

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN ALA

OIKOSULKUARVOJEN HUOMIOIMINEN SÄHKÖKESKUKSIEN SUUNNITTELUSSA

TEKIJÄ

Niko Ketolainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Niko Ketolainen			
Työn nimi Oikosulkuarvojen huomioiminen sähkökeskusten suunnittelussa			
Päiväys	30.5.2025	Sivumäärät/Liitteet	36/0
Yhteistyötaho Norelco Oy			
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää yrityksen toimintaa valmistamalla tilaajalle oikosulkuvirtataulukko, josta pystyttäisiin tarkastamaan sulakkeen rajoittamat oikosulkuvirrat. Taulukosta haluttiin saada yksinkertainen ja helppolukuinen vastike laitevalmistajien tarjoamille hankalalukuisille käyrästöille. Työ tehtiin yhteistyössä Norelco Oy:n kanssa. Työn taustalla oli tarve tehostaa keskusten yhdenmukaisempaa ja taloudellisempaa suunnitteluprosessia.</p> <p>Opinnäytetyön aiheen valikoitumiseen vaikutti tilaajan tarve kehittää tarjouslaskennan ja suunnittelun työskentelyä, jota lähdettiin tutkimaan oikosulkukestoisuuksien tiimoilta. Oikosulkukestoisuuksien määrittäminen on osa sähkösuunnittelijan työtehtäviä, joiden määrittämisessä harvoin otetaan huomioon katkaisijoiden tai sulakkeiden kykyä rajoittaa oikosulkuvirtoja. Tämä johtaa keskusten ylimitoitukseen sekä toisinaan epätaloudellisiin ratkaisuihin.</p> <p>Työssä perehdyttiin oikosulkuvirtoja koskeviin määräyksiin ja standardeihin, oikosulkuvirtojen syntyyn ja oikosulkuvirta suojaukseen. Työ toteutettiin ABB Curves -ohjelmalla, jonka avulla pystyttiin määrittämään sulakkeen rajoittamat oikosulkuvirrat. Lopputuloksena syntyi taulukko, josta pystytään tarkistamaan verkon maksimi prospektiivinen oikosulkuvirta, jonka sulake pystyy rajoittamaan ilman, että ylitetään keskusrakenteille määritettyjä oikosulkuarvoja.</p> <p>Työn tavoitteet saavutettiin. Taulukko on tarkoitus ottaa lähitulevaisuudessa käyttöön tarjouslaskennan ja suunnittelun apuvälineenä. Työssä ei käsitelty luottamuksellisia tai arkaluonteisia tietoja, ja sen sisältö pohjautui ainoastaan julkisesti saatavilla oleviin lähteisiin sekä tekijän omiin tietoihin. Tämän ansiosta työn eettiset periaatteet ja sisällön luotettavuus täyttyivät asianmukaisesti.</p>			
Avainsanat standardi, sähkökeskus, oikosulkuvirta, oikosulkusuojaus			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	STANDARDIT JA SÄÄDÖKSET	7
2.1	Sähköturvallisuuslaki	7
2.2	Sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevat yleiset ja olennaiset vaatimukset	7
2.3	Sähkölaitteen ja -laitteiston vaatimustenmukaisuus	8
3	KESKUSTYYPIT	9
3.1	Kehikkokeskukset.....	9
3.2	Kotelokeskukset	10
3.3	Kennokeskukset	11
4	OIKOSULKUVIRRAT	12
4.1	Oikosulkuvirran luonne.....	12
4.2	Thevenin menetelmä	12
4.3	Kolmivaiheinen oikosulku	14
4.4	Kaksivaiheinen oikosulku	15
4.5	Yksivaiheinen oikosulku	16
4.6	Mitoitusvirran huippuarvo	17
4.7	Lyhytaikainen mitoituskestovirta	19
5	OIKOSULKUKESTOISUUS JA -SUOJAUS	21
5.1	Keskusten oikosulkukestoisuus	21
5.2	Johdonsuojakatkaisija	22
5.3	Sulakkeet.....	24
5.4	Katkaisijat	25
5.5	Back up -suojaus.....	27
6	TYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET	29
6.1	Sulakkeiden virranrajoituskäyrästä	29
6.2	ABB Curves -ohjelma	30
6.2.1	Laitteiden lisäys	30
6.2.2	Työkalujen hyödyntäminen	32
6.3	Sulakkeiden rajoittamat oikosulkuvirrat -taulukko	33
7	YHTEENVETO.....	34

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kehikkokeskus (Norelco Oy 2024)	9
Kuva 2. Kotelokeskus (Norelco Oy 2024).....	10
Kuva 3. Kennokeskus (Norelco Oy 2024)	11
Kuva 4. Oikosulkuvirran kuvaaja oikosulun syntyhetkellä (ABB 2000, 197)	12
Kuva 5. Yksivaiheinen sijaiskytkentä (muokattu lähteestä Takalo 2021, 39)	13
Kuva 6. Kolmivaiheinen oikosulku esitettynä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 11)	14
Kuva 7. Kaksivaiheinen oikosulku esitettynä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 12).....	15
Kuva 8. Yksivaiheinen oikosulku esitettynä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 13).....	16
Kuva 9. Sysäysoikosulkuvirta (Tiilikainen n.d., 11)	17
Kuva 10. Sysäyskertoimen riippuvuus piirin R/X suhteesta (ABB 2000, 204)	18
Kuva 11. Tasavirtatekijän m_1 riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimen ja kestoajan välillä (ABB 2000, 204)	19
Kuva 12. Vaihtovirtatekijän n_1 riippuvuus alkuoikosulkuvirran ja oikosulkuvirran tehollisarvon suhteesta (ABB 2000, 205).....	20
Kuva 13. Oikosulkukestoisuuden ilmoittaminen pääkaavion etulehdellä	21
Kuva 14. Johdonsuojakatkaisija (Schneider Electric Acti 9 iC60 2025)	24
Kuva 15. Kahva- ja tulppasulake	25
Kuva 16. Kompaktikatkaisija (Schneider Electric ComPacT NSX 2025)	26
Kuva 17. Ilmakatkaisija (Schneider Electric MasterPact MTZ 2025)	27
Kuva 18. Back up -suojaus (Eaton 2022, 25)	27
Kuva 19. Sulakkeiden virranrajoituskäyrästäön tulkinta (muokattu lähteestä ABB 2019, 30).....	29
Kuva 20. Sulakkeiden lisäys Curves-ohjelmaan	30
Kuva 21. Sulakkeen asetukset	31
Kuva 22. Oikosulkuvirta käyrästä Curves-ohjelmalla	31
Kuva 23. Huippuvirran määrittäminen prospektiivisellä virralla	32
Kuva 24. Prospektiivisen virran määrittäminen huippuvirralla	32
Kuva 25. Sulakkeen rajoittama huippuvirta tietyllä prospektiivisen virran arvolla	33

KÄYTETYT MERKINNÄT

c	Jännitekerroin
I_{cc}	Ehdollinen oikosulkuvirta
I_{cp}	Prospektiivinen oikosulkuvirta
I_{cu}	Oikosulkuvirran katkaisukyky
I_{cw}	Lyhytaikainen mitoitusvirta
I_k	Pysyvä oikosulkuvirta
I_k''	Alkuoikosulkuvirta
I_{k1}	Yksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k2}	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k3}	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_p	Sysäysoikosulkuvirta
I_{pk}	Mitoitusvirran huippuarvo
I_{th}	Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
k, n	Sysäyskerroin
m_1	Tasavirtatekijä
n_1	Vaihtovirtatekijä
R	Resistanssi
R_k	Verkon resistanssi
\overline{R}_1	Myötäkomponenttiverkon resistanssi
t_k	Vian kesto aika
U_n	Verkon nimellisjännite
X	Reaktanssi
X_k	Verkon reaktanssi
\overline{X}_1	Myötäkomponenttiverkon reaktanssi
Z_k	Verkon impedanssi
\overline{Z}_0	Nollakomponenttiverkon impedanssi
\overline{Z}_1	Myötäkomponenttiverkon impedanssi
\overline{Z}_2	Vastakomponenttiverkon impedanssi

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään oikosulkuarvojen vaikutusta sähkökeskuksiin, oikosulkuvirtojen laskemista sekä virranrajoitusta sulakkeiden ja katkaisijoiden avulla. Tämän työn tavoitteena on selvittää tilaaja Norelco Oy:lle, kuinka oikosulkuvirrat vaikuttavat keskusrakenteiden ja komponenttien mitoittamiseen ja, mitä keskuksen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon, jotta välttyttäisiin niiden ylimitoitukselta.

Norelco Oy on vuonna 1962 perustettu suomalainen sähkönjakelujärjestelmien valmistaja. Norelcon toimialaan lukeutuu sähkönjakelujärjestelmien suunnittelu ja valmistaminen uusiutuvan energian, teollisuuden, rakentamisen, infran ja energiasektorin tarpeisiin. Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Savonlinnassa, jonka lisäksi toimintaa löytyy myös Kuopiosta (Norelco Oy 2024.)

Työn taustalla on yrityksen halu kehittää omaa laskennan ja suunnittelun työtä yksinkertaisempaan ja yhdenmukaisempaan suuntaan. Työssä halutaan erityisesti saada selville, mitä pitää ottaa huomioon suunniteltaessa sähkökeskusta, jolle sähkösuunnittelija on määrittänyt korkeat oikosulkuarvot. Yleensä suuret oikosulkuarvot johtuvat siitä, ettei sähkösuunnittelija ole ottanut huomioon sulakkeiden tai katkaisijoiden virranrajoituksia keskuksien mitoituksissa, mikä johtaa toisinaan ylimitoituksiin ja epätaloudellisiin ratkaisuihin.

Norelcolla sulakkeiden rajoittamat virrat on aikaisemmin tarkistettu sulakevalmistajien käyrästäistä, jotka ovat epätarkkoja ja useimmille hankalasti tulkittavia. Työssä perehdytään ABB Curves -ohjelmaan käyttöön, jonka avulla pystytään tarkastelemaan haluttujen komponenttien virranrajoituskykyä desimaalien tarkkuudella. Työn tarkoituksena on luoda tilaajalle yksinkertainen taulukko, josta nähtäisiin sulakkeisiin kohdistuva verkon suurin mahdollinen prospektiivinen oikosulkuvirta, joka estäisi sähkökeskusta tai sen komponentteja vioittumasta.

2 STANDARDIT JA SÄÄDÖKSET

Sähkökeskusten suunnittelussa ja valmistamisessa täytyy ottaa huomioon näitä koskevat standardit ja viranomaisvaatimukset. Tätä varten on luotu SFS-käsikirja 640, joka kiteyttää ennen kaikkea eurooppalaisen pienjännitekeskusten rakenne- ja testausstandardit (SFS-EN-standardit) sekä hyväiksi todettuja soveltamiskäytäntöjä. Nämä standardit pohjautuvat kansainvälisiin IEC-standardeihin, jotka ovat CENELEC:n vahvistamia (SFS-käsikirja 640 2016, 6.) Tärkeimpänä sähkökeskusten valmistusta ohjaavana standardisarjana voidaan pitää SFS-EN 61439-1-7. Tämä standardisarja asettaa yhdenmukaiset määräykset sähkökeskusten suunnittelulle ja valmistamiselle.

Uudistettu IEC 61439 standardisarja pitää sisällään seuraavat osat:

- IEC 61439-1: Yleisvaatimukset
- IEC 61439-2: Ammattikäyttöön tarkoitetut kojeistot
- IEC 61439-3: Maallikkokäyttöön tarkoitetut jakokeskukset
- IEC 61439-4: Työmaakeskukset
- IEC 61439-5: Jakeluverkkokeskukset
- IEC 61439-6: Jakelukiskojärjestelmät
- IEC 61439-7: Erityiskäyttöihin kuten venesatamiin, leirintäalueille, toreille ja sähköajoneuvojen latausasemiin käytettävät keskukset
- IEC/TR 61439-0: Guidance to specifying ASSEMBLIES (SFS-EN 61439-1 2022, 7.)

2.1 Sähköturvallisuuslaki

Suomen sähköturvallisuuslaki on eduskunnan säätämä sähkölaitteita ja -laitteistoja koskeva laki. Sähköturvallisuuslaki asettaa omat vaatimuksensa sähkölaitteille ja laitteistoille, joiden tarkoituksena on varmistaa laitteiden käytön pysyminen turvallisena ja estää sähkömagneettisten häiriöiden haitalliset vahingot sekä turvata sähkölaitteesta tai -laitteistosta vahinkoa kärsineen oikeudet (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, 1 luku 1 §.)

Sovellettavia kohteita ovat sähkölaitteet- ja laitteistot, joita käytetään sähkön tuotannossa, siirrossa, jakelussa sekä käytössä ja, joiden sähköiset ominaisuudet voivat olla vaaraksi tai häiriöksi muille laitteille (Sähköturvallisuuslaki 1 luku 2 §.)

2.2 Sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevat yleiset ja olennaiset vaatimukset

Sähköturvallisuuslain 6. § ja 12. § asettavat vaatimuksia laitteiden ja laitteistojen suunnitteluun, valmistukseen, asentamiseen, huoltoon, käyttöön ja turvallisuuteen. Pykälien mukaan sähkölaitteet ja -laitteistot tulee valmistaa käyttäjäturvallisiksi, niin ettei niistä aiheudu vaaraa hengelle, terveydelle eikä omaisuudelle. Myöskään sähkölaitteista tai laitteistoista ei saa aiheutua kohtuutonta sähköistä häiriötä muille järjestelmille tai laitteille. Vastaavasti sähkölaitteiden tai -laitteistojen toiminta ei myöskään saa häiriintyä helposti sähköisistä ominaisuuksista. Jos edellä mainitut kohdat eivät täyty, ei sähkölaitetta tai laitteistoa saa tällöin saattaa markkinoille tai luovuttaa eteenpäin toisten käyttöön (Sähköturvallisuuslaki 1 luku 6 § & 12 §.)

2.3 Sähkölaitteen ja -laitteiston vaatimustenmukaisuus

Sähköturvallisuuslain 13. § käsittelee valmistajan velvollisuuksia ennen sähkölaitteen markkinoille saattamista. Pykälän mukaan valmistajan on voitava osoittaa, että sähkölaite on suunniteltu ja valmistettu sähkölaitteita koskevien yleisten ja olennaisten vaatimusten mukaisesti. Valmistajan on suoritettava vaatimusten mukaiset toimenpiteet sähkölaitteelle ja laadittava tarvittavat dokumentit. Sähkölaitteesta on laadittava EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus, jonka jälkeen laitteeseen tulee kiinnitettävä CE-merkintä osoittamaan laitteen täyttävän tarvittavat vaatimukset. Laitteen valmistajalla on tämän jälkeen vastuu siitä, että laite täyttää kyseiset vaatimukset (Sähköturvallisuuslaki 1 luku 13 §.)

14. § velvoittaa sähkölaitteen valmistajaa testaamaan näyte markkinoille laitettavasta laitteesta kuluttajien terveyden turvaamiseksi, jos valmistaja näkee tämän tarpeelliseksi. Laki velvoittaa valvomaan ja pitämään kirjaa asiakkaiden tekemistä valituksista, palautuksista tai vaatimustenvastaisista sähkölaitteista (Sähköturvallisuuslaki 1 luku 14 §.)

16. § velvoittaa sähkölaitteen valmistajaa varmistamaan, että tuotteeseen on kiinnitetty vaaditut merkinnät sekä ohjeet ja turvallisuustiedot. Sähkölaite on oltava tunnistettavissa joko tyyppi-, erä- tai sarjanumerolla tai muulla vastaavalla merkinnällä. Tuotteesta, pakkauksesta tai asiakirjoista on käytävä ilmi sähkölaitteen valmistaja, rekisteröity tuotenimi tai tavaramerkki ja postiosoite. Sähkölaitteen mukana tulevissa dokumenteissa on oltava selkeät ohjeet sähkölaitteen turvallisesta käytöstä ja käyttötarkoituksesta (Sähköturvallisuuslaki 1 luku 16 §.)

3 KESKUSTYYPIT

Keskustyyppin valintaan vaikuttavat ensisijaisesti asiakkaan tarpeet, käyttökohde sekä käyttöympäristö. Sähkösuunnittelijan laatimassa pääkaaviossa, jonka pohjalta keskusvalmistaja suunnittelee ja valmistaa keskuksen on esitetty yleensä seuraavat asiat: keskuksen nimellisjännite ja -virta, IP-luokitus, jakelujärjestelmä sekä mahdolliset keskuksen maksimitat. Pienjännitekeskuksissa yleisimmin käytetyt kotelointiratkaisut ovat kehikko-, kotelo- ja kennokeskukset.

3.1 Kehikkokeskukset

Kehikkorunkoon (kuva 1) rakennettu sähkökeskus muodostuu rungosta, johon asennetaan pohjalevy silloin, kun keskuksen taustalla oleva seinämateriaali ei täytä paloturvallisuusvaatimuksia. Pohjalevy on valinnainen osa kehikkorunkoa, eikä standardi tätä vaadi, jos seinämateriaali ei ole palavaa materiaalia. Tästä huolimatta useat keskusvalmistajat käyttävät tätä vakioratkaisuna.

Komponentit asennetaan runkoon yleensä asennuspohjan tai din-kiskon avulla riippuen komponenttien kiinnitysmahdollisuuksista. Kehikkokeskukset voidaan valmistaa seinään kiinnitettäväksi tai lattialla seisovaksi, jolloin keskus rakennetaan sokkelin päälle. Kehikkokeskukset ovat tarkoitettu asennettavaksi kuiviin tiloihin, joihin on yleensä rajattu pääsy vain koulutetuille henkilöille. Jos keskusta ei ole mahdollista asentaa käyttörajoitettuun paikkaan, on keskukseen mahdollista asentaa erillinen suojaovi. Sen tarkoituksena on suojata komponentteja ja estää tarvittaessa luvaton käyttö varustamalla se lukolla tai erikoistyökalua vaativalla salvalla. Kehikkokeskuksia käytetään yleisesti pää-, mittaus- tai jakokeskuksina, joiden kotelointiluokka IP20-31 ja nimellisvirta on tyypillisesti enintään 800 A (Lahti 2025, 13; Norelco Oy 2024.)



Kuva 1. Kehikkokeskus (Norelco Oy 2024)

3.2 Kotelokeskukset

Kotelokeskukset (kuva 2) eroavat kehikkokeskuksista siten, että kotelokeskukset ovat tarkoitettu asennettavaksi kosteisiin/pölyisiin tiloihin. Koteloidun keskusrakenteen avulla voidaan saavuttaa, jopa kotelointiluokka IP54. Tästä syystä kaikki komponentit, joita ei ole suunniteltu kestävänsä suoraan kosketusta veden kanssa, on sijoitettu keskuksen sisäpuolelle. On tärkeää myös huomioida, että keskuksessa käytettävät laipat täyttävät tarvittavat IP-luokitukset. Kotelokeskukset soveltuvat käytettäväksi pääkeskuksina, moottorilähtökojeistoina, nousu- ja pistorasiakeskuksina sekä ilmastointikeskuksina. Näiden keskusten suurin sallittu nimellisvirta voi olla keskusvalmistajan mukaan jopa 1250 A. Tässä on huomattava, että mikäli keskuksen nimellisvirta ylittää 1000 A keskukselta vaaditaan työmaadoitus, joka voidaan toteuttaa käyttämällä joko maadoituspalloja tai maadoituskytkintä (Lahti 2025, 15; Norelco Oy 2024.)



Kuva 2. Kotelokeskus (Norelco Oy 2024)

3.3 Kennokeskukset

Kennokeskus (kuva 3) on lattialle asennettava sähkökeskus, jonka runko rakennetaan sokkelin vaaraan. Kennokeskus koostuu pääsääntöisesti kahdesta tilasta, joita ovat kojetilä ja kiskostotila. Kiskostotila käsittää keskuksen takaosassa olevat kiskot, jotka pääsääntöisesti valmistetaan alumiinista. On kuitenkin erikoistapauksia, jolloin nämä täytyy valmistaa kuparista. Kiskostotila eristetään kojetilasta käyttämällä asennuspohjia, joiden päälle kaikki kojeet kalustetaan. Kojetilä puolestaan käsittää kennokeskuksen etupuolella kaikki päällepäin näkyvät tilat ja komponentit.

Kennokeskusten koteloitiluokka vaihtelee yleensä IP20:n ja IP54:n välillä. Kennokeskukset soveltuvat käytettäväksi teollisuudessa ja suurissa kiinteistöissä. Valmistajasta riippuen kennokeskuksen nimellisvirta voi olla jopa 5000 A. Tässä pätee sama kuin kotelokeskustenkin kohdalla: keskuksen nimellisvirran ylittäessä 1000 A, keskukselta vaaditaan tällöin työmaadoitus.

Toisin kuin kehikko- ja kotelokeskuksissa, muodostuu kennokeskukset pääsääntöisesti suurivirtaisista lähdöistä, jolloin asiakkaan käyttämät kaapelitkin ovat lähtökohtaisesti paksumpia. Tämä voi hankaloittaa kaapelien pujottamista keskuksen sisään. Tällaisissa tilanteissa hyödynnetään kaapelikuiluja, jotka mahdollistavat paremman tilanhallinnan suurikokoisten kaapeleiden asennuksessa. Kuilujen käyttö mahdollistaa myös lähtöjen tiiviimmän asettelun runkoon, kun asiakkaan kaapelit eivät kulje suoraan tilojen lävitse (Lahti 2025, 14; Norelco Oy 2024.)



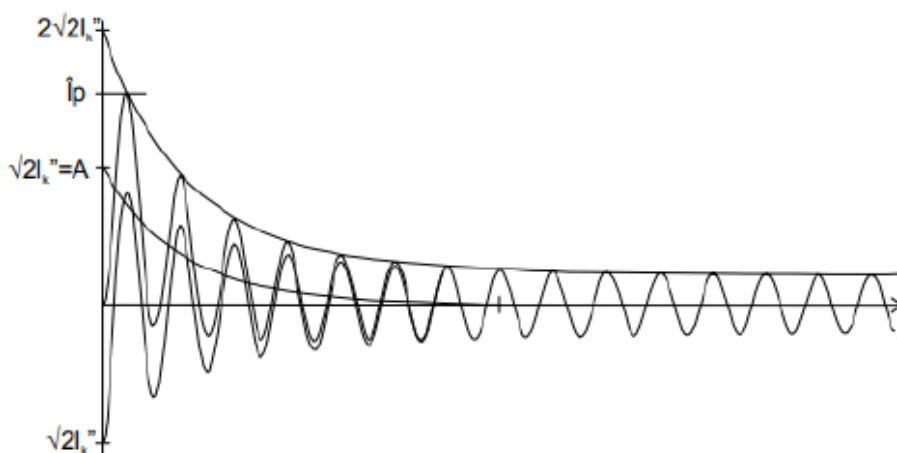
Kuva 3. Kennokeskus (Norelco Oy 2024)

4 OIKOSULKUVIRRAT

Oikosulku syntyy tilanteessa, jossa kaksi tai useampi jännitteinen osa joutuu kontaktiin keskenään. Tällöin virta pääsee kulkemaan normaalista poikkeavaa reittiä pitkin, esimerkiksi alhaisen resistanssin tai impedanssin kautta. Ohmin lain mukaisesti resistanssin pienentyessä virta kasvaa, jolloin sähköverkossa ilmenee suurta ylivirtaa. Ylivirta aiheuttaa merkittäviä lämpörasituksia sekä voimakkaita sähkömagneettisia voimia verkkoon kytketyille laitteille. Sähkökeskuksissa oikosulku voi ilmetä itse keskuksen rakenteissa, syöttävässä tai lähtevässä kaapelissa tai keskuksen kytketyssä laitteessa (Liimatainen 2018, 2; Timlin 2020, 10.)

4.1 Oikosulkuvirran luonne

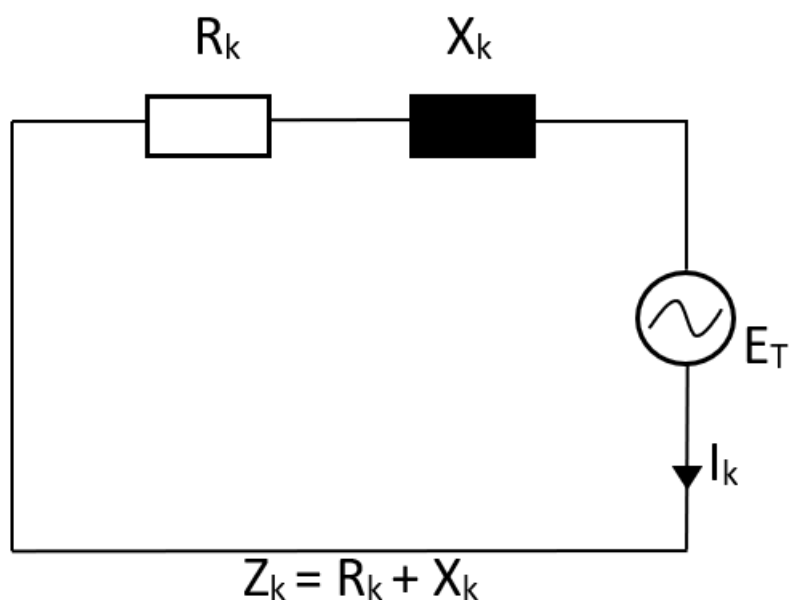
Oikosulkuvirta voidaan luokitella symmetriseksi tai epäsymmetriseksi sen kuvaajan perusteella (kuva 4). Oikosulkuvirta koostuu tasavirtakomponentista A (kuva 4), jonka suuruus määräytyy oikosulun alkamishetken mukaan ja, jonka vaimenemisnopeus riippuu virtapiirin resistanssin ja reaktanssin välisestä suhteesta (R/X -suhteesta), sekä vaihtovirtakomponentista, jossa voi myös esiintyä vaimenemista. Alkuoikosulkuvirta I_k'' kuvaa symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvoa heti vian syntyhetkellä ja se määräytyy pääasiassa generaattoreiden hetkellisten reaktanssien perusteella. Resistanssien kasvaminen vikahetkellä johtaa virran vaimenemiseen jatkuvuustilan arvoon I_k . Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellinen arvo, joka sisältää myös tasavirtakomponentin, kutsutaan syysoikosulkuvirraksi I_p (ABB 2000, 197.)



Kuva 4. Oikosulkuvirran kuvaaja oikosulun syntyhetkellä (ABB 2000, 197)

4.2 Thevenin menetelmä

Thevenin menetelmällä voidaan kuvata yksinkertaistetusti verkon rakenne luomalla sijaiskytkentä. Sijaiskytkennässä kaikki verkon komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla. Pistettä, jossa verkon vikaantuminen tapahtuu, kuvataan sijaiskytkennässä ns. ekvivalenttisella jännitelähteellä (ABB 2000, 197.)



Kuva 5. Yksivaiheinen sijaiskytkentä (muokattu lähteestä Takalo 2021, 39)

Kuvassa 5 verkon oikosulkuimpedanssi Z_k , joka muodostuu syöttävän verkon ja vikapaikan oikosulkuresistansseista R_k ja oikosulkureaktansseista X_k . E_T kuvaa syöttävää jännitelähdettä.

Alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 1.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (1)$$

- I_k'' = alkuoikosulkuvirta
- c = taulukon 1 mukainen jännitekerroin
- U_n = syöttävän verkon nimellisjännite
- R_k = verkon resistanssi
- X_k = verkon reaktanssi
- Z_k = verkon impedanssi

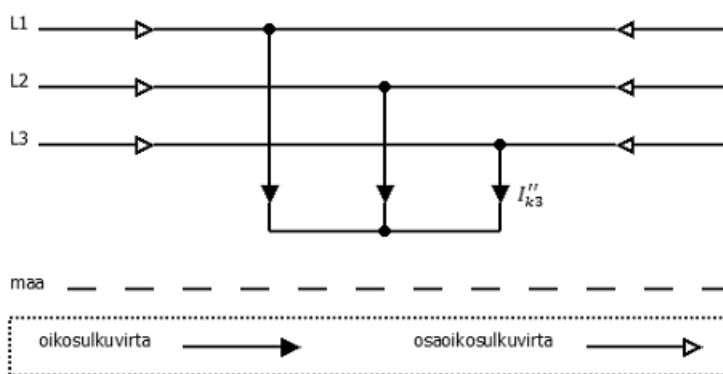
Taulukon 1 mukainen jännitekerroin c ottaa huomioon jännitteen aleneman, joka tapahtuu oikosulun aikana. Kertoimen suuruuteen vaikuttaa laskettavan verkon nimellisjännite ja se, halutaanko laskea minimi- vai maksimioikosulkuvirtaa.

Taulukko 1. IEC-60909- mukainen jännitekerroin c (ABB 2000, 198)

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta C_{max}	Minimioikosulkuvirta C_{min}
pienjännite 100 -1000V 230 V/400 V	1,00	0,95
muut jännitteet	1,05	1,00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
suurjännite 35 kV -230 kV	1,10	1,00

4.3 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheinen oikosulku I_{k3} on symmetrinen vika, joka aiheuttaa eri vikatilanteista usein suurimman vikavirran. Kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu, kun kaikki kolme vaihetta yhdistyy keskenään, jolloin vikakohdan jännitteet laskevat nollaan. Vaiheiden yhdistyttyä vikapisteessä impedanssi on hyvin pieni, jonka seurauksena syntyy suuri vikavirta. Kuvassa 6 havainnollistettuna kolmivaiheinen oikosulku (Eronen 2014, 11.)



Kuva 6. Kolmivaiheinen oikosulku esitettyä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 11)

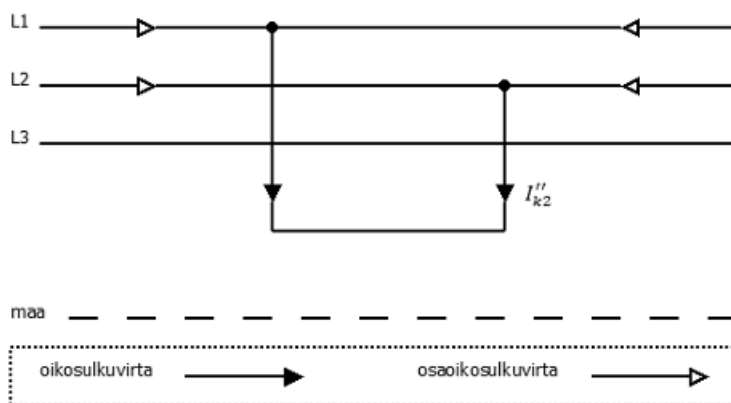
Kolmivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 2.

$$I_{k3} = \frac{\frac{cU_n}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\bar{R}_1^2 + \bar{X}_1^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\bar{Z}_1} \quad (2)$$

- I_{k3} = kolmivaiheinen oikosulkuvirta
- c = taulukon 1 mukainen jännitekerroin
- U_n = syöttävän verkon jännite
- \bar{R}_1 = myötäkomponenttiverkon resistanssi
- \bar{X}_1 = myötäkomponenttiverkon reaktanssi
- \bar{Z}_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi

4.4 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheinen oikosulku I_{k2} on epäsymmetrinen vika, joka aiheuttaa lähes aina pienemmän vikavirran kuin kolmivaiheinen oikosulku. Tahtikoneen läheisyydessä on kuitenkin mahdollista, että kaksivaiheinen oikosulkuvirta kasvaa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suuremmaksi. Kaksivaiheinen oikosulku tapahtuu, kun kaksi vaihetta yhdistyy keskenään, tällöin vikakohdan jännitteet laskevat nolleen, jos vikapisteessä ei esiinny impedanssia. Kuvassa 7 havainnollistettu kaksivaiheinen oikosulku (Eronen 2014, 12.)



Kuva 7. Kaksivaiheinen oikosulku esitettyinä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 12)

Jos oikosulun myötä- ja vastakomponenttien impedanssit eivät ole yhtäsuuret, saadaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta ilman maakosketusta laskettua kaavalla 3.

$$I_{k2} = \frac{cU_n}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2|} \quad (3)$$

- I_{k2} = kaksivaiheinen oikosulkuvirta
- c = taulukon 1 mukainen jännitekerroin
- U_n = syöttävän verkon jännite
- \overline{Z}_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi
- \overline{Z}_2 = vastakomponenttiverkon impedanssi

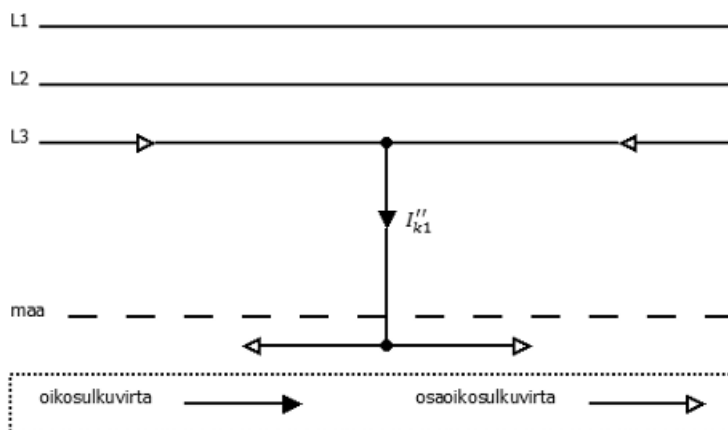
Jos oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, ovat \overline{Z}_1 ja \overline{Z}_2 lähes samansuuruiset. Tällöin voidaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskea kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla (kaava 4).

$$I_{k2} = \frac{cU_n}{2|\overline{Z}_1|} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3} \quad (4)$$

- I_{k3} = kolmivaiheinen oikosulkuvirta

4.5 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheinen oikosulku I_{k1} eli maasulku on epäsymmetrinen vika, joka aiheuttaa yleensä pienim-
män vikavirran. Yksivaiheinen oikosulku tapahtuu, kun vaihe pääse kosketukseen maan kanssa.
Tämä tapahtuu yleensä johtavan materiaalin tai johtimen avulla. Kuvassa 8 havainnollistettu
yksivaiheinen oikosulku (Eronen 2014, 13.)



Kuva 8. Yksivaiheinen oikosulku esitettyä virran kulkusuunnilla (Eronen 2014, 13)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 5.

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} \quad (5)$$

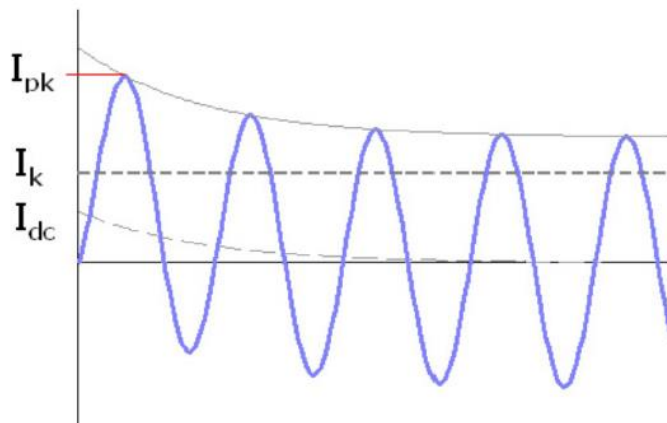
- I_{k1} = yksivaiheinen oikosulkuvirta
- c = taulukon 1 mukainen jännitekerroin
- U_n = syöttävän verkon jännite
- \overline{Z}_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi
- \overline{Z}_2 = vastakomponenttiverkon impedanssi
- \overline{Z}_0 = nollakomponenttiverkon impedanssi

Jos oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, ovat \overline{Z}_1 ja \overline{Z}_2 lähes samansuuruiset. Tällöin voi-
daan yksivaiheinen oikosulkuvirta laskea kaavalla 6.

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\overline{Z}_1 + \overline{Z}_0|} \quad (6)$$

4.6 Mitoitusvirran huippuarvo

Mitoitusvirran huippuarvo I_{pk} eli sysäysoikosulkuvirta I_p ilmaisee suurimman mahdollisen oikosulkuvirran arvon, joka tapahtuu viimeistään 10 ms kohdalla oikosulun syntyhetkestä. Mitoitusvirran huippuarvoa voidaan rajoittaa käyttämällä esim. sulakkeita tai kompaktikatkaisijoita (Timlin 2020, 14.) Oikosulun suurin mahdollinen virta-arvo ei välttämättä esiinny 10 ms kohdalla oikosulun synnystä vaan tähän vaikuttaa myös, missä kohtaa puolijaksoa oikosulku tapahtuu. Näin ollen oikosulun suurin hetkellinen arvo voi tapahtua välillä 0–10 ms. Kuvassa 9 nähdään oikosulkuvirran synty ja mitoitusvirran huippuarvo I_{pk} 5 ms kohdalla.



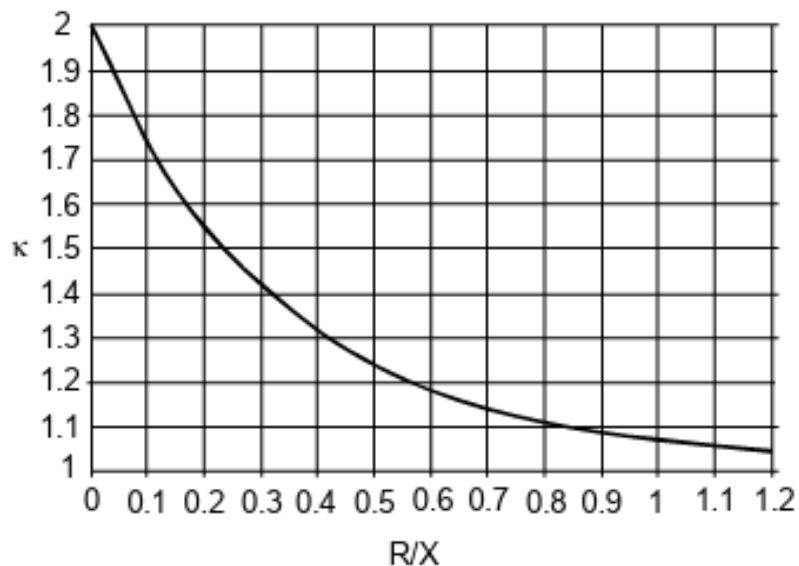
Kuva 9. Sysäysoikosulkuvirta (Tiilikainen n.d., 11)

Mitoitusvirran huippuarvo saadaan laskettua kaavalla 7.

$$I_{pk} = I_p = \sqrt{2}kI_{cp} \quad (7)$$

- I_{pk} = mitoitusvirran huippuarvo
- I_p = sysäysoikosulkuvirta
- k = sysäyskerroin
- I_{cp} = prospektiivinen oikosulkuvirta

Sysäyskerroin k saadaan kuvasta 10, jossa kerroin on esitettyinä verkon resistanssin (R) ja reaktanssin (X) funktiona.



Kuva 10. Sysäyskerroimen riippuvuus piirin R/X suhteesta (ABB 2000, 204)

Vaihtosähköjärjestelmissä voidaan käyttää myös taulukon 2 mukaista sysäyskerrointa n mitoitusvirran huippuarvon selvittämiseksi, kun tiedetään oikosulkuvirran tehollisarvo I_{cp} .

Tällöin mitoitusvirran huippuarvo saadaan laskettua kaavalla 8.

$$I_{pk} = I_p = nI_{cp} \quad (8)$$

- I_{pk} = mitoitusvirran huippuarvo
- I_p = sysäys-oikosulkuvirta
- n = sysäyskerroin
- I_{cp} = prospektiivinen oikosulkuvirta

Taulukko 2. IEC-61439-mukainen sysäyskerroin n (SFS-EN 61439-1 2022, 89)

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

^a Taulukon arvot pätevät useimpiin sovelluksiin. Erityisissä paikoissa, esim. muuntajan tai generaattorin läheisyydessä, voi tehokerroin saada pienempiä arvoja, jolloin prospektiivisen virran huippuarvo voi tulla rajoittavaksi arvoksi oikosulkuvirran tehollisarvon sijasta.

4.7 Lyhytaikainen mitoituskestovirta

Lyhytaikainen mitoitusvirta I_{cw} on oikosulkuvirran arvo, joka laitteen tulee kestää määritelty aika. Oikosulkuvirran tehollisarvon suuruus riippuu määritetystä kestoajasta, joka ei yleensä ylitä 1 s. Tästä syystä lyhytaikaisen mitoitusvirran määrittäminen on hankalaa, koska sen suuruus ei ole pysyvä arvo, vaan se muuttuu suhteessa aikaan (Timlin 2020, 16.)

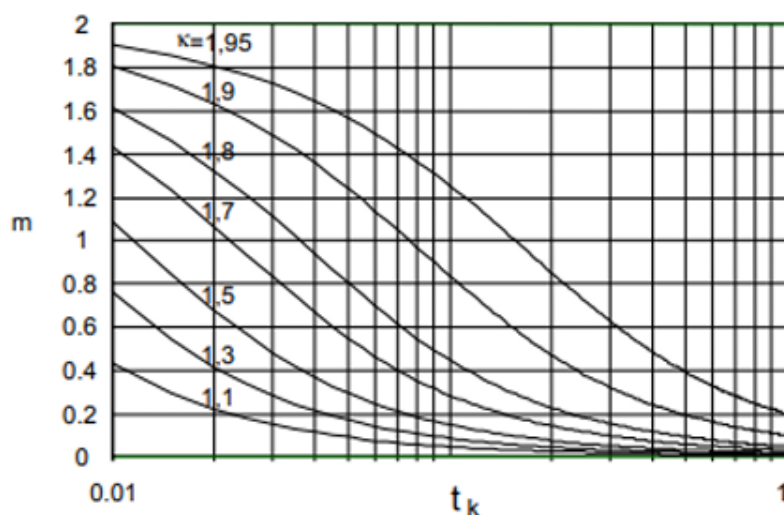
Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} kuvastaa keskimääräistä pysyvän tilan tehollisarvoa, joka aiheuttaa teoreettisesti saman termisen rasituksen laitteelle kuin epäsymmetrinen oikosulkuvirta 1 sekunnin aikana (Huotari & Partanen 1998, 29.)

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 9.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m_1 + n_1) * t_k} \quad (9)$$

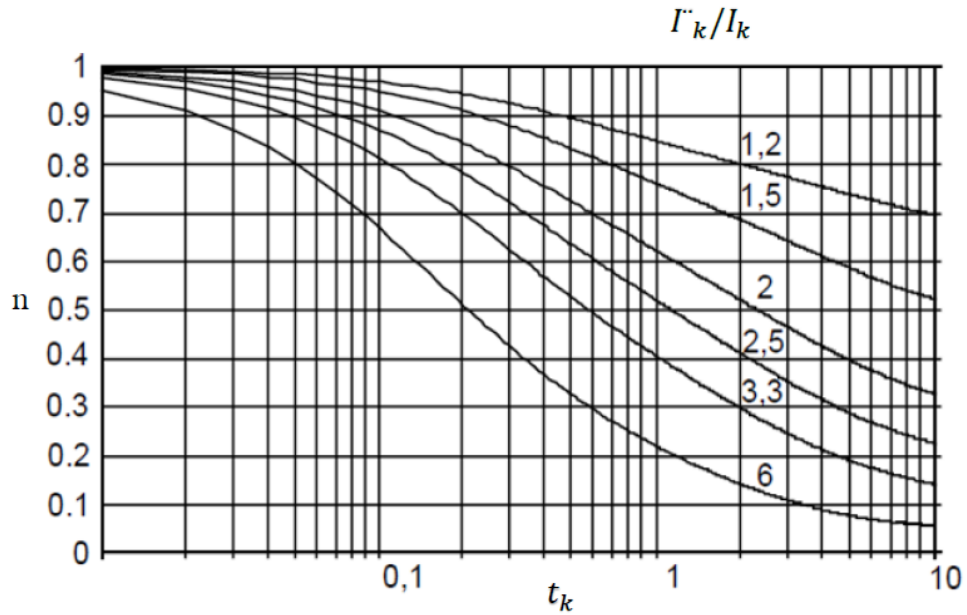
- I_{th} = ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
- I_k'' = alkuoikosulkuvirta (A)
- m_1 = tasavirtatekijä
- n_1 = vaihtovirtatekijä
- t_k = vian kesto aika (s)

Tasavirtatekijä m_1 esittää vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutusta oikosulkutilanteessa. Tasavirtatekijän m_1 suuruuteen vaikuttaa sysäyskertoimen k arvo suhteessa vian kesto aikaan t_k . Kuvasta 11 saadaan määritettyä tasavirtakomponentin arvo.



Kuva 11. Tasavirtatekijän m_1 riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimen ja kestoajan välillä (ABB 2000, 204)

Vaihtovirtatekijä n_1 puolestaan esittää vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutusta oikosulkutilanteessa. Vaihtovirtakomponentin n_1 suuruuteen vaikuttaa alkuoikosulkuvirran I_k'' ja pysyvän oikosulkuvirran I_k suhteen lisäksi vian kestoaika t_k . Kuvasta 12 saadaan määritettyä vaihtovirtatekijän n_1 arvo.



Kuva 12. Vaihtovirtatekijän n_1 riippuvuus alkuoikosulkuvirran ja oikosulkuvirran tehollisarvon suhteesta (ABB 2000, 205)

5 OIKOSULKUKESTOISUUS JA -SUOJAUS

Oikosulkukestoisuuden ja -suojausten rajat määrittävät SFS 640 ja sähköturvallisuuslaki. Käsikirja SFS 640 tiivistää SFS-EN 61439 standardisarjan osat 1–7. Oikosulkusuojausten tarkoituksena on ehkäistä omaisuus ja henkilövahinkojen syntyminen katkaisemalla virtapiiri mahdollisimman nopeasti oikosulun syntymishetkellä, jotta virta ei ehtisi saavuttamaan huippuarvoaan.

5.1 Keskusten oikosulkukestoisuus

Sähkökeskuksen rakenteen ja komponenttien tulee kestää käyttöpaikalla mahdollisesti esiintyvät oikosulkuvirrat sekä niistä aiheutuvat mekaaniset lämpövaikutukset (SFS-käsikirja 640 2016, 74.) Oikein mitoitettu keskus ehkäisee laitteistovaurioita ja suojaa käyttäjiä, mikä on olennainen osa sähköturvallisuuden kokonaisuutta.

Keskusta mitoittaessa suunnittelijan on otettava huomioon mitoitusvirran huippuarvo I_{pk} , lyhytaikainen mitoitusvirta I_{cw} , ehdollinen oikosulkuvirta I_{cc} ja prospektiivinen oikosulkuvirta I_{cp} . Keskuksen mitoitus voidaan toteuttaa ehdollisen oikosulkuvirran mukaan, jos keskuksen syöttöön on asennettu oikosulkuvirtaa rajoittavia suojalaitteita, kuten sulakkeita tai katkaisijoita. Mikäli syötöstä ei löydy suojalaitetta, joka rajoittaisi oikosulkuvirtaa, täytyy keskus mitoittaa prospektiivisen oikosulkuvirran mukaan. Näillä valinnoilla on suora vaikutus keskuksien suunnitteluun ja komponenttien valintaan, joka taatusti näkyy keskuksien hinnassa (SFS-käsikirja 640 2016, 74.)

Oikosulkuvirtojen selvittäminen voidaan toteuttaa joko mittaamalla tai laskennallisesti. Käytännössä laskennallinen lähestymistapa on suositeltavin erityisesti uudiskohteissa, joissa mittauksia ei voida tehdä ennen keskuksen valmistumista (SFS-käsikirja 640 2016, 73.) Lisäksi myös käyttöön otetuissa kohteissa mittaustuloksiin voi liittyä epävarmuuksia, esimerkiksi verkon kuormituksen vaihtelun vuoksi.

Sähkösuunnittelijalla on vastuu oikosulkuvirtojen laskennasta. Tulokset tulee esittää keskuksen pääkaavion etulehdellä, josta keskusvalmistajan on nämä mahdollista nähdä (kuva 13).

3 Keskuksen oikosulunkestävyys

Mitoituskestovirran huippuarvo	I_{pk}	_____	kA
Keskuksen lyhytaikainen mitoituskestovirta ja aika	I_{cw}	_____	s
Ehdollinen mitoituskestovirta	I_{cc}	4 _____	kA
Maksimi sulakekoko		63 _____	A
SFS käsikirja 640 taulukon 9.3-T1 mukaisesti		<input type="checkbox"/>	

Kuva 13. Oikosulkukestoisuuden ilmoittaminen pääkaavion etulehdellä

Tarvittaessa voidaan hyödyntää valmiita taulukoita, joissa esitetään vähimmäisarvoja oikosulkuvirroille (taulukko 3). Näiden avulla voidaan tarkistaa laskennan oikeellisuus tai käyttää arvoja mitoituksen pohjana, kun tarkkoja käyttöpaikkakohtaisia tietoja ei ole saatavilla.

Jos laskelmien tulokset poikkeavat huomattavasti taulukkoarvoista, on poikkeamille esitettävä teknisesti perustellut syyt. Tämä korostuu tilanteissa, joissa verkon rakenne tai sähkönjakelun olosuhteet eroavat olennaisesti tavanomaisista toteutuksista.

Taulukko 3. Standardin määrittämät oikosulkukestoisuudet keskuksille 400V:n jännitteellä (SFS-käsikirja 640 2016, 61)

Keskuksen mitoitusvirta I_{nAA}	Lyhytaikainen mitoituskestovirta (oikosulkuvirran tehollisarvo keskuksen syöttöliittimissä) I_{cw} 0,3 s tai I_{cc} kA	Mitoituskestovirran huippuarvo I_{pk} kA
$\leq 125^*$	<2,0	<3,0
$> 125 \leq 250$	5,0	7,5
$>250 \leq 400$	6,3	10,7
$>400 \leq 630$	12,5	25,0
$>630 \leq 800$	16,0	32,0
$>800 \leq 1000$	20,0	40,0
$>1000 \leq 1600$	25,0	52,5
$>1600 \leq 2000$	31,5	66,2
$>2000 \leq 2500$	40,0	84,0
$>2500 \leq 3150$	50,0	105,0
>3150	valmistajan ja käyttäjän/ tilaajan sopimuksen mukaan	

* Pienillä < 125 A keskuksilla oikosulunkestävyyden arvolla ei ole yleensä merkitystä

5.2 Johdonsuojakatkaisija

Johdonsuojakatkaisija on pienjänniteverkossa käytettävä automaattisesti laukeava suojalaite. Se toimii ylivirta- ja oikosulkusuojana, joka suojaa sisäasennusten johtoja ja laitteita. Oikosulun sattuessa johdonsuojakatkaisija toimii sähkömagneettisen pikalaukaisumekanisminsa avulla, mikä mahdollistaa nopean katkaisun ennen virran huippuarvon saavuttamista.

Johdonsuojakatkaisijoita on saatavana useilla eri laukaisukäyrillä, joista valitaan sopiva käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi B- ja C-käyrän katkaisijat soveltuvat yleisesti asennusjohtojen suojaamiseen. B-käyrän katkaisijat reagoivat nopeasti ja sopivat resistiivisten kuormien, kuten lämmityksen ja valaistuksen suojaamiseen. C-käyrän katkaisijat mahdollistavat hitaamman laukaisun ja ovat siksi käyttökelpoisia myös lievästi induktiivisille tai kapasitiivisille kuormille. K-käyrä soveltuu erityisesti teollisuuskuormille, kuten moottoreille ja muuntajille, kun taas Z-käyrän katkaisijat ovat tarkoitettu herkille piireille, kuten puolijohteille sekä jännite- ja mittamuuntajille. Johdonsuojien käyttökohteet eriteltynä taulukossa 4 (ST 53.45, 2015, 4.)

Taulukko 4. Johdonsuojakatkaisijoiden käyttökohteet

Laukaisukäyrä	Käyttökohteet
B-käyrä	Resistiiviset kuormat: valaistus, lämmitys
C-käyrä	Lievästi induktiiviset tai kapasitiiviset kuormat: pienet moottorit, loistevalot
D-käyrä	Voimakkaasti induktiiviset kuormat: suurikokoiset moottorit, muuntajat
K-läyrä	Vahvavirtapiirit: moottorit, lamput, ohjauslaitteet
Z-, ja A-käyrä	Herkät virtapiirit: puolijohteet, mittamuuntajat, elektroniikkalaitteet

Johdonsuojakatkaisijoiden oikosulkuvirran katkaisukyky I_{cu} vaihtelee tyyppin mukaan, mutta yleisesti se asettuu 3–25 kA välille. Katkaisukyky määrittää suurimman virran, jonka laite pystyy turvallisesti katkaisemaan ilman katkaisijan vaurioitumista (taulukko 5) (ST 53.45, 2015, 3.)

Taulukko 5. Johdonsuojakatkaisijoiden pito- ja laukaisu-arvot (ST 53.45, 2015, 4)

	Ylikuormitussuojaus		Oikosulkusuojaus	
	> 1 h × I_n	< 1 h × I_n	> 100 ms × I_n	< 100 ms × I_n
	Pito	Laukaisu	Pito	Laukaisu
B	1,13	1,45	3	5
C	1,13	1,45	5	10
D	1,13	1,45	10	20
K	1,05	1,2	8	12
Z	1,05	1,2	2	3
A	1,13	1,45	2	3

Rakennussähköistyksessä johdonsuojakatkaisijat (kuva 14) ovat korvanneet perinteiset sulakkeet lähes kokonaan. Yksi merkittävimmistä eduista sulakkeisiin nähden on niiden uudelleenkäytettävyys. Katkaisijan lauettua voidaan se palauttaa uudelleen käyttöön, kun vika on saatu korjattua, toisin kuin sulake, joka täytyy vaihtaa uuteen. Tämän lisäksi johdonsuojakatkaisijan toiminta on helppo havaita suoraan sähkökeskuksesta, toisin kuin tulppasulakkeessa, jossa sulakkeen laukeaminen ei aina näy selkeästi.

Johdonsuojakatkaisijan käyttö tuo myös etuja tilankäytön suhteen. Suurissa keskuksissa ne vievät vähemmän tilaa kuin sulakkeelliset lähdöt, mikä mahdollistaa kompaktimman ja selkeämmän toteutuksen.



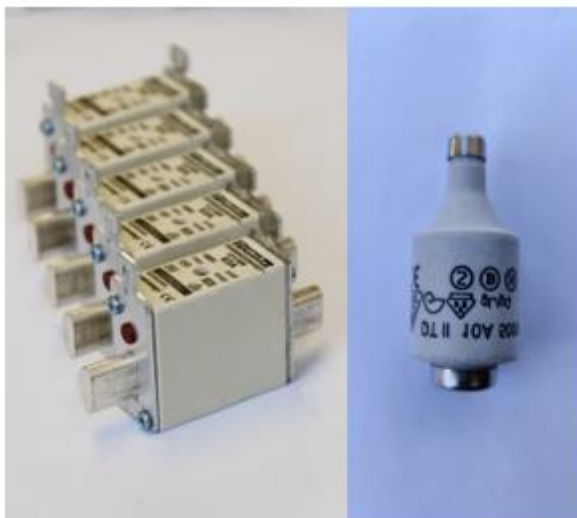
Kuva 14. Johdonsuojakatkaisija (Schneider Electric Acti 9 iC60 2025)

5.3 Sulakkeet

Sulake (kuva 15) on keskeinen sähköverkon suojauslaite, jonka tehtävänä on katkaista virta luotettavasti ylivirta- tai oikosulkutilanteessa. Se estää johtojen ja laitteiden ylikuormittumisen ja voi siten ehkäistä myös sähkölaitteista aiheutuvia tulipaloja. Sulakkeen toimintaperiaate perustuu lämpövaikutukseen. Sulakkeen sisällä oleva metallilanka tai -liuska kuumenee ja palaa poikki, kun sulakkeen nimellisvirtaraja ylitetään, jolloin sulakkeen sisällä oleva hiekka täyttää palaneen aukon ja estää valokaaren syntymisen (Timlin 2020, 21.)

Pienjänniteasennuksissa käytetään yleisesti kahta eri sulaketyyppiä, joita ovat tulppa- ja kahvasulake. Tulppasulakkeet eli D-typin sulakkeet ovat yleisiä asuinrakennuksissa ja kevyessä teollisuudessa. Kyseisiltä sulakkeilta vaaditaan vähintään 50 kA:n katkaisukykyä, mikä tarkoittaa suurinta oikosulkuvirran tehollisarvoa, jonka sulake pystyy turvallisesti katkaisemaan (Timlin 2020, 21.)

Raskaammissa käyttökohteissa, kuten teollisuudessa ja suuremmissa sähköasennuksissa käytetään yleensä NH-typin kahvasulakkeita. Niiden katkaisukyky I_{cu} vaihtelee 50–150 kA:n välillä ja niillä on myös hyvä virranrajoituskyky, mikä vähentää oikosulkuvirran vaikutuksia muun sähköverkon osiin (Timlin 2020, 21.) Tämän ominaisuuden ansiosta kahvasulakkeet soveltuvat erinomaisesti tilanteisiin, joissa järjestelmän suojaustasoa halutaan parantaa. Esimerkkikohteina moottorilähdöt.



Kuva 15. Kahva- ja tulppasulake

Sulakkeiden etuja ovat yksinkertainen rakenne, kustannustehokkuus sekä vähäinen huoltotarve. Niiden vaihtaminen on helppoa, mutta on kuitenkin huomioitava, että sulake täytyy aina korvata uudella samanarvoisella yksiköllä ylivirtatilanteen jälkeen.

5.4 Katkaisijat

Katkaisijat ovat sähkölaitteita, joita käytetään virtapiirien ohjaukseen ja suojaamiseen. Ne pystyvät myös reagoimaan verkossa tapahtuviin oikosulkutilanteisiin, minkä ansiosta niitä voidaan hyödyntää sekä oikosulku- että ylikuormitussuojana. Katkaisijat muodostuvat koskettimista, joita voidaan ohjata joko mekaanisesti tai sähköisesti. Katkaisijoiden kyky rajoittaa vikavirtoja perustuu niiden toimintanopeuteen, koskettimien avautumismatkaan sekä tehokkaaseen valokaaren sammuttamiseen.

Katkaisijoita käytetään esimerkiksi sähkökeskusten pääkytkiminä, kaapelien ja kiskostojen suojalaitteina sekä moottoripiirien suojauksessa.

Kompaktikatkaisijat ovat rakenteeltaan suljettuja ja valmistettu valetusta kotelosta sekä eristysmateriaalista. Kompaktikatkaisijan koskettimia ohjataan yleensä vivun tai keskuksen kannen läpi tulevalla vääntimellä. Kompaktikatkaisijoita käytetään pääsääntöisesti keskusten pääkytkiminä, kaapeleiden, kiskostojen, moottorien ja muuntajien suojaukseen. Tyypillisesti kompaktikatkaisijat soveltuvat käytettäväksi, kun virrat ovat enintään 630 A (ST 53.45, 2015, 4; Ranta 2022, 17.)

Suuremmissa kohteissa, kuten liikekiinteistöjen pääkeskuksissa ja alakeskuksissa, joissa käyttökerroja on harvoin, käytetään usein 800–1600 A:n kompaktikatkaisijoita (ST 53.45, 2015, 6; Ranta 2022, 17.)

Kompaktikatkaisijoilla (kuva 16) on erinomainen virranrajoituskyky oikosulkutilanteessa, koska ne pystyvät katkaisemaan virtapiirin todella nopeasti, eikä näin ollen oikosulkuvirta ehdi saavuttamaan huippuarvoansa. Tämän ominaisuuden ansiosta kompaktikatkaisijat kykenevät suojaamaan myös sellaisia komponentteja ja keskuksia, joiden oikosulkukestoisuus on pienempi kuin verkon rajoittamaton oikosulkuvirta. Näissä tapauksissa sähkökeskuksessa tulee olla selkeästi merkitty ehdollinen

oikosulkuvirta, joka kertoo suojalaitteen tarjoaman suojaustason. Kompaktikatkaisijan oikosulkuvirran rajoituskyky I_{cu} on tyypillisesti 50–150 kA (ST 53.45, 2015, 12; Ranta 2022, 18.)



Kuva 16. Kompaktikatkaisija (Schneider Electric ComPacT NSX 2025)

Ilmakatkaisijoissa (kuva 17) pääkoskettimet sijaitsevat avoimessa tilassa normaalipaineisessa ilmassa. Niiden runko on yleensä valmistettu metallista, ja koskettimien käyttö tapahtuu jousimekanismin avulla. Jouset voidaan virittää joko käsin tai sähköisesti moottorilla. Katkaisijoita ohjataan painikkeilla etulevyistä tai etäyhteydellä käyttäen työvirta- ja alijännittekamelamekanismeja (ST 53.45, 2015, 5; Ranta 2022, 16.)

Ilmakatkaisijoita käytetään esimerkiksi keskusten ja kiskostojen pääkytkiminä sekä moottorilähdöissä. Ilmakatkaisijoita on saatavilla yleensä 630–6300 A:n nimellisvirralla. Ne soveltuvat erityisesti kohteisiin, joissa kytkentätoimintoja on paljon tai joissa hyödynnetään kauko-ohjausta. Ilmakatkaisijat ovat mekaanisesti kestävämpiä kuin kompaktikatkaisijat ja sietävät paremmin mahdollisia laukaisujen viiveitä (ST 53.45, 2015, 6; Ranta 2022, 16.)

Suurin osa ilmakatkaisijoista ei kuitenkaan kykene tehokkaaseen virranrajoitukseen oikosulun aikana. Markkinoilta löytyy myös virtaa rajoittavia ilmakatkaisijamalleja, mutta niiden suorituskyky on kuitenkin heikompi kuin kompaktikatkaisijoilla, sillä ilmakatkaisijoiden suuri koko aiheuttaa mekaanista hidastusta ja näin ollen hidastaa näiden toimintaa. Tyypillisesti ilmakatkaisijoiden oikosulkuvirran katkaisukyky I_{cu} on välillä 42–150 kA (ST 53.45, 2015, 12; Ranta 2022, 17.)



Kuva 17. Ilmakatkaisija (Schneider Electric MasterPact MTZ 2025)

5.5 Back up -suojaus

Back up- eli varasuojausta käytetään sähkökeskuksissa, kun käyttöpaikan oikosulkuvirta ylittää käytettävän suojalaitteen katkaisukyvyyn. Tällöin syötönpuolelle täytyy asentaa virtaa rajoittava katkaisija, jolla varmistetaan täysi suojaus lähdonpuoleisille laitteille (Eaton 2022, 25.) Tällä tavoin saadaan varmistettua, että syötönpuoleinen suojalaite pystyy rajoittamaan mahdollisen oikosulkuvirran niin pieneksi, että lähdonpuoleiset suojalaitteet kestävät tämän vahingoittumatta (kuva 18).



Kuva 18. Back up -suojaus (Eaton 2022, 25)

Vaikka varasuojauus parantaa kokonaisu-järjestelmän turvallisuutta ja pienentää lähdonpuoleisten katkaisijoiden kuormitusta oikosulun aikana, voi se samalla heikentää järjestelmän selektiivisyyttä. Tämä johtuu siitä, että syötönpuoleinen katkaisija voi laueta ja katkaista sähkönsyötön koko lähdonpuoliseen asennukseen (Eaton 2022, 25.)

Käytännössä back up -suojaus on varsin yleinen ja kustannustehokas ratkaisu yhdistää johdonsuojakatkaisijat lähdönpuolelle ja oikosulkuvirtaa rajoittava kompaktikatkaisija tai kytkinvaroke syötönpuolelle rajoittamaan oikosulkuvirtaa.

6 TYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET

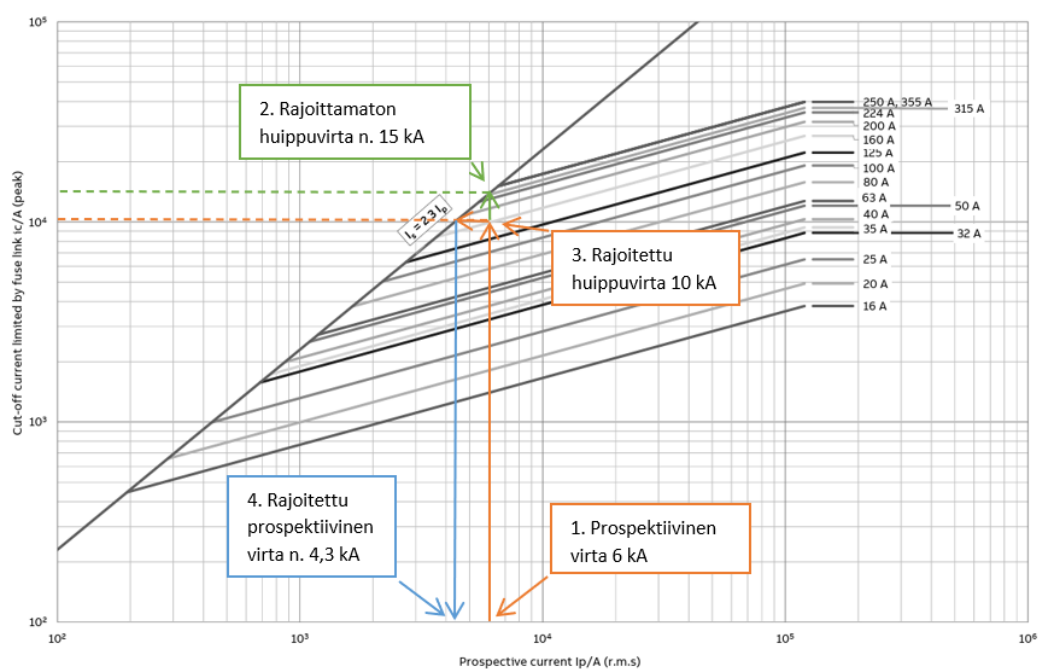
Työn tarkoituksena oli luoda tilaajalle yksinkertainen taulukko, josta nähtäisiin sulakkeisiin kohdistuva verkon suurin mahdollinen prospektiivinen oikosulkuvirta, joka estäisi sähkökeskusta tai sen komponentteja vioittumasta. Aikaisemmin sulakkeiden rajoittamat oikosulkuvirrat tarkistettiin sulakevalmistajien nettisivuilta löytyvistä käyrästä, johon haluttiin saada muutos. Tähän ratkaisuna asiaa lähdettiin tutkimaan ABB Curves- ohjelman avulla. Työn taustalla on halu tehostaa työskentelyä ja pyrkiä kustannustehokkaampaan suunnitteluun ja toteutukseen valitsemalla komponentit ja kesusrakenteet sulakkeen rajoittaman oikosulkuvirran mukaan, jotta välttyttäisiin turhan suurilta mitoituksilta.

6.1 Sulakkeiden virranrajoituskäyrästä

Sulake- ja katkaisijavalmistajien nettisivustoilta löytyy yleensä kuvan 19 kaltainen käyrästä, jossa on esitettyä sulakkeiden tai katkaisijoiden oikosulkuvirran rajoitus prospektiivisen- ja huippuvirran funktiona. Käyrästä tulokset ovat laitevalmistajien tai laitevalmistajasta poikkeavan tahon kirjaamia, jotka perustuvat testattuihin arvoihin. Sulakkeiden valmistukseen ja testaukseen sovelletaan kansainvälistä IEC 60269 -standardia, joka määrittää vähimmäisvaatimukset sulakkeiden virranrajoituskäyryille.

Käyrästä tulkitseminen alkaa määrittämällä verkon prospektiivinen virta eli oikosulkuvirran tehollisarvo, joka kuvan 19 esimerkkitapauksessa on 6 kA. Vaaka-akselia noustessa kohtisuoraan ylöspäin leikataan käyrästä rajoittamattoman virran poikkiakseli, joka kertoo mikä olisi verkossa esiintyvä huippuvirta, jos ei käytettäisi virtaa rajoittavaa sulaketta. Tällöin huippuvirta olisi n. 15 kA. Käyrästä oikealla puolella nähdään sulakkeiden nimelliset kesto- ja huippuvirrat, joista rajoittavaksi sulakkeeksi valitaan 160 A gG sulake. Käyrästä on nähtävissä, että kyseinen sulake rajoittaa verkon huippuvirran 10 kA:iin ja prospektiivisen virran n. 4,3 kA:iin.

gG 500V, 1



Kuva 19. Sulakkeiden virranrajoituskäyrästä tulkitseminen (muokattu lähteestä ABB 2019, 30)

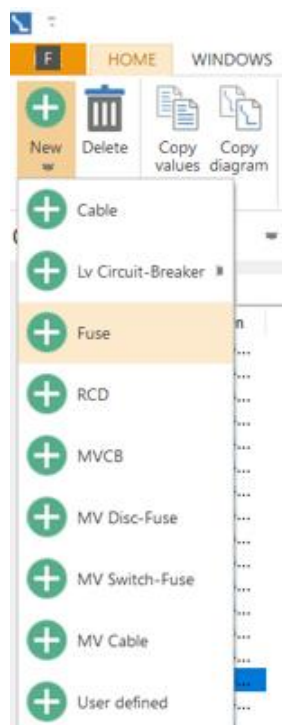
6.2 ABB Curves -ohjelma

ABB Curves on ABB:n kehittämä ohjelmisto, joka kuuluu E-Desing-ohjelmistokokonaisuuteen. E-Desing-sarja sisältää mm. DOC-verkkolaskentaohjelman, joka muistuttaa toiminnallisuudeltaan CAT-ohjelmaa, jolla voidaan hallinnoida komponenttien tilauslistoja. ABB Curves on ohjelma, jolla voidaan tarkastella mm. ABB:n sulakkeiden, katkaisijoiden ja johdonsuojakatkaisijoiden toiminta-aikaa, I^2t -energia- ja virranrajoituskäyriä. Ohjelman virranrajoituskäyrästä tulokset perustuvat mittauhin tuloksiin, kuten myös aiemmin mainitut laitevalmistajien nettisivuilta löytyvät käyrät.

Ohjelmassa on mahdollista lisätä useita eri laitteita ja vertailla esimerkiksi niiden keskinäistä selektiivisyyttä. Ohjelma tarjoaa tarkempaa tietoa kuin perinteiset paperimuotoiset taulukot, mikä helpottaa suojausten ja valintojen optimointia suunnittelutyössä (Timlin 2020, 42.)

6.2.1 Laitteiden lisäys

Ohjelman käyttö aloitettiin lisäämällä halutut sulakkeet ohjelman vasemmasta laidasta löytyvän New-alasvetovalikon alta (kuva 20).



Kuva 20. Sulakkeiden lisäys Curves-ohjelmaan

Sulakkeiden lisäyksen jälkeen pystyttiin muokkaamaan sulakkeen tietoja, josta mm. vaihdettiin verkon nimellinen käyttöjännite ja jakelujärjestelmä sekä sulakkeen käyttökohde, koko ja kestovirta (kuva 21).

Fuse

Fuse, OFAF000H2

400 V LLLN TN-S

Fuse

Icu 120 [kA]

Fuse-link gG

Size 000

In 2 [A]

IB 10 [A]

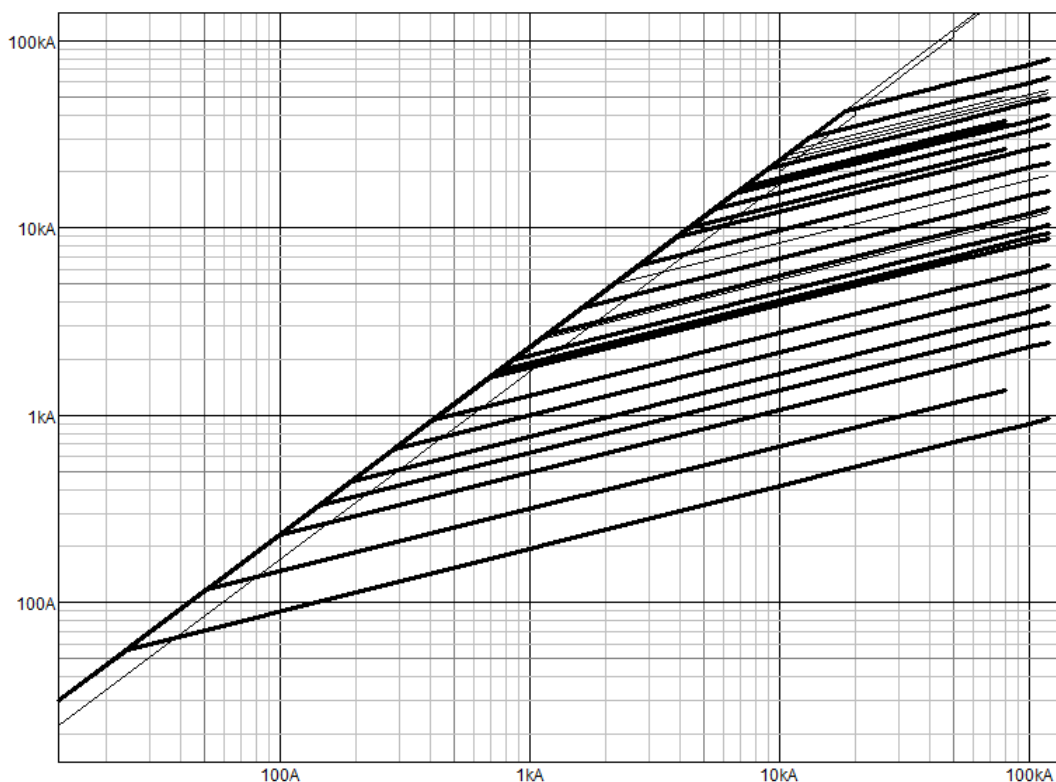
Max Up 50 [V]

Ra 5 [Ω]

t max 0.4 [s]

Kuva 21. Sulakkeen asetukset

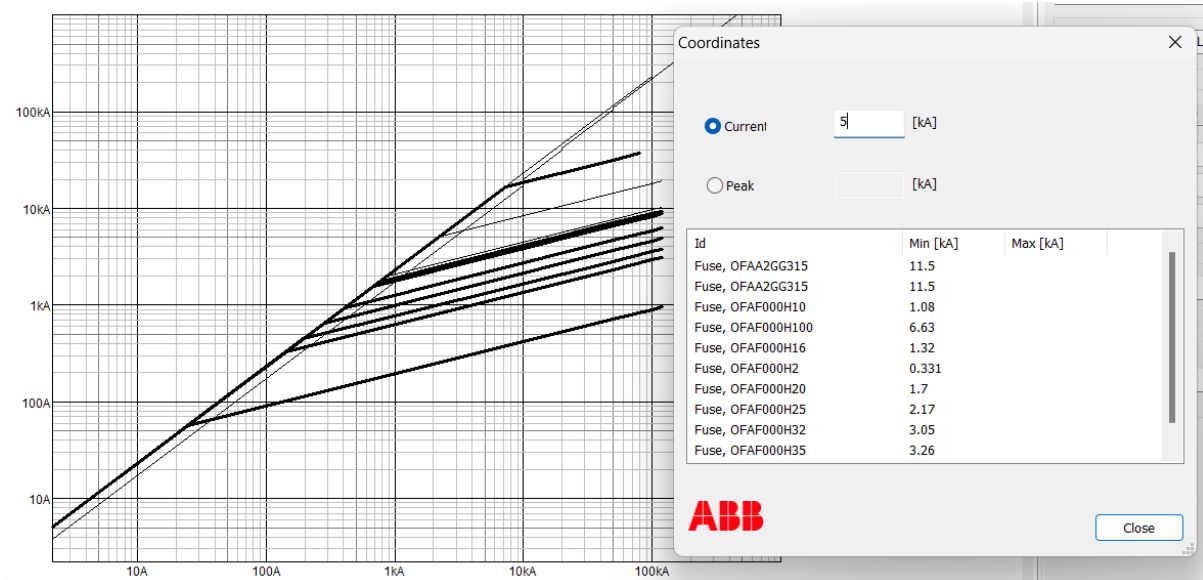
Edellä mainitut toiminnot tehtiin jokaiselle sulakekoolle 2–800 A:n välillä, kunnes saatiin käyrästä, joka vastaa tilaajalla ennen ollutta sulakevalmistajan käyrästä (kuva 22).



Kuva 22. Oikosulkuvirta käyrästä Curves-ohjelmalla

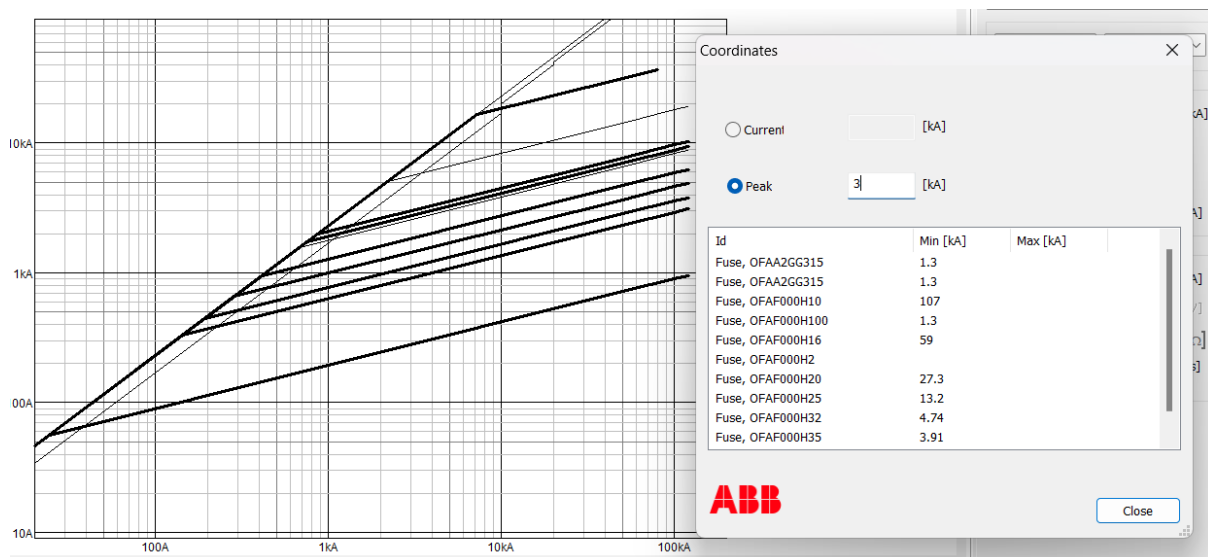
6.2.2 Työkalujen hyödyntäminen

Ohjelmasta löytyy käyrästöjen tarkastelua nopeuttava coordinates -työkalu, joka laskee sulakkeen rajoittamat minimi oikosulkuvirrat. Kuvassa 23 on syötettynä prospektiivinen oikosulkuvirta 5 kA kohtaan current, joka laskee jokaisen sulakkeen rajoittaman huippuvirran. Esimerkiksi ohjelma laskee 35A gG -sulakkeen rajoittamaksi huippuvirraksi 3,26 kA.



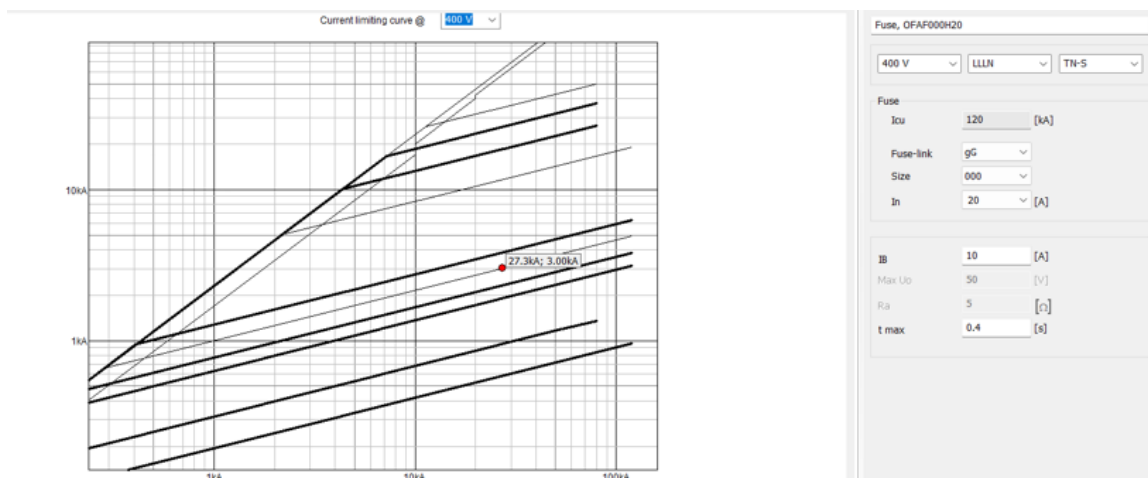
Kuva 23. Huippuvirran määrittäminen prospektiivisellä virralla

Vastaavasti syöttämällä haluttu maksimi huippuoikosulkuvirta kohtaan peak laskee ohjelma sulakkeisiin kohdistuvan prospektiivisen virran arvon, jolla sulake pystyy rajoittamaan huippuvirran haluttuun arvoon. Esimerkiksi kuvassa 24 ohjelma laskee 20A gG -sulakkeelle prospektiiviseksi oikosulkuvirraksi 27,3 kA. Tällä prospektiivisellä oikosulkuvirralla kyseinen sulake pystyy rajoittamaan huippuoikosulkuvirran 3 kA.



Kuva 24. Prospektiivisen virran määrittäminen huippuvirralla

Kuvassa 25 kursori aseteltuna coordinates -työkalun laskemaan prospektiivisen virran kohtaan.



Kuva 25. Sulakkeen rajoittama huippuvirta tietyllä prospektiivisen virran arvolla

6.3 Sulakkeiden rajoittamat oikosulkuvirrat -taulukko

Lopputuloksena saatiin yksinkertainen oikosulkuvirta taulukko, josta saadaan helposti selville käytettävän verkon maksimiprospektiivinen oikosulkuvirta, jonka sulake pystyy rajoittamaan niin, ettei huippuoikosulkuvirta ylitä keskusvalmistajan keskuksille määrittämää kestoisuutta. Valmiista taulukosta käy ilmi keskusrakenteiden kestävät nimellisvirrat, käytetty sulake ja maksimiprospektiiviset oikosulkuvirrat, joilla sulake pystyy rajoittamaan huippuoikosulkuvirran halutulle tasolle.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihe syntyi tarpeesta kehittää tarjouslaskennan ja suunnittelun tehokkuutta sekä taloudellista puolta. Ongelmaa lähdettiin tutkimaan oikosulkukestoisuuksien tiimoilta, joka voi isoissa keskuksissa nostattaa hintaa merkittävästi, jos keskuksat ja komponentit täytyy mitoittaa raskaammin. Katkaisijoiden ja sulakkeiden käyttö kuitenkin mahdollistaa keskusten ja komponenttien alhaisemman mitoituksen, mutta ongelmaksi muodostuu laitevalmistajien hankalasti tulkittavat käyrästöt, joista varsinkin suurien oikosulkuvirtojen tarkasteleminen on vaikeaa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda tilaajalle oikosulkuvirta taulukko, jota pystyisi hyödyntämään tarjouslaskennassa ja suunnittelussa. Taulukosta oli käytävä ilmi sulakkeen läpi kulkeva maksimi prospektiivinen virta, jonka sulake pystyy katkaisemaan tarpeeksi nopeasti, jottei huippuoikosulkuvirta ylitä keskusrakenteille määritettyjä kestoisuuksia.

Työn aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen monella tapaa. Aihe auttoi ymmärtämään syvällisemmin, mitkä asiat vaikuttavat oikosulkuvirtojen suuruuteen ja kuinka oikosulkuvirtoja pystytään pienentämään katkaisijoita ja sulakkeita käyttämällä, ja mitkä komponentit taas eivät sovellu suurien oikosulkuvirtojen rajoittamiseen. Aihe on tärkeä, koska sähkösuunnittelijat eivät usein ota huomioon sulakkeiden ja katkaisijoiden virranrajoitusta määrittäessä oikosulkukestoisuuksia, joka johtaa helposti ylimitoitukseen sekä keskusten hintoihin.

Haasteita aihe tuotti alkuun mm. tiedon tulkitsemisessä ja laitevalmistajien kuvaajien ja käyrästöjen hahmottaminen. Myös aiheen laajuus tuotti ongelmia, koska aihealueet täytyi pystyä rajaamaan opinnäytetyössä käsiteltäviin otsikoihin, jotka ovat oleellisia työn kannalta, jotta opinnäytetyö ei venyisi turhan pitkäksi.

Opinnäytetyön tavoite saavutettiin luomalla tilaajalle taulukko, joka vastaa toivottua lopputulosta. Taulukkoa on tarkoitus testata suunnittelun ja tarjouslaskennan apuna lähitulevaisuudessa. Taulukkoa on tarkoitus pystyä muokkaamaan jälkikäteen, jos se ei saavuta toivottua hyötyä käytännössä.

LÄHTEET

- ABB 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10. painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy.
- ABB 2019. Protection and connection. Datalehti. https://library.e.abb.com/public/f5b11030645a47049f82447a40dd8fc8/OF1GB_19-01_1SCC317001C0201.pdf. Viitattu 19.4.2025.
- Eaton 2022. Coordination guide. Datalehti. <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/company/partnering-with-eaton/channel-panel-builder-programme/documents/eaton-selectivity-filiation-catalogue-ps015002en-en-us.pdf>. Viitattu 23.4.2025.
- Eronen, P. 2014. Tehtaan keskijännitejakelun selektiivisyystarkastelu. Diplomityö. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201405281243>. Viitattu 15.3.2025.
- Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmateriaali. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- Lahti, M. 2025. Sähkökeskusten standardit, vaatimukset ja komponenttien valinta. Tutkielma. Sähkö- ja energiatekniikan kandidaatti. Vaasan Yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:fe2025022013125>. Viitattu 19.4.2025.
- Liimatainen, N. 2018. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n sähköverkon suojauksen nykytilanteen tarkastelu. Diplomityö. Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201802201281>. Viitattu 27.3.2025.
- Norelco Oy 2024. Norelco Oy yrityksenä. Verkkójulkaisu. <https://www.norelco.fi/fi/norelco-yrityksena>. Viitattu 6.4.2025
- Norelco Oy 2024. <https://www.norelco.fi/fi/tuotteet/pienjannitekeskukset>. Viitattu 19.4.2025.
- Ranta, T. 2022. iControl-sähkökeskuksen oikosulkukestoisuuden määrittäminen. Opinnäytetyö. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022061518024>. Viitattu 12.4.2025.
- SFS-EN 61439-1. 2022. Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-käsikirja 640. 2016. Sähkökeskukset. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- ST 53.45 Sulakkeeton suojaus. 2015. Espoo: Sähkötieto ry.
- Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadasko-koelma/2016/1135#OT0>. Viitattu 12.4.2025.

Schneider Electric Acti 9 iC60 2025. <https://www.se.com/fi/fi/product-range/7556-acti-9-ic60-johdonsuojakatkaisija/?parent-subcategory-id=1605#products>. Viitattu 23.4.2025.

Schneider Electric ComPacT NSX 2025. <https://www.se.com/fi/fi/product-range/39910531-compact-nsx-uusi-sukupolvi/?parent-subcategory-id=4230#products>. Viitattu 23.4.2025.

Schneider Electric MasterPact MTZ 2025. <https://www.se.com/fi/fi/product-range/63545-masterpact-mtz/?parent-subcategory-id=4220#products>. Viitattu 23.4.2025.

Takalo, T. 2021. Moottorinohjauskeskuksen suunnittelu. Kuva. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe202101111416>. Viitattu 17.3.2025.

Timlin, L. 2020. Sähkökeskuksen oikosulkukestoisuus. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Oulun ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202004286285>. Viitattu 15.4.2025.

Tiilikainen, S. n.d. Oikosulkusuojaus. Opetusmateriaali. Savonia-ammattikorkeakoulu.