\Omega + 6,24m\Omega + 0,982m\Omega + 2,159m\Omega)^2}}$$

$$I_{C,3L} \approx 18,6kA \text{ (SIMARIS, 19,1kA)}$$

Tehollinen oikosulkuvirta MCC1 –keskukselle:

$$I_{TH} = 0,95 * I_{C,3L} \approx 17,65kA \text{ (SIMARIS, 15,4kA)}$$

Dynaaminen oikosulkuvirta MCC1 –keskukselle:

$$I_{pk} = 2,0 * I_{C,3L} \approx 37,2kA \text{ (SIMARIS, 33,8kA)}$$