

## Katkaisijasimulaattorin toteutus

Eero Kukkaniemi

Opinnäytetyö

Joulukuu 2018

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Sähkötekniikka

Tekijä(t) Kukkaniemi, Eero	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 06.12.2018
	Sivumäärä 58	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Katkaisijasimulaattorin toteutus</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Pasi Puttonen, Sirpa Hukari		
Toimeksiantaja(t) Fingrid Oyj		
Tiivistelmä <p>Relesuojauksessa käytettyjen digitaalisten releiden ansiosta voimansiirtoverkkojen suojaustoimintoja on saatu monipuolisemmaksi ja tarkemmaksi. Tämän vuoksi käytettäviä laitteita täytyy myös konfiguroida ja testata laajemmin.</p> <p>Työn toimeksiantaja Fingrid Oyj on suomalainen kantaverkkoyhtiö, joka tarvitsi relesuojauksen testilaitteisiinsa katkaisijasimulaattoria. Toteutettavan laitteen vaatimuksena oli säädeltävät toiminta-ajat, helppokäyttöisyys ja kaksoiskatkaisijajärjestelmän simulointi.</p> <p>Työn tavoitteena oli tutkia ja rakentaa, voidaanko toimeksiantajalla olevilla digitaalisilla suojarileillä toteuttaa halutun kaltainen simulaattorilaitte. Työssä selvitettiin simulaattorilta vaadittuja ominaisuuksia, minkä jälkeen suunniteltiin ja rakennettiin laite. Työn aikana laitteeseen myös ohjelmoitiin toimintoja, joiden tarvetta kartoitettiin haastatteluiden avulla. Laitteen toimivuutta testattiin lopputesteissä, jossa kävi ilmi laitteen käyttötarkoitus vaihtoehdot, ominaisuudet ja toiminta-aikojen tarkkuus.</p> <p>Lopputesteistä saatiin selville, että toteutettua laitetta voidaan käyttää relesuojauksen apuna simuloinnissa ja että laite on käyttötarkoitukseensa sopiva. Testeistä selvisi myös, että simulaattorina käytetyn digitaalisen releen toiminta-ajat eivät olleet kovin tarkat. Laitteen helppokäyttöisyyttä saatiin lisättyä selkeillä kytkentäkuvilla ja käyttöohjeella.</p> <p>Johtopäätöksenä toteutetusta työstä saatiin, että simulaattorin toteutus toimeksiantajan tarjoamilla digitaalisilla suojarileillä on mahdollista. Simulaattorin toimintoja kuitenkin rajoittaa releen ominaisuudet, minkä vuoksi jatkossa simulaattorin valinnassa on syytä kiinnittää huomiota toteuttamiseen tarvittuihin ominaisuuksiin.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Simulaattori, kytkinlaitteet, suojaustekniset laitteet, voimansiirtoverkot		
Muut tiedot		

Author(s) Kukkanieniemi Eero	Type of publication Bachelor's thesis	Date 06.12.2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 58	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Implementation of circuit breaker simulator</b>		
Degree programme Electrical and Automation Engineering		
Supervisor(s) Puttonen Pasi, Hukari Sirpa		
Assigned by Fingrid Oyj		
Abstract  <p>Due to the digital relays used in the relay protection, the functions of power transmission networks have become more comprehensive and more accurate. Therefore, the equipment used must also be configured and tested more widely.</p> <p>Fingrid is a Finnish transmission system operator who needed a circuit breaker simulator to support its protection relay testing equipment. The requirements for the device to be built were: to have controlled operating times, be easy to use and contain simulation of the double circuit breaker system.</p> <p>The aim of the thesis was to investigate, whether the desired digital simulators could be implemented with the assignor's digital protection relays. After that, the device was designed and constructed. The required device was built during the thesis project, and the other functionalities of the device were obtained through interviews. The functionality of the device was tested in the final test on its the intended use, features and accuracy of the operating times.</p> <p>The end tests verified that the implemented device can be used as circuit breaker simulator to help with configuring relay protection, and the device is suitable for its intended use. It was also cleared that the operating time of the digital relay used as a simulator was not too accurate. The easy use of the device was enhanced with clear connection diagrams and manuals.</p> <p>As result of the thesis, it was possible to implement the circuit breaker simulator with the digital protection relays provided by the assignor. However, the features of the relay being used limits the features of the simulator, which is why it is important to pay attention to the features needed to implement the simulator.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) simulator, transmission network, switching devices, technical protective devices		
Miscellaneous		

## Sisältö

1	Johdanto.....	4
1.1	Opinnäytetyön taustat ja tavoite .....	4
1.2	Työn rajaus .....	6
1.3	Työn toimeksiantaja .....	7
1.4	Tutkimusasetelma ja käytetyt tutkimusmenetelmät.....	7
2	Tiedonkeruumenetelmät .....	8
2.1	Kehittämistutkimus .....	8
2.2	Analysointimenetelmät .....	9
2.3	Haastatteluiden luotettavuus.....	10
2.4	Laatuajattelu.....	10
3	Kantaverkon ohjaus.....	10
3.1	Kantaverkko.....	10
3.2	Sähköasema.....	12
3.3	Kokoojakiskojärjestelmä.....	13
3.4	Sähköaseman laitteet .....	15
3.5	Katkaisija.....	16
3.6	Uudemmat katkaisijatyyppit .....	17
3.7	Erottavat katkaisijat.....	18
3.8	Katkaisijan ohjain.....	19
3.9	Mittamuuntajat .....	20
3.10	Relesuojaus.....	20
3.11	Digitaalinen suojarahle.....	23
3.12	Distanssirele .....	24
4	Katkaisijasimulaattorin toteutus .....	24
4.1	Benchmarking.....	25
4.2	Vamp 259 Feeder Manager .....	25

	2
4.3 Siemens 7SJ6355 .....	26
4.4 Programma Sverker 750.....	27
4.5 Omicron cmc 156 .....	28
4.6 Omicron Test Universe.....	28
4.7 Vampset.....	28
5 Katkaisijasimulaattorin toteutusvaiheet.....	29
5.1 Suunnitteluvaihe .....	29
5.2 Suojareleen valinta.....	31
5.3 KytKentä ja ohjelmoitava logiikka .....	33
5.4 Käyttöohje .....	37
5.5 Testausvaihe.....	37
5.6 Katkaisijan ohjaus.....	42
5.7 Pumppauksen esto.....	42
5.8 Vikaa vasten kytKentä .....	43
5.9 Toiminta-ajat .....	44
6 Tulokset.....	45
6.1 Suojareleen valinta.....	45
6.2 Simulaattorin lopputestaus.....	46
6.3 Haastattelujen tulokset.....	47
7 Johtopäätökset ja pohdinta .....	49
Lähteet.....	52
Liitteet .....	56

## Kuviot

Kuvio 1 Muuntoasema koostuu vähintään yhdestä kytkinkentästä, asemarakennuksesta ja tehomuuntajasta. ....	13
Kuvio 2 Kaksoiskatkaisijakentässä kiskoihin liitytään kahdella katkaisijalla. ....	14
Kuvio 3 GIS-laitoksella oleva laitteisto on koteloitu tiiviisti. ....	18
Kuvio 4 Erottavat katkaisijat ovat yleinen näky kantaverkon sähköasemilla. ....	19
Kuvio 5 Katkaisijan ohjaukseen tarvittava energia varastoidaan usein jouseen sähkömoottorin avulla. ....	20
Kuvio 6 Siprotec 7SJ63. Digitaalisissa releissä on paikallinen HMI. ....	24
Kuvio 7 Vamp 259 on digitaalinen suojarile. ....	26
Kuvio 8 Sverker 750 reletesteriin liitytään turvalliittimillä. ....	27
Kuvio 9 Vampset-ohjelmistossa ulostulojen seurantaan voidaan käyttää ulostulomatriisia. ....	29
Kuvio 10 Liityntärajapinnan ja suojarileen väliset kytkennät varmistettiin mittaamalla. ....	34
Kuvio 11 Katkaisijasimulaattorin ohjeeseen tehtiin ohjausmatriisi. ....	35
Kuvio 12 Virtuaalisia ulostuloja käytettiin tiedonsiirtämiseen. ....	36
Kuvio 13 Mimiikalla voidaan osoittaa laitteen tilatietoja visuaalisesti. ....	36
Kuvio 14 Ohjattavat objektit asetellaan Vampsetissa objektien hallinnassa. ....	38
Kuvio 15 Sverker 750 laitetta käytettiin suojarileen toiminta-aikojen mittaamiseen. ....	40
Kuvio 16 Simulaattorin testit tehtiin katkaisijan molemmille laukaisu-piireille. ....	42
Kuvio 17 Pumppauksen esto testattiin lopputesteissä. ....	43
Kuvio 18 Vikaa vasten kytkennässä katkaisija yritetään sulkea vikatilanteessa. ....	44
Kuvio 19 Benchmarkingissa vertailtiin suojarileiden ominaisuuksia. ....	46

# 1 Johdanto

Voimansiirtoverkko on yksi Suomen tärkeimmistä infrastruktuureista. Voimansiirtoverkon avulla sähkö saadaan siirrettyä kaikkialle Suomeen. Koko Suomen kattava 14 400 kilometriä pitkä kantaverkko siirtääkin valtaosan, 77 %, Suomen sähköstä. (Fingridin sähkönsiirtoverkko, n.d)

Sähkönsiirrossa ilmenneet käyttöhäiriöt ovat epätoivottuja, koska niistä aiheutuu sähkökatkoksia verkon käyttäjille. (Yleistietoa häiriöistä n.d; Käyttöhäiriöt n.d)

Kantaverkossa tapahtuvassa vikatilanteessa sähköasemalla sijaitseva suojausjärjestelmä huomaa vian ja vikaantunut laite tai verkon osa kytketään irti verkosta sähköaseman kytkinkentässä sijaitsevalla katkaisijalla. Irtikytkentäkäskyn katkaisijalle antaa suojausjärjestelmässä oleva suojarole. (Elovaara & Haarla 2011b, 336; Suomen sähköjärjestelmä n.d)

## 1.1 Opinnäytetyön taustat ja tavoite

Relesuojauksessa tapahtui suuri muutos 1980-luvun lopulla, kun digitaaliset suojaroleet tulivat käyttöön. Digitaaliset suojaroleet monipuolistivat suojaroleen toimintoja ja mahdollistivat useita asetteluja. Samalla suojaroleista tuli ohjelmoitavia sekä monimutkaisempia. (Elovaara & Haarla 2011b, 345; Möksy 1993, 29)

Ohjelmoitavat digitaaliset suojaroleet tuovat suojaroleisiin lisää suojaustoimintoja, jonka vuoksi suojaroleita tarvitsee myös testata laajemmin. Kantaverkossa jo olemassa olevien sähköasemien suojauksen jatkuvasta kehittämisestä sekä uusien asemien rakentamisesta on toimeksiantajalle muodostunut tarve saada toiminnallisuuksiltaan oikeaa katkaisijaa vastaava katkaisijasimulaattori.

Katkaisijasimulaattorin suurin käyttötarve on ilmennyt mallikonfiguraatioiden toiminnan testaamisessa ja suojaroleiden toimintojen tutkimisessa laboratorio-olosuhteissa sekä ylipäättään silloin, kun käyttöönottovaiheessa oikeaa katkaisijaa ei ole vielä käytettävissä. Laitteelle tarvetta on myös katkaisijan ollessa käytettävissä, koska katkaisi-

jaa tarvitaan verkon hallintaan ja sitä ei voida verkon jokaisessa tilanteessa keskeyttää testaamiselle. Tämän lisäksi suojaustoimintojen toiminnallisuutta testattaessa katkaisijaa joudutaan ohjaamaan lukuisia kertoja, mikä aiheuttaa kytkinlaitteelle turhaa kulumista. Testatessa jälleenkytkentöjen toimintaa katkaisijalle syntyy suuri määrä ohjauksia.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on toteuttaa katkaisijasimulaattori eli laite, jolla pystytään mallintamaan oikeaa katkaisijaa relesuojauksen näkökulmasta. Mallinnuksessa pyritään saavuttamaan laitteelta sellainen lopputulos, joka saataisiin oikealta katkaisijalta silloin, kun suojaohjaus ohjaa oikeaa katkaisijaa. Simulaattorilla on tarkoitus pystyä simuloimaan kaksoiskatkaisijajärjestelmää, jota pystytään auki-ohjaamaan yksivaiheisesti.

Aihe pohjautuu suojaohjauksien soveltuvuustestaukseen ja relesuojauksen kehittämiseen, minkä vuoksi rakennettavan simulaattorin toiminnallisuudet aiotaan toteuttaa relesuojauksen näkökulmalta laitteeksi, jolla on mahdollista tukea relesuojauksessa tehtäviä töitä.

Toimeksiantajan aiemmat katkaisijasimulaattorit ovat rakennettu esimerkiksi kippireleistä, joiden toiminta-aika on erittäin lyhyt eikä se ole säädeltävissä. Tämän vuoksi kippireleillä toteutettu simulaatio ei ole kovin realistinen, eivätkä sen ominaisuudet ole helposti muunneltavissa. Tämän lisäksi entuudestaan olemassa olevilla simulaattoreilla ei ole niiden yksinkertaisuutensa vuoksi pystynyt testaamaan kaikkia haluttuja toimintoja. Näiden seikkojen vuoksi toimeksiantaja on päättänyt, että toteutettava katkaisijasimulaattori pyritään rakentamaan digitaalisella suojaohjauksella. Digitaalista relettä käyttämällä simuloinnissa voidaan käyttää apuna ohjelmoitavaa logiikkaa, jolloin laitteesta voidaan saada monipuolisempi.

Työssä on tarkoitus tutkia, voidaanko toimeksiantajan tarjoamilla digitaalisilla suojaohjauksella laatia relesuojauksen tueksi katkaisijasimulaattori, josta on hyötyä toimeksiantajalle. Toimeksiantajalta työhön on tarjolla kaksi eri laitevalmistajan suojaohjauksella, josta työn aikana aiotaan valita toimeksiantajalle sopivampi vertailun



avulla. Tavoitteena on myös rakentaa toimiva laite. Rakentamiseen kuuluu laitteen suunnittelu, kytkentä, ohjelmointi ja dokumentit.

Aihetta on aiemmin tutkittu Tampereen teknilliseen yliopistoon tehdyssä melko samankaltaisessa diplomityössä, jossa digitaalisesta suojareleesta saatiin tehtyä kytkinlaitesimulaattori. Valitettavasti laitteen testaus jäi diplomityön mukaan kuitenkin vähäiseksi ja lisäksi vaativammat tilanteet jäivät kokonaan testaamatta. (Ojavalli 2011, 59-61)

Verrattuna aiemmin tehtyyn työhön tämä opinnäytetyö perustuu samankaltaiseen ajatukseen siitä, että toimeksiantajan käyttöön halutaan saada katkaisijasimulaattori, jonka avulla voidaan mallintaa kytkinlaitekenttää katkaisijoiden osalta. Aiemman työn perusteella simulaattorin rakentaminen oikeanlaisella suojareleellä on mahdollista.

Joitain poikkeuksia aiemmin tehtyyn työhön silti löytyy, koska toimeksiantajan tarjoamat relevaihtoehdot katkaisijasimulaattorille ovat eri laitevalmistajalta ja lisäksi simulaattorin tiedonsiirrossa ja ohjelmoinnissa on tarkoitus päätyä erilaiseen lopputulokseen. Simulaattorin ohjelmoinnilla on tarkoitus simuloida pelkästään kaksoiskatkaisijakenttää, jota soveltamalla voidaan kuitenkin tarvittaessa mallintaa myös muita kenttärakenteita. Katkaisijasimulaattorin laitteiden välinen kommunikointi on tavoitteena toteuttaa samalla tavalla kuin aiemmassa työssä siirtämällä laitteiden väliset binääriset tiedot perinteisesti johdottamalla. Simulaattorista ei haluttu tuoda ulos GOOSE-viestejä (Generic object oriented substation event), joten se ei testauskäytössä tule tarvitsemaan erillistä tiedonsiirtokaapelia reaaliaikaiseen pikaviestintään. (Ojavalli 2011, 7)

## 1.2 Työn rajaus

Toteutetulla katkaisijasimulaattorilla on tarkoitus pystyä mallintamaan kaksoiskatkaisijakenttää, jossa katkaisijan koskettimet ovat yksivaiheisesti auki-ohjattavissa ja katkaisijan kiinni-tilatiedot yksivaiheisesti luettavissa.

Laitteen tilatietoihin ja ohjaustietoihin aiotaan käyttää perinteistä johdotusta, koska silloin simulaatiosta saadaan realistisempi. Sähköasemalla olevan oikean katkaisijan ja suojaireiden välillä on perinteinen johdotus. Tämän lisäksi tällainen johdotusvaihtoehto mahdollistaa simulaattorin testaamisen kahdella koestettavalla laitteella yhtä aikaisesti. Todellisessa tilanteessa kaksi suojairetta liittyy katkaisijaan, kun järjestelmä on kahdennettu.

Laitteelle toteutettavat halutut lisäominaisuudet on tarkoitus kartoittaa työn aikana tehdyillä haastatteluilla. Kaksoiskatkaisijajärjestelmään päädyttiin siitä syystä, että toimeksiantaja käyttää pääsääntöisesti joko kaksoiskatkaisijajärjestelmää tai sitä kevyempiä kenttäjärjestelmiä. Tällaisella katkaisijajärjestelmällä pystytään soveltaen simuloimaan myös muita kevyempiä järjestelmiä. Kevyemmässä järjestelmässä tarvitaan vähemmän ohjattavia katkaisijoita, minkä vuoksi sen simuloimiseen tarvitaan vähemmän ominaisuuksia simulaattorilta.

Työssä päädyttiin keskittymään vain vaihtosähköverkon katkaisijoihin, koska sähkönsiirrossa toimeksiantaja käyttää pääsääntöisesti vaihtosähköä, mutta myös tasasähköllä toimivia siirtoyhteyksiä on. Tasasähköyhteyksiä voidaan ohjata DC-puolella esimerkiksi tehoelektroniikalla, mutta katkaisijat ovat vielä AC puolella, koska tarpeeksi suuritehoisia tasavirtakatkaisijoita ei ole tarjolla kantaverkon tasasähköyhteyksille. (Elovaara & Haarla 2011b, 299, 306, 307; High Voltage Direct Current Transmission n.d; Viinikainen 2018)

### 1.3 Työn toimeksiantaja

Työn toimeksiantajana toimii suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj (tekstissä toimeksiantaja), jolla oli vuonna 2018 omistuksessaan 116 sähköasemaa. Toimeksiantajalla on verkon hallintaan käytössään useita katkaisijoita ja noin 5000 suojairetta, joista 3680 on digitaalisia. (Suomen sähköjärjestelmä n.d; Vanninen 2018, 83)

### 1.4 Tutkimusasetelma ja käytetyt tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön tärkeimmät kysymykset eli tutkimuskysymykset olivat:

- Saako suoja-releestä rakennettua tarpeeseen sopivan ja helppokäyttöisen katkaisijasimulaattorin?
- Miten eri katkaisijajärjestelyiden mallinnus onnistuu simulaattorilta?

Tutkimuskysymyksiin aiotaan hakea ratkaisua tutkimuksen aikana rakennettavalla simulaattorilla ja sen loppupalautteeseen liittyvällä haastattelulla. Simulaattorin toteuttamiseen käytetään apuna haastatteluita sekä yleisesti aiheeseen ja suoja-releenä käytettyyn laiteeseen perehtymällä. Tutkintakysymyksiin vastataan tulokset-osiossa.

## 2 Tiedonkeruumenetelmät

### 2.1 Kehittämistutkimus

Tässä työssä käytettiin apuna kehittämistutkimusta. Tutkimusmenetelmänä kehittämistutkimus on usein monimenetelmällinen, eli siinä käytetään apuna sekä kvalitatiivista että kvantitatiivista tutkimusta. Kehittämistutkimuksessa ongelmaan voidaan myös hakea ratkaisua käyttämällä pelkästään kvalitatiivista tutkimusta. Kvalitatiivista eli laadullista tutkimusta käytetään, jos tavoitteena on saada aikaan muutos kehitettävässä kohteessa. Kehittämistutkimuksessa kehityskohde voi olla esimerkiksi tuote. Kehittämistutkimuksen tarkoituksena on aina saada aikaan parannusta nykytilanteesta. Tässä opinnäytetyössä saada aikaan katkaisijasimulaattori, jota ei entuudestaan vielä ole. Tässä opinnäytetyössä on päädytty käyttämään ainoastaan kvalitatiivista tutkimusmenetelmää, koska kvantitatiiviselle ei esiintynyt samankaltaista tarvetta ongelman ratkaisemiseen. (Kananen 2015, 76; Kananen 2012, 43; Monimenetelmällisyys 2015)

Laadullinen tutkimusmenetelmä pohjautuu ilmiön ymmärtämiseen. Tutkimusaineistoa käytetään ongelman ratkaisemiseksi käyttäen apuna haastatteluita, havainnointia ja dokumentteja. Tutkimusaineistoa kerätään, kunnes ongelma on ratkaistu. (Kananen 2015, 128) Tutkimusaineiston keräämisen jälkeen aineiston tulokset on tulkittava. Tulkinnalla pyritään ratkaista tutkimuskysymykset. Tulkintamenetelmät luokitellaan aineistolähtöiseen ja teorialähtöiseen. Tulkinnan avulla selvitetään, mikä tieto on tutkimusaiheessa ratkaisemisen kannalta oleellista. (Kananen 2015, 169-176)

Tutkimukseen liittyvissä haastatteluissa on tarkoituksena kerätä haastateltavan mielipiteitä, kokemuksia tai käsityksiä. Eri haastattelutyyppinä on esimerkiksi strukturoitu tai strukturoimaton haastattelu. Haastattelun muoto voi olla esimerkiksi teemahaastattelu, jossa haastattelun aiheena on jokin teema. (Haastattelut 2015; Haastattelu n.d) Haastateltavaksi valitaan ne henkilöt, jota asia koskee eniten. (Kananen 2015, 145)

Strukturoimaton eli avoin haastattelu on haastattelutilanne, jossa haastattelussa käytävä keskustelu ei ole ennalta rajattu tiettyihin kysymyksiin. Haastattelijalla voi kuitenkin itsellään olla kysymyksiä, joihin hän hakee vastausta ohjaamalla keskustelua oikeaan aihealueeseen. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006a; Haastattelu n.d)

Strukturoidussa haastattelussa haastattelun rakenne ja kysymykset on ennalta rajattu tiettyihin kysymyksiin. Haastattelun kysymykset käydään läpi kaikilta haastateltavilta samassa järjestyksessä. (Haastattelu n.d & Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006b)

## 2.2 Analysointimenetelmät

Tutkimuksessa pyritään aina luotettavuuteen. Tutkimuksessa esitetty tieto ei voi olla ihmisen luuloja, vaan käytetty tieto on oltava perusteltavissa. (Kananen 2015, 120; Kananen 2012, 163)

Luotettavuus varmistetaan tarkkailemalla tutkimuksen reliabiliteettia ja validiteettia. Luotettavuuden kannalta on tärkeää, että työhön kerätyn tiedon paikkansapitävyys pystytään varmentamaan. (Kananen 2012, 161-162)

Validiteetti on yksi tutkimuksen luotettavuuden mittareista. Validiteetilla mitataan, onko tutkimuksesta saadut tulokset ja tulkinnat oikeita. Samalla mitataan, onko tulokset saavutettu aiheen perusteellisella tutkinnalla. Validiteetti tarkastelee, onko tulokset saatu mittaamalla oikeita ominaisuuksia tai asioita. Menetelmän avulla saadaan mielipide siitä, ovatko tutkimuksessa saadut tulokset validia eli totta. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006c)

Reliabiliteetti ilmaisee tutkimuksen mittaustulosten toistettavuutta. Tässä työssä reliabiliteettia tarvittiin, kun tutkittiin mittausten stabiliteettia. Stabiliteetti on yksi reliabiliteetin osatekijöistä. Stabiliteetilla pyritään varmistamaan, että tutkimuksessa tehdyt mittaukset ovat toistettavissa, ulkoisista seikoista huolimatta. Stabiliteettia voidaan parantaa tekemällä mittaukset useasti. (Mittarin luotettavuus 2008; Reliabiliteetti n.d)

### 2.3 Haastatteluiden luotettavuus

Haastattelusta saatavat tulokset saadaan luotettaviksi, jos haastatteluihin löydetään tutkimuksen kannalta oikea kohderyhmä ja heitä saadaan haastateltua tarpeeksi. Kun haastatteluja on tarpeeksi, tulokset ovat kohderyhmään yleistettävissä. Luotettavuutta voidaan tarkastella vertailemalla haastattelutuloksia muihin saman aiheen haastatteluiden tuloksiin. (Kananen 2015, 347-349)

Haastatteluiden luotettavuus paranee, kun näkemykset ovat samankaltaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa tai kun haastattelutuloksia voidaan tukea luotettavalla lähteellä. (Kananen 2015, 132)

### 2.4 Laatuajattelu

Laatuajattelussa pyritään käyttäjän tarpeen tunnistamiseen ja lopputuotteen onnistumista mitataan tuotteen vaatimuksenmukaisuudella. Laatuajattelu pohjautuu suunnitteluvaiheeseen, jossa tehdyille työlle asetetaan vaatimukset. Laatuajattelussa pyritään löytämään sellainen lopputulos, joka miellyttää käyttäjää riittävästi. (Mitä on laatuajattelu? n.d)

## 3 Kantaverkon ohjaus

### 3.1 Kantaverkko

Kantaverkko on tärkeä osa Suomen sähköjärjestelmää. Sen tehtävänä on toimia Suomessa siirretyn sähkön runkoverkkona. Kantaverkkoa hallinnoi Fingrid.

Hallinnointi tapahtuu Fingridin kantaverkkokeskuksessa, joka käytön lisäksi huolehtii verkon tehotasapainosta. (Sähkön tasepalvelut n.d; Elovaara & Haarla 2011a, 58-60)

Tehotasapainoa säädellään tasehallinnalla, joka pyrkii ylläpitämään verkon 50 Hz:n taajuutta säilyttämällä sähkönkulutus ja -tuotto saman suuruisena. Verkossa oleva ylimääräinen tai puuttuva sähkö voidaan tasata esimerkiksi siirtoyhteyksillä Suomen ulkopuolelle tai muilla tehoreserveillä. Kantaverkosta on tähän tarkoitukseen rakennettu siirtoyhteydet Ruotsiin, Norjaan, Viroon ja Venäjälle. (Sähkön tasepalvelut n.d; Elovaara & Haarla 2011a, 58-60) Siirtoverkon johtojen pituus on 14400 kilometriä. Sähkön siirtäminen tapahtuu 400:n, 220:n ja 110:n kilovoltin jännitetasolla, koska siirtäminen halutaan tehdä tehokkaasti ja suurilla siirtojännitteillä tehohäviöt pienentyvät. Siirtojännitteistä 400 kV:n ja 110 kV:n jännitetasot ovat nykyisessä verkossa huomattavasti yleisempiä kuin 220 kV:n siirtojännite. Tulevaisuudessa 220 kV:n siirtojännite vähenee samalla, kun verkkoa uudistetaan. (Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017 – 2027 n.d, 59; Haarla 2011a, 54)

Kantaverkossa tehoa siirrellään siihen liittyville asiakkaille, jotka ovat pääsääntöisesti suuria tehtaita, voimalaitoksia tai jakeluverkkoja. Verkon ohjaamiseen käytetään katkaisijoita, joita esiintyy Fingridin sähköasemilla ja kytkinlaitoksilla. Vuonna 2018 Kantaverkossa sähköasemia oli 116 kappaletta. (Suomen sähköjärjestelmä n.d; Elovaara & Haarla 2011a, 61)

Kantaverkkoon investoidaan vuosittain noin 110 miljoonaa euroa. Investoinneilla pyritään ylläpitämään nykyistä verkkoa ja sen siirtovarmuutta sekä parantamaan verkon tehokkuutta. Kantaverkon toiminnan on kuitenkin samalla oltava taloudellista, joten siihen ei saa investoida tarpeettomasti. (Suomen sähköjärjestelmä n.d; Elovaara & Haarla 2011a, 61)

Vuonna 2017 kantaverkon siirtovarmuus oli 99,99969 % ja keskimääräinen keskeytysaika 2min 14s. Keskimääräinen keskeytysaika tarkoittaa keskiarvoa ajasta, jonka kantaverkossa ollut vika aiheutti siihen liittyville asiakkailleen keskeytysaikaa yhden vuoden aikana. (Sähkön siirtovarmuus n.d.)

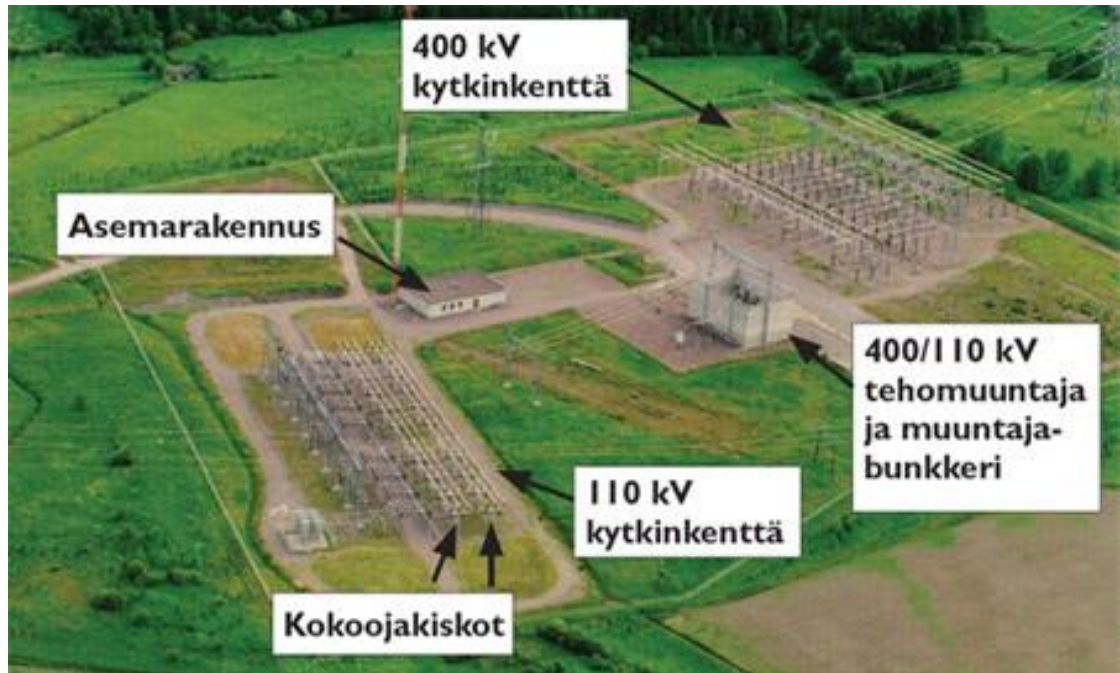
## 3.2 Sähköasema

Sähköasema on verkon hallintaan tarkoitettu alue. Asema-alue on usein rajattu aidalla, koska pääsy jännitteelliselle sähköasemalle on oltava rajoitettu. (SFS 6001:2015, 57) Sähköasemaa voidaan kutsua kytkinasemaksi. Asemat koostuvat useista laitteista, jotka oikein toimiakseen kommunikoivat keskenään. Aseman laitekokonaisuudet vaihtelevat aseman iän ja aseman käyttötarkoituksen mukaan. Sähköasema koostuu aina yhdestä tai useammasta kytkinkentästä ja asemarakennuksesta (Ks. Kuvio 1). (Elovaara & Haarla 2011b, 96, 102, 344.) Sähköasemia käytetään asemalle saapuvien johtojen kytkennöissä tai jännitetason muutoksessa. Sähköasemien perustarkoitus on ohjata ja suojata aseman läpi kulkevia johtimia ja asemalla sijaitsevia primäärilaitteita. (Elovaara & Haarla 2011b, 96.)

Asemia, joissa käytetään muuntajaa siirtojännitteen muuntamiseen, voidaan kutsua muuntoasemaksi. Muuntoasemilla on aina vähintään yksi muuntaja sekä vähintään kaksi eri pääjännitetasoa. Kantaverkon 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n siirtojännitteiden lisäksi muuntajan tertiäärikäälämyksen avulla saadaan usein asemalle myös 20 kV:n jännite, johon liitetään aseman kompensointilaitteita, kuten kompensointireaktori. Muuntoasemia käytetään myös voimalaitoksen tai tehtaan liittämässä kantaverkkoon. (Elovaara & Haarla 2011b, 96-119; Laaksonen, Saarinen, Sederlund, Sulamaa, Uusitalo, Uusitalo, Yli-Salomäki. 2011, 413)

Sähkön siirtämisessä aseman läpi kulkevat siirtojännitteet ovat johtimilla yhteydessä asemalla olevaan kytkinkenttään. Johdin voi olla liitettynä myös johonkin aseman laitteista, kuten muuntajaan tai kompensointilaitteeseen. Kytkinkenttää voidaan myös kutsua kytkinlaitokseksi. Toteutustavastaan riippuen kytkinlaitos voi sijaita ulkona tai sisällä, jonka perusteella kytkinlaitosta voidaan kutsua sisäkytkinlaitokseksi tai ulkokytkinlaitokseksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 119; Laaksonen ym. 2011, 408, 413)

Yksittäinen kytkinkenttä koostuu primäärilaitteista, jotka muodostavat kokoojakiskojärjestelmän. Kokoojakiskojärjestelmään kuuluu kokoojakisko, kytkinlaitteita ja mittamuuntimia. (Elovaara & Haarla 2011b, 119)



Kuvio 1 Muuntoasema koostuu vähintään yhdestä kytäkentästä, asemarakennuksesta ja tehomuuntajasta. (Sähköasemat, n.d)

### 3.3 Kokoojakiskojärjestelmä

Kokoojakiskojärjestelmän tehtävä on mahdollistaa sähkökentällä tarvittut erilaiset kytäkentätarpeet. Kokoojakiskojärjestelmäksi luetaan myös kiskoton järjestelmä, joita esiintyy pääosin erotinasemilla. Muut kokoojakiskojärjestelmät sisältävät vähintään yhden tai useamman kokoojakiskon. Kokoojakisko voi olla pääkisko tai apukisko. Pääkiskossa piiri erotetaan katkaisijalla, apukiskossa pelkällä erottimella. (Elovaara & Haarla 2011, 102; Laaksonen ym. 2011, 404)

Useammalla kokoojakiskolla pystytään toteuttamaan useita erilaisia kiskojärjestelmien variaatioita. Kokoojakiskojärjestelmällä on vaikutus koko sähköaseman järjestelmän hintaan, käytettävyyteen ja luotettavuuteen, koska kiskojärjestelmä vaikuttaa järjestelmän ohjauslaitteiden määrään. (Elovaara & Haarla 2011b, 103-104)

Tässä opinnäytetyössä simulaatiotilanne rakennettiin kaksoiskatkaisija- eli duplex-järjestelmälle. Muita kokoojakiskojärjestelmän perustyyppjä ovat mm. kiskoton

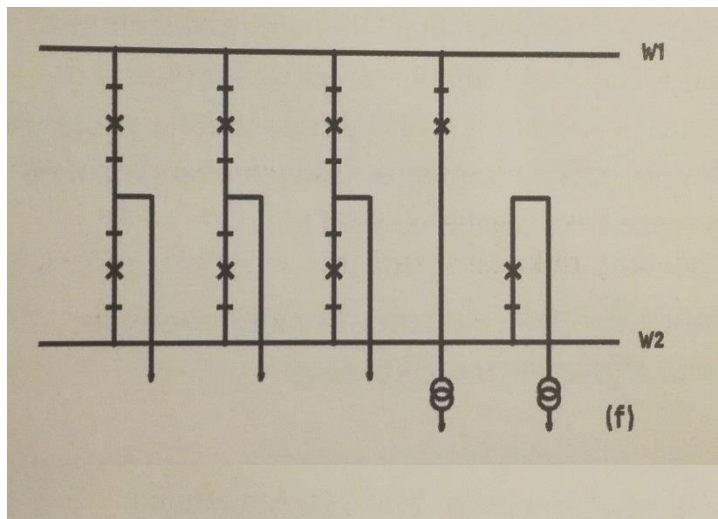


järjestelmä, kisko-apukiskojärjestelmä, kaksoiskiskojärjestelmä ja kaksoiskisko-apukiskojärjestelmä (Ks. Liite 1). (Elovaara & Haarla 2011b, 102-104)

Kaksoiskatkaisija- eli duplex-järjestelmä on kokooja-kiskojärjestelmä, jossa on kaksi pääkiskoa, johon liitytään kahdella eri katkaisijalla (Ks. Kuvio 2).

Kaksoiskatkaisijajärjestelmän etuja ovat huollettavuus, käyttövarmuus ja soveltuvuus etäkäyttöön. (Elovaara & Haarla 2011b, 105-110)

Täysduplex-järjestelmässä katkaisijat liittyvät kahteen kiskoon, joista molempiin liitytään muuntajalla. Tällaisen kahdennetun primäärilaitteiston rakentaminen on kuitenkin melko kallista. Muuntajien ja katkaisijoiden kaksinkertaistuttua tarvitaan laitteita lisää myös sekä primääripuolelle että toisiopuolelle. Rakentamisesta aiheutuvia kuluja voidaan karsia tekemällä järjestelmästä riisuttu duplex. Riisutussa duplexissa joitain johtolähtöjä voidaan jättää kahdentamatta tai kytkinasemalle ostetaan vain yksi muuntaja, joka liitetään toiseen kiskoista. Kuluja voidaan vähentää myös käyttämällä erottavia katkaisijoita. Tällaiset järjestelyt kuitenkin laskevat järjestelmän käytettävyyttä. (Elovaara & Haarla 2011, 105-107; Laaksonen ym. 2011, 231, 407-408) Aiemmin osittain riisuttua duplex-järjestelmää käytettiin 400 kV:n muuntoasemissa lähes aina, mutta suojausasiantuntijoiden mukaan nykyisin on alettu käyttämään täysduplex-järjestelmiä. (Viinikainen 2018)



Kuvio 2 Kaksoiskatkaisijakentässä kiskoihin liitytään kahdella katkaisijalla. (Laaksonen ym. 2011, 406)

### 3.4 Sähköaseman laitteet

Sähköaseman toiminnan kannalta keskeisimpiä laitteita ovat kytkinlaitteet, kompensointilaitteet, toisiolaitteet ja erilaiset muuntajat, kuten tehomuuntajat, mittamuuntajat ja mitta-arvonmuuntajat. (Laaksonen ym. 2011, 404)

Sähköaseman ohjaukset ja suojaukset on toteutettu asemarakennuksessa, johon sijoitetaan aseman toisio- ja apusähköjärjestelmät. Asemarakennusta voidaan kutsua myös valvomorakennukseksi. Rakennuksia voi sähköaseman toteutustavasta riippuen olla useita. (Laaksonen ym. 2011, 547-548.)

Sähköasemalla sijaitsevassa asemarakennuksessa on myös automaatiojärjestelmä, johon liittyy laitteita, kuten viestintälaitteet, suojauslaitteet ja etäyhteyslaite. Nämä laitteet mahdollistavat sähköasemien laitteiden välisen kommunikoinnin ja laitteiden ohjaamisen tietoturvallisesti. Sähköasemalta löytyy myös paljon muita laitteita, jotka tukevat aiemmin mainittujen laitteiden toimintaa. (Laaksonen ym. 2011, 549, 558)

Sähköaseman toisiolaitteiden ohjaaminen tapahtuu useimmiten etänä. Toisiolaitteeksi kutsutaan laitteita, jotka eivät kuulu pääjännitteelliseen primääripiiriin. Toisiolaitteet kuuluvat toisiojärjestelmään, jonka tehtävänä on suojata kantaverkkoa. Toisiojärjestelmien käyttöjännite on varmennettu, koska laitteiden käyttövarmuutta halutaan parantaa. (Laaksonen ym. 2011, 547)

Sähköasema halutaan rakentaa käyttö- ja toimintavarmaksi. Käyttö- ja toimintavarma järjestelmä kestää yksittäisen laitteen vikaantumisen. Kantaverkon tärkeintä mitoituspäätettä kutsutaan N-1 kriteeriksi. N-1 Kriteeri tarkoittaa, että yksittäinen laite saa koska tahansa vikaantua ilman, että se johtaisi laajenevaan häiriöön. Toimintavarmuutta lisätään esimerkiksi siten, että suurin osa asemalla olevista laitteista kahdennetaan. Kahdentamisessa laitteet kaksinkertaistetaan siitä järjestelmästä, jolla asema toimisi ilman laitteiden vikaantumista. Laitteita kahdentamalla pyritään estämään laitteen vikaantuessa tapahtuva häiriötilanne. (Laaksonen ym. 2011, 83, 153; Elovaara & Haarla 2011a, 271)



suoritettua huomattavasti pienemmällä määrällä mineraaliöljyä, kuin vanhemmissa öljykatkaisijoissa. (Elovaara & Haarla 2011b, 163-169; Laaksonen ym. 2011, 457-460)

Katkaisijan kiinni- ja auki-ohjauksessa tapahtuvaa viivettä kutsutaan katkaisijan toiminta-ajaksi. Toiminta-aika koostuu katkaisijan valokaaren sammumisesta sekä katkaisijassa koskettimien mekaanisesta liikkeestä. Toiminta-aika vaihtelee riippuen katkaisijamallista ja siitä, ohjataan katkaisijaa auki vai kiinni. (Elovaara & Haarla 2011b, 163; High-voltage circuit-breakers 3AP1 technical data, 3-4)

Suojausasiantuntijoiden mukaan katkaisijan toiminta-aika voi olla suuruusluokaltaan auki-ohjauksessa 20-50 ms ja kiinni-ohjauksessa 40-110 ms.

### 3.6 Uudemmat katkaisijatyypit

Uudempia katkaisijatyyppejä ovat tyhjiökatkaisijat ja kaasukatkaisijat.

Tyhjiökatkaisijoita on valmistettu 1980-luvulta asti ja niiden toiminta perustuu katkaisukammiossa olevaan tyhjiöön. Tyhjiökatkaisijan etuja ovat pieni avausväli ja huoltovapaus. Tyhjiökatkaisijan haittoja ovat sen matalahko oikosulun katkaisukyky. Katkaisukyvyn vuoksi tyhjiökatkaisijoita ei käytetä ainakaan vielä kantaverkossa, vaan ne ovat yleisempiä jakeluverkossa. (Elovaara & Haarla 2011b, 170, 182-184) Kaasukatkaisijat ovat katkaisijoita, joiden eristinaaineena toimii kaasu. Tällä hetkellä kaikki kantaverkkoon ostettavat katkaisijat ovat SF<sub>6</sub>-kaasua käyttäviä katkaisijoita. (Laaksonen ym. 2011, 461)

SF<sub>6</sub>-kaasu on rikistä ja fluorista koostuva kaasu, joka ei sellaisenaan kestä Suomen arktisia olosuhteita ympärivuotisesti. Pelkkää SF<sub>6</sub>-kaasua käyttävät katkaisijat ovat sijoitettu sisäkytkinlaitoksiin, koska ne vaativat ylläpitolämpöä. Ulkokytkinlaitoksissa sijaitseviin SF<sub>6</sub>-katkaisijoihin on lisätty seoskaasua, jolla parannetaan kaasun pakkasenkestoa. Seos voi olla esimerkiksi SF<sub>6</sub>+CF<sub>4</sub> (Rikkiheksafluoridi+Tetrafluorimetaani) tai SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> (Rikkiheksafluoridi+Typpikaasu). (Suurjännitetuotteet n.d; Laaksonen ym. 2011, 314)

Ylläpitolämpöä vaativat SF6-katkaisijat sijoitetaan GIS-laitoksiin (Gas Insulated Switchgear). GIS-laitoksissa kytkinlaitos koteloidaan kaasutiiviin alumiinista valmistetun putkiston sisälle, jossa eristeenä on 3-6 Baarin ylipaineinen SF6-kaasu (Ks. Kuvio 3). Suomen kantaverkon GIS-laitokset sijaitsevat aina sisäkytkinlaitoksessa. Täysin SF6-kaasueristeinen katkaisija vie reilusti vähemmän tilaa kuin avokytkeilaitoksilla käytetyt katkaisijat, joihin on lisätty seoskaasua. Tämän lisäksi kaasueristeiset rakenteet ovat kosketussuojauksensa takia turvallisempia ja tarvitsevat vähemmän huoltoa, kuin peruskatkaisijat. Hinnaltaan GIS-laitos on kalliimpi kuin perinteinen katkaisija. (Laaksonen ym. 2011, 279, 314, 411)



Kuvio 3 GIS-laitoksella oleva laitteisto on koteloitu tiiviisti.

### 3.7 Erottavat katkaisijat

Erotettavan katkaisija toimii piirin ohjauksessa katkaisijana sekä erottimena. Erotettavaa katkaisijaa voidaan ohjata piirin ollessa virrallinen. Erotettava katkaisija toimii erottimena silloin, kun katkaisija on lukittu auki-asentoon. Lukittuna katkaisijan ohjaus ei ole mahdollista.

Erotin on laite, joka tekee irti-kytkettävän piirin ja verkon välille nähtävän avausvälin. Normaalia erotinta ei saa ohjata piirin ollessa virrallinen ja avausväli on muodostettu ilmapälillä, joka on helposti nähtävissä. Avausväli on aina oltava selvästi nähtävissä,

minkä vuoksi erotettavissa katkaisijoissa asennon osoitus on toteutettu sähköisesti sekä mekaanisesti. Koska erottavassa katkaisijassa mekaaninen asento jää katkaisijan kotelon sisälle, on mekaaninen asento nähtävissä asennonosoittimella. (Laaksonen ym. 2011, 464-465) Työn aikana tehdyissä haastatteluissa selvisi, että toimeksiantaja käyttää paljon erotettavia SF6-kaasukatkaisijoita (Ks. Kuvio 4). (Viinikainen, 2018)

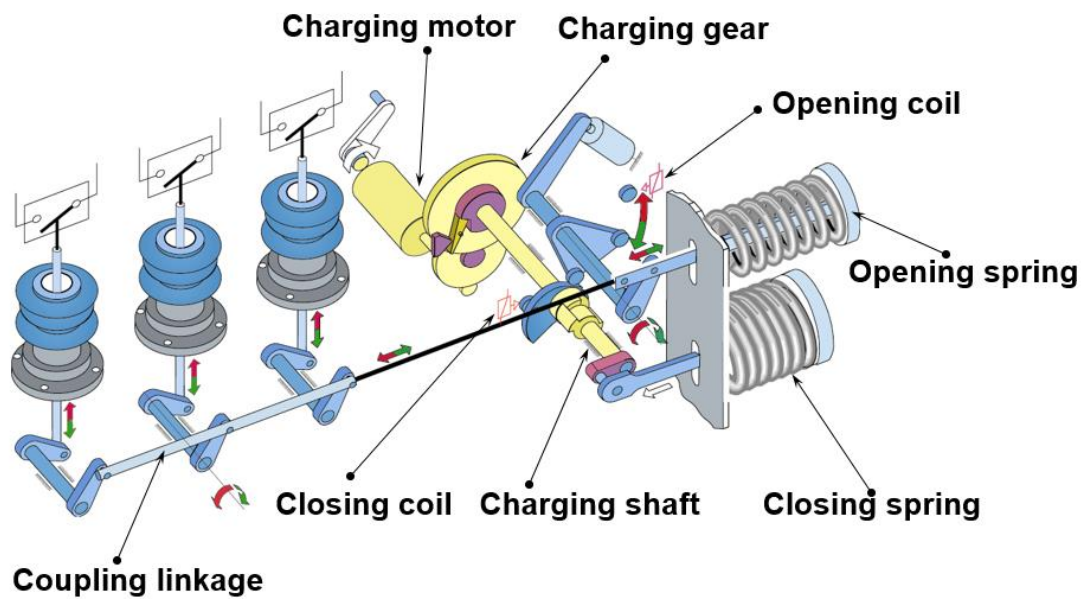


Kuvio 4 Erottavat katkaisijat ovat yleinen näky kantaverkon sähköasemilla. (Disconnecting circuit breakers. n.d)

### 3.8 Katkaisijan ohjain

Katkaisijan ohjaimen tehtävä on ohjata katkaisijaa ja saada välitettyä katkaisijan koskettimen toimintaan vaadittu liike-energia. Itse katkaisutapahtumassa nopean liikkeen hoitaa usein jousi, johon tarvittava liike-energia on varattu sähkömoottorin avulla (Ks. Kuvio 5). (Laaksonen ym. 2011, 462)

Yksi katkaisijan ohjaimen tärkeimmistä toiminnallisuuksista on pumppauksen esto, jonka avulla estetään katkaisijan tahaton kiinni-ohjaus vikatilanteen päättyessä. Pumppauksen eston tarkoituksena on estää katkaisijan kiinni-ohjaus sen jälkeen, kun katkaisijan laukaisuun käytetty signaali päättyy ja kiinni-ohjaus on jäänyt päälle. Ohjaimella on myös muita valvontatehtäviä, kuten SF6-kaasun paine ja katkaisijan ohjausnapojen synkronoinnin tarkistus. (Function Description of Control System for Circuit-Breaker 3AP1-FI 2001, 5)



Kuvio 5 Katkaisijan ohjaukseen tarvittava energia varastoidaan usein jouseen sähkömoottorin avulla. (High-voltage circuit-breakers 3AP1 technical data. n.d, 9)

### 3.9 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat ovat muuntajia, joita käytetään mittaussuureen muuntamisessa sopivalle tasolle. Mittamuuntajan tehtävä on mitata tehosuuretta mahdollisimman tarkasti ja muuntaa mittaustulos sopivaksi toisilaitteille. Muunnossa käytetään mitaus- ja suojaussydämiä.

Mittamuuntajien avulla verkossa kulkevat tehosuureet saadaan sopivan suuruisiksi suojarielelle, joka mittaustiedon avulla ohjaa verkossa olevaa katkaisijaa verkon tai sen komponenttien vikaantuessa. Mittamuuntajat eristävät primäärilaitteiston toisilaitteistosta, jonka vuoksi toisilaitteet eivät verkon vikaantuessa hajoa.

Erilaisia mittamuuntajatyyppejä ovat virtamittamuuntajat ja jännitemittamuuntajat. (Laaksonen ym. 2011, 440; Elovaara & Haarla 2011b, 198)

### 3.10 Relesuojaus

Suojareiden tarkoituksena on suojata verkkoa sen vikaantuvilta komponenteilta ja muilta poikkeustilanteilta. Erilaisia verkon vikatilanteita ovat oikosulut ja maasulut.

Kantaverkossa käytettyjen avojohtojen yleisin vika on salaman aiheuttama 1-vaiheinen maasulku. (Elovaara & Haarla 2011b, 335, 339)

Relesuojaus on iso osa sähköaseman suojausjärjestelmää, joka vastaa aseman suojaamisesta ja kommunikoinnista. Vikaantunut verkko voi aiheuttaa sen käyttäjille haittoja. Suojausten toiminta ja havahtuminen tapahtuvat verkosta mitattujen suureiden avulla. Primääripiiristä mitatut suureet tulevat suojareleelle mittamuuntajan avulla. Kahdennetuissa piireissä suojareleen mittaustieto johdetaan mittamuuntajan eri mittauskäämeistä. Verkossa ilmenneet poikkeustilanteet kytketään irti verkosta ohjaamalla katkaisijaa. Vikatilanteessa suojarele antaa katkaisijalle käskyn, jota kutsutaan laukaisukäskyksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 198, 334-344; Laaksonen ym. 2011, 447-448, 457)

Hyvässä suojausjärjestelmässä verkon vikatilanteet suljetaan verkosta luotettavasti, nopeasti ja selektiivisesti toimivalla suojauksella. Relesuojauksen selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, ettei vikatilanteessa eroteta vikaantuneen laitteen lisäksi ylimääräisiä verkon alueita. (Elovaara & Haarla 2011b, 342-344)

Vikasuojauksessa on varauduttu laitteiden toiminta-aikoihin. 400 kV:n verkossa käyttö varautuu oikosulussa ja maasulussa alle 100 ms:n vika-aikoihin ja 110 kV:n verkossa iso osa vioista katkaistaan alle 100 ms:n kuluttua vikatilanteesta. Aika vastaa suojalaitteen sekä katkaisijan yhteenlaskettua hitainta mahdollista toiminta-aikaa. (Elovaara & Haarla 2011b, 337, 345, 367)

Suojauksen luotettavuutta mitataan kahdella eri mittarilla, jotka ovat toimintavarmuus ja käyttövarmuus. Näitä mittareita seuraamalla pyritään siihen, että lopputuloksena suojarele laukaisee vikaantuneet komponentit vian sattuessa, mutta ei kuitenkaan tee virhelaukaisuja silloin, kun verkossa ei ole vikoja. (Elovaara & Haarla 2011b, 343) Yleisesti käyttövarmuutta ja luotettavuutta on lisätty kahdentamalla pääsuojareleet. Kahdennetut suojareleet sijoitetaan johdon vasta-asemille.



Suomen kantaverkossa olevan 400 kV:n verkon suojaamisessa vaaditaan korkeampi luotettavuus, kuin 110 kV:n verkossa, jossa on pienempi oikosulkuteho. Tämän vuoksi 400 kVn suojausjärjestelmästä on tehty luotettavampi. 400 kV:n johtolähdössä suojauksen luotettavuutta on parannettu kahdentamalla aseman suojausjärjestelmä.

Pääsuojareleitä on yhdessä 400 kV:n kytkinkentän johtolähdössä 2 asemalla ja 2 vasta-asemalla. Suojareleet on hankittu kahdelta eri laitevalmistajalta, jotta vältettäisiin suojareleiden samanaikaiset laiteviat eli yhteisviat. Pääsuojien lisäksi johtolähdössä on 1-2 kappaletta jälleenkytkentäreleitä ja maasulkuvirtarele. (Elovaara & Haarla 2011b, 361)

Asemalla olevia tehomuuntajia, kiskoja ja kompensointilaitteita suojataan erilaisella suojarelerakenteella, kuin johtolähtöjä suojatessa. Muuntajasuojauksessa käytetään differentiaalireleitä ja virtareleitä. Kiskojärjestelmiä suojatessa käytetään kisko- ja katkaisijavikasuojausreleitä sekä jännitereleitä. Kompensointilaitteita suojatessa käytetään maasulku- ja ylivirtareleitä. (Elovaara & Haarla 2011b, 356-360)

Suojarelettä voidaan avojohtojen vikatilanteen jälkeen käyttää myös automaattiseen jälleenkytkentään, jolla yritetään automaattisesti palauttaa pääsuojareleen irti-kytkemä verkon osa. Jälleenkytkennän tekee jälleenkytkentärele, joka saa jälleenkytkentä-käskyn joltain suojareleistä. Usein jälleenkytkentä-käskyn antaa pääsuojarele. Automaattisen jälleenkytkennän tapoja ovat pikajälleenkytkentä ja aikajälleenkytkentä. (Elovaara & Haarla 2011b, 356, 367, 371)

Pikajälleenkytkentä suoritetaan alle sekunnin kuluttua vian irtikytkennästä ja aikajälleenkytkentä 30-60 sekunnin pituisen väliajan kuluttua pikajälleenkytkennästä. Kantaverkossa pikajälleenkytkentää käytetään, kun suojausjärjestelmän aikaansaama katkaisutapahtuma on tullut hidastamattoman laukaisun jälkeen, eli suojareleen nopean laukaisuportaan viasta. (Elovaara & Haarla 2011b, 367, 371-372)

Suojausjärjestelmän luotettavuutta on ajan saatossa paranneltu kehittämällä suojareleitä.

Aiemmin relesuojauksessa on käytetty sähkömekaanisia ja elektronisia suojareleitä, jotka ovat nykyisiä suojareleitä yksinkertaisempia ja epätarkempia. Vanhoja elektronisia suojareleitä on edelleen toiminnassa, mutta nykyisin relesuojauksessa keskitytään digitaalisiin releisiin. Toimeksiantajan nykyisin käytössä olevista suojareleistä suurin osa (73,5%) on digitaalisia suojareleitä. (Elovaara & Haarla 2011b, 334-344; Vanninen 2018, 83)

Sähköaseman yleisimpiä suojareleitä ovat tahdissaolon valvojat, ylivirta-, distanssi-, nollavirta-, differentiaali-, jälleenkytkentä-, taajuus-, kiskosuoja-, katkaisijavika-, kaasu- ja jännitereleet. Nykyisin käytetyt digitaaliset suojareleet mahdollistavat myös sen, että yhteen suojareleeseen voi olla integroitu eli yhdistetty useita eri toimintoja. (Elovaara & Haarla 2011b, 346)

### 3.11 Digitaalinen suojarele

Suojareleitä, joissa on mikroprosessori, kutsutaan digitaalisiksi suojareleiksi. Aiempiin suojareleisiin verrattuna digitaalisten suojareleiden saapuessa suojareleistä tuli monimutkaisempia ja monipuolisempia, koska nyt suojareleeseen saatiin tuotua tilatietoja, ohjelmoitua useampia asetteluvaihtoehtoja ja yhdistettyä useampia suojaustoimintoja yhteen suojareleeseen.

Nykyisin käytettävissä olevissa digitaalisissa releissä suojausasettelut ohjelmoidaan releeseen tietokoneella. Relettä voi myös hallita etänä tietokoneyhteyden kautta. Huolellisesti tehdyn ohjelmoinnin avulla suojareleen suojausasetteluista saadaan käyttökohteeseensa tismalleen sopivia. (Elovaara & Haarla 2011b, 345)

Toinen digitaalisen suojareleen hallintatavoista on ohjata relettä paikallisesti. Ohjaus tapahtuu paikallisen HMI:n (Human Machine Interface) kautta. HMI on suojareleen käyttöliittymä, jonka avulla suojareleen toiminnot muutetaan ihmisille ymmärrettävämpään muotoon visuaalisesti (Ks. Kuvio 6). (Inductive Automation. n.d; Vamp 259 ohjekirja 2011, 13, 235)



Kuvio 6 Siprotec 7SJ63. Digitaalisissa releissä on paikallinen HMI. (Siprotec 7SJ63. n.d)

### 3.12 Distanssirele

Distanssirele on relesuojauksessa käytetyistä suojareleistä tärkein johdonsuojarele. Distanssirele mittaa johtolähdöissä olevan vian suuntaa mittauspisteen impedanssin avulla. Se laskee impedanssia primääripuolella tuoduista jännite- ja virtamittauksista. Distanssirele laskee myös vikapaikan etäisyyden melko tarkasti vertaillen terveen ja vikaantuneen verkon impedansseja toisiinsa.

Nykyisin käytetyt distanssireleet ovat digitaalisia releitä, joihin suojattavien johtojen tiedot voidaan asettaa tarkasti. Tämän lisäksi uudemmat distanssireleet kommunikoivat vasta-asemien distanssireleiden kanssa viestiyhteyden avulla. (Elovaara & Haarla 2011b, 361-362)

Verkon vikaantuessa distanssirele antaa laukaisukäskyn katkaisijalle, joka on vian suunnassa. Distanssireleen laukaisukäskyn ulottuvuus perustuu sektoreihin. Uudemmissa distanssireleissä sektoreita on useita, mikä mahdollistaa vikapaikan rajaamisen tarkemmin, kuin vanhoissa distanssisuojareleissä. Tämä vaikuttaa suojauksen selektiivisyyteen. (Elovaara & Haarla 2011b, 348-351, 361-362)

## 4 Katkaisijasimulaattorin toteutus

Toimeksiantaja oli päättänyt, että katkaisijasimulaattori valmistetaan digitaalisesta releestä. Relevaihtoehtoja oli kaksi, joista toinen oli alkuperäistarkoitukseltaan

distanssirele ja toinen monitoimisuojarele. Toimeksiantajalle sopivampi valittiin vertailumenetelmiä käyttäen. Simulaattorin suunnitteluvaiheessa käytettiin apuna laatuajattelua.

Katkaisijasimulaattori päätettiin rakentaa digitaalisesta suojareleesta, koska:

- Suojareleessä voidaan lähtökohtaisesti toteuttaa katkaisijasimulaattori.
- Suojarele on ohjelmoitavissa, joten siihen saadaan säädeltäviä toimintoja.
- Digitaalisia suojareleitä on työympäristössä entuudestaan, minkä vuoksi ne ovat simulaattorin käyttäjille tuttuja.

#### 4.1 Benchmarking

Benchmarking eli vertailuanalyysi on analyysimenetelmä, jossa vertaillaan toimintaa, prosessia tai ominaisuuksia. Vertailussa pyritään etsimään laitteen vahvuuksia sekä heikkouksia ja vertailukohteeksi valitaan paras todettu toimintapa tai esikuva.

(Benchmarking n.d) Työssä käytettävä suojarele valittiin käyttämällä tuotekohtaista benchmarkingia vertailemalla kahta toimeksiantajan tarjoamaa tuotetta.

Vertailukohteena oli toteutettavan laitteen vaatimuksien aiheuttamat minimiominaisuudet. Valinnassa painotettiin ominaisuuksien lisäksi myös laitteen soveltuvuutta helppokäyttöiseksi katkaisijasimulaattoriksi.

#### 4.2 Vamp 259 Feeder Manager

Vamp 259 on digitaalinen suojarele (Ks. Kuvio 7). Se on distanssisuojarele, johon on integroitu ylivirta- ja jännitetoiminnot sekä jälleenkytkentä ja tahdissaolon valvonta.

Se on osa laitteen valmistajan, Schneider Electricin, VAMP 200-sarjaa.

Laitte liitetään tietokoneeseen käyttämällä liityntäkaapelia.

Vamp-suojareleessä on IEC 61850 kommunikaatiomahdollisuus, eli se tukee myös GOOSE-viestejä suojareleiden välisessä kommunikaatiossa. (Vamp 200 –sarja n.d)

Vakiona Vamp 259 sisältää 18 binäärisisääntuloa ja 10 binääriulostuloa.

Sisääntuloporteista 6 käyttää suojareleen omaa 48V:n tasasähkön jännitelähdettä ja loput 12 toimivat 18-265V:n tasasähkötasojännitteellä ja 50-250V:n

vaihtosähkötasojännitteellä. Binääriulostuloporteista 4 on laukaisupiireille ja 6 hälytyksille.

Vamp 259-relettä on myös mahdollista saada käyttäjälle räätälöidyillä ominaisuuksilla. Ominaisuudet muodostavat suojarielelle tyyppinumeron, josta voi myös jälkeenpäin selvittää, millaisilla lisäominaisuuksilla suojariele on tilattu. (Vamp 259 ohjekirja 2011, 298)

Työssä opinnäytetyössä käytetty suojariele oli tyyppiä VAMP259-3C7AAM. Tilauskoodin avulla selviää esimerkiksi, että laite käyttää 40-265V AC käyttöjännitettä ja laitteeseen on asennettu lisäkommunikointimoduuli, jossa on 8 binääristä sisääntuloporttia ja 4 hybridiporttia, joita voi käyttää sisään- tai ulostulona. Suojarelettä ohjelmoidaan Vampset-ohjelmointityökalulla. (Vamp 259 ohjekirja n.d, 254 & 279-280)



Kuvio 7 Vamp 259 on digitaalinen suojariele (Vamp 259 ohjekirja. 2011)

### 4.3 Siemens 7SJ6355

Siemens Siprotec 7SJ63 on monisuojariele, joka kuuluu Siemensin Siprotec 4-sarjaan. Kyseinen suojarielemalli koostuu erilaisista ominaisuuksista käyttäjälleen sopivaksi, joten pelkkä 7SJ63-suojariele ei kerro juurikaan laitteen ominaisuuksista. (Siprotec 4 7SJ63 n.d)

Tässä opinnäytetyössä käytetty suojariele oli tarkalta mallinumeroltaan 7SJ6355-5AB32-3FA0, mikä suojarieleen ohjekirjan mukaan tarkoittaa, että releessä on 37

binääristä sisääntuloa ja 14 binääristä ulostuloa. Kyseisen suojarleen suojaustoiminnoksi on ilmoitettu yli- ja alijännite-toiminnot. Tämän lisäksi laitteessa on kenttäohjausyksikön toiminnot. (Siprotec 4 7SJ63 Multifunction Protection Relay nd, 31)

7SJ63-suojarleen ohjelmointiin käytetään Digi 4-työkalua, joka on Siemensin ylläpitämä ohjelmisto kaikille Siprotec 4-sarjan laitteille. (Digi 4 engineering software n.d)

#### 4.4 Programma Sverker 750

Programma Sverker 750 on reletesteri, joka on tarkoitettu yksivaiheiseen suojarletestaukseen. Testerin valmistajana toimii Megger. Laitteessa on normaalien tehosuureiden lisäksi mahdollisuus mitata toiminta-aikoja tripping-toiminnolla. Laitteessa olevaan liityntärajapintaan käytetään turvaliittimiä (Ks. Kuvio 8). Testerin valmistaja on ilmoittanut laitteen toiminta-aikojen mittauksien mittausepätkarkkuudeksi alle 10 sekunnin mittauksilla  $\pm 1 \text{ ms} + 0.01\%$ . (Sverker 750 Myyntisivu n.d; Sverker 750/780 myyntisivu n.d; Sverker 750/780 laitemanuaali n.d, 5)



Kuvio 8 Sverker 750-reletesteriin liitytään turvaliittimillä. (Megger SVERKER750 Multi-function Single Phase Relay Test Set. n.d)

#### 4.5 Omicron cmc 156

Omicron cmc 156 on suojarilesteri, joka on tarkoitettu kolmivaiheiseen suojarilestaukseen. Siinä on 3 kappaletta säädettäviä 0-125V-ulostuloja jännitetestaukseen ja 3 kappaletta säädettäviä 0-12.5A-ulostuloja virtatestaukseen. Sen lisäksi laitteessa on 10 kappaletta binäärisiä sisääntuloja ja 4 kappaletta binäärisiä ulostuloja. Laitteessa on myös analogiset jännite- ja virtamittaukset. Laitteen liityntärajapintaan liitytään turvaliittimillä. Laitevalmistaja on koskettimien ohjaustavasta riippuen ilmoittanut sisääntulojensa mittaustarkkuudeksi 0.11-0.4 ms. Laite on ohjelmoitava, ja sitä ohjelmoidaan Omicronin ylläpitämällä Test Universe-ohjelmalla. (Omicron cmc 156 laitemanuaali n.d; Omicron cmc 156 testilaitte n.d)

#### 4.6 Omicron Test Universe

Omicron Test Universe on PC-ohjelmisto, jonka avulla pystytään ohjelmoimaan Omicronin valmistamia testauslaitteita. Suoritettavat testit pystytään ohjelmoimaan ennen varsinaisen testauksen alkua. Testien tulokset on mahdollista saada ohjelmistosta ulos automaattisen raportointipohjan avulla. (Omicron 2018; Omicron n.d; Test Universe n.d)

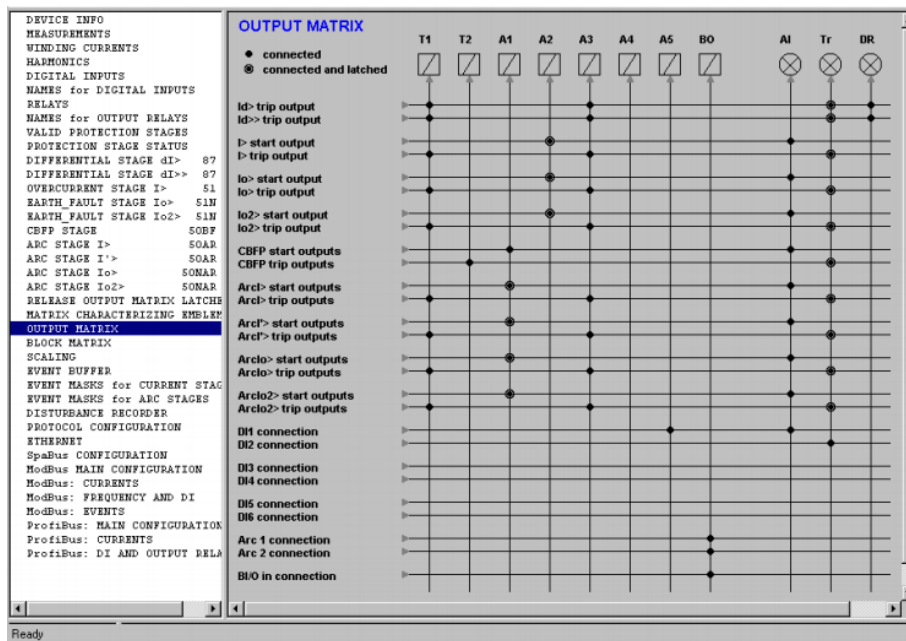
#### 4.7 Vampset

Vampset on ilmainen konfigurointiohjelmisto, jonka ylläpitäjänä toimii Schneider Electric. Se on VAMP-suojareille tehty ohjelmisto, jota käytetään suojarileiden konfigurointiin ja asetteluihin. Sen avulla suojarileeseen voidaan luoda mimiikka, asettaa suojausparametrit ja suojarileeseen käyttöönotettavat suojaustoiminnot. Ohjelmisto mahdollistaa myös Vamp-releiden häiriötallenteiden lukemisen. (Vamp – Ohjelmistot n.d; Schneider Electric Vampset. n.d, 6)

Mimiikkaeditoriryhmä on editointityökalu, jolla muodostetaan mimiikaksi kutsuttava suojarileiden paikallisnäyttö. Työkalun avulla paikallisnäyttöön pystytään lisäämään erilaisia kytkinkentän komponentteja, joiden tilatietoja pystytään havainnoimaan. Vampsetissa nämä komponentit ovat todellisuudessa objekteja, joita voidaan ohjata

ohjelmassa olevalla objektien hallinnasta. (Vamp – Ohjelmistot n.d; Schneider Electric Vampset. n.d, 39,55)

Voimassa olevia suojaustoimintoja ja ohjauksia pystytään seurata helpommin ohjelmasta löytyvillä ulostulomatriiseilla, jotka kertovat esimerkiksi katkaisijan laukaisusta, mitkä toiminnot ja tilatiedot aiheuttavat toiminnan aktivoinnin (Ks. Kuvio 9). Tämän lisäksi ohjelmistosta löytyy logiikkaohjelmointi, jolla pystytään tekemään lisätoimintoja. (Vamp – Ohjelmistot n.d; Schneider Electric Vampset. n.d, 36, 40)



Kuvio 9 Vampset-ohjelmistossa ulostulojen seurantaan voidaan käyttää ulostulomatriiseja. (VAMPSET Asettelu- ja konfigurointiohjelmisto n.d, 36)

## 5 Katkaisijasimulaattorin toteutusvaiheet

Konkreettiset työvaiheet olivat suunnitteluvaihe, kytkentä ja ohjelmointi sekä testausvaihe.

### 5.1 Suunnitteluvaihe

Tehtävää työtä alettiin suunnitella esisuunnitteluvaiheessa.



Esisuunnittelu alkoi heti opinnäytetyön aiheen varmistuttua ja siinä rajattiin katkaisijasimulaattorin toteutustapa perustuen laitteelta halutuille toiminnoille ja ominaisuuksille. Osan laitteen toiminnoista asetti toimeksiantajalta suoraan ja osa saatiin työn aikana tehtyjen haastattelujen avulla. Toteutettavan rajausta tehtiin, koska työhön haluttiin selkeät mittarit, joilla voidaan mitata työn onnistumista.

Työn lähtökohtana oli, että toteutetulla simulaattorilla pitäisi pystyä simuloida duplex- eli kaksikatkaisijajärjestelmää, jossa voidaan käyttää yksivaiheisesti auki-ohjattavia katkaisijan koskettimia. Yksivaiheisesti auki-ohjattavan katkaisijan kiinni-ohjausta voidaan kuitenkin toteuttaa kolmivaiheisena. Vaatimus laitteelta saatavilta tilatiedoilta oli, että auki-tiedot on saatava vähintään 3-vaiheisena ja kiinni-tiedot 1-vaiheisina. Tämän laajuisella katkaisijakiskojärjestelmällä pystytään simuloimaan myös muita kiskojärjestelmiä ilman ohjelmamuutoksia.

Ennen katkaisijasimulaattorin suunnittelua ja toteuttamisvaihetta käytiin lyhyitä haastatteluja. Haastatteluissa keskityttiin siihen, miten oikea käytössä oleva katkaisija toimii relesuojauksen näkökulmasta. Haastateltavaksi valittiin ne henkilöt, joiden asia koskettaa eniten. Haastatteluihin tavoitettiin suojausasiantuntija ja suojauksen erikoisasiantuntija, jotka ovat laitteen tulevia käyttäjiä.

Haastatteluiden perusteella simulaattorin toiminnoiksi rajattiin, että simuloitavassa katkaisijassa yhtenä toimintona olisi hyvä olla pumppauksen esto ja katkaisijoiden toiminta-aika on oltava muutettavissa. Käytettävän suojarleen toiminta-ajan enimmäispituudeksi määriteltiin kiinniohjauksessa 50 ms ja auki-ohjauksessa 35 ms. Määrittelyt perustuivat aiempiin kokemuksiin katkaisijan toiminnasta. Rajauksella pyrittiin simulaatiotilanteen mahdollistamiseen kaikilla katkaisijoilla, jottei suojarle ei toimisi ainakaan liian hitaasti missään simulointitarpeessa. Haastatteluiden tuloksiin haettiin tukea sähköasemien- ja laitevalmistajien dokumenteista. Näiden ominaisuuksien lisäksi toivottiin, että simulaattorista tulisi helposti kuljetettava, jotta sen mukaan ottaminen olisi helpompaa.

## 5.2 Suojareleen valinta

Opinnäytetyöhön sisältyi toimeksiantajan kannalta simulaattoriksi sopivamman suojareleen valinta. Valinnassa käytettiin tuotekeskeistä benchmarkingia, jossa vertailtiin releitä esisuunnitteluvaiheessa saatujen vaatimusten täyttämiseen. Saatujen vaatimusten perusteella tehtiin alustava suunnitelma katkaisijasimulaattorista, josta saatiin laskennallisesti ilmi työssä käytetyn suojareleen vaaditut minimiominaisuudet. Kahta eri laitevalmistajan suojarelettä vertailtiin minimivaatimukseen.

Yksi laitteiden vaadituista ominaisuuksista oli binääritietojen riittävyys. Vaadittu binäärimäärä saatiin suoraan katkaisijalle vaadittujen toimintojen perusteella, eli binäärisiä sisääntuloja tarvittiin katkaisijan ohjaamiseen 8 kappaletta: yksivaiheisille katkaisijan koskettimen auki-ohjauksille 6 kappaletta ja 2 kappaletta kolmivaiheisille kiinni-ohjauksille. Myös binäärisiä ulostuloportteja tarvittiin 8 kappaletta simuloitavan katkaisijan tilatiedoille: 6 kappaletta yksivaiheisille kiinni-tiedoille sekä 2 kappaletta kolmivaiheiselle auki-tiedoille. Vaadittua binäärimäärää vertailtiin suojareleiden binääritietojen määrään. Suojareleiden binääritietojen määrää tutkittiin tilausnumeron avulla suojareleiden manuaaleista.

Toinen suojareleen ominaisuuksiin perustuvista vaatimuksista oli toiminta-aika. Suojareleiden toiminta-aikoja testattiin Programma Sverker 750-reletesterillä. Testaus suoritettiin siten, että reletesteriltä annettiin ohjaukaskäsky, minkä jälkeen testi mittasi, kuinka kauan annettu ohjaukaskäsky kulkee suojareleen kautta takaisin reletesterille. Toiminta-aikojen mittaamisessa molemmille releille tehtiin kymmenen kappaletta mittauksia suojareleiden toiminta-aikojen toistettavuuden todentamiseksi.

Toiminta-ajan mittaamiseen molemmista vertailussa käytetyistä suojareleistä löytyi valmis logiikkaohjelmointi, minkä vuoksi tässä vaiheessa työtä suojareleiden toiminta-aikojen testaamiseen ei tarvittu suojareleen ohjelmointia. Toisessa releessä liityntärajapinnan kytkennät olivat mittauksen suorittamiseen valmiina ja toiseen suojareleistä jouduttiin kytkemään mittausliittimiä, jotta mittauslaite saatiin liitettyä suojareleeseen.

Reletesterin ohjauskäsky johdettiin suojuareleellä olevaan binääriseen sisääntuloporttiin, josta se laitteessa olevan ohjelmoitavan logiikan avulla siirrettiin releen binääriseen ulostuloporttiin. Ulostulo johdettiin liityntäraajapinnasta takaisin testerille. Toiminta-ajassa huomioitiin, että laitevalmistaja on ilmoittanut testauslaitteen mittausepätkä tarkkuudeksi toleranssin ( $\pm 1 \text{ ms} + 0.01\%$ ).

Mittauksissa osoittautui, että mittalaitteen mittausepätkä tarkkuudella ei ollut suurta merkitystä, koska molemmat suojuareleiden toiminta-ajoista alittivat alle 35 ms:n toiminta-ajan vaatimuksen reilusti alle  $\pm 1.35 \text{ ms}$  toleranssin.

Mittausepätkä tarkkuudella ei tässä tapauksessa ollut painavaa merkitystä mittaustuloksiin, koska näillä mittauksilla pyrittiin pelkästään varmistamaan, että laitteella on mahdollisuus toimia alle 35 ms:n toiminta-ajalla, joka toimeksiantajan kanssa määriteltiin aiemmin.

Tehdyt toiminta-ajan mittaukset ja laitteista selvitettyt tiedot lisättiin vertailutaulukoon, jossa vertailtiin ominaisuuksia vaadittuihin minimiominaisuuksiin. Tämän lisäksi huomioitiin laitteen varastotilanne ja koko. Suojuareleessä olevia muita ominaisuuksia, kuten suojaustoimintoja tai tehosuureiden mittauksia, ei työn aikana tarkasteltu.

Tämän jälkeen valittiin käytettävä suojuarele. Työssä käytettäväksi valittiin Vamp 259-distanssisuojuarele, koska se on riittävien ominaisuuksien lisäksi fyysisesti huomattavasti pienempi kuin toinen vertailun suojuareleista.

Tässä vaiheessa työtä esitin tuloksia toimeksiantajalle, minkä jälkeen totesimme, että simulaattoriksi valitulla suojuareleellä jää paljon ylimääräisiä portteja. Ylimääräisien porttien takia yksivaiheiset auki-ohjaukset ja kolmivaiheiset auki-tilatiedot päätettiin kahdentaa. Tämä lisäisi tarvittavien binääritietojen määrää ja parantaisi simuloitavan järjestelmän käytettävyyttä.

Kahdennetut signaalit tekevät suojuareleestä laajempikäyttöisen ja todellisuuden mukaisemman, koska 400 kV:n kaksois-katkaisijakentässä suojausjärjestelmän

suojareleet ovat asemalla kahdennettuja ja simulaattorilla oikein tehtyjen piirien kahdennus mahdollistaisi kahden suojareleen testaamisen samanaikaisesti eri lähdejännitteellä.

### 5.3 Kytkentä ja ohjelmoitava logiikka

Suojareleen valitsemisen jälkeen alkoi kytkentävaihe, joka alkoi johdotuskaavion suunnittelemisella ja kytkemällä suojarele sen liityntärajapintana käytetylle kytkentärimalle. Kytkentöjen jälkeen suojareleeseen luotiin konfiguraatio.

Suojareleiden kytkentään vaaditut tarvikkeet käytiin ostamassa sähkötarvikeliikkeestä. Työn toteuttamiseen tarvittavat työkalut ja suojareleiden vertailussa käytetyt laitteet olivat toimeksiantajalla entuudestaan.

Kytchentävaihe alkoi johdotuskaavion tekemisellä, johon suunniteltiin liityntärajapinnan ja suojareleen välinen kytkentä. Johdotuskaavion suunnittelussa otettiin huomioon, että kahdennetuilla signaaleilla on mahdollisuus käyttää eri lähdejännitettä. Tämän takia työssä tarvittavat binääriset sisään- ja ulostulotiedot ryhmiteltiin ja kytkettiin suojareleen eri korttipaikkoihin, joissa eri lähdejännitteen käyttö oli mahdollista.

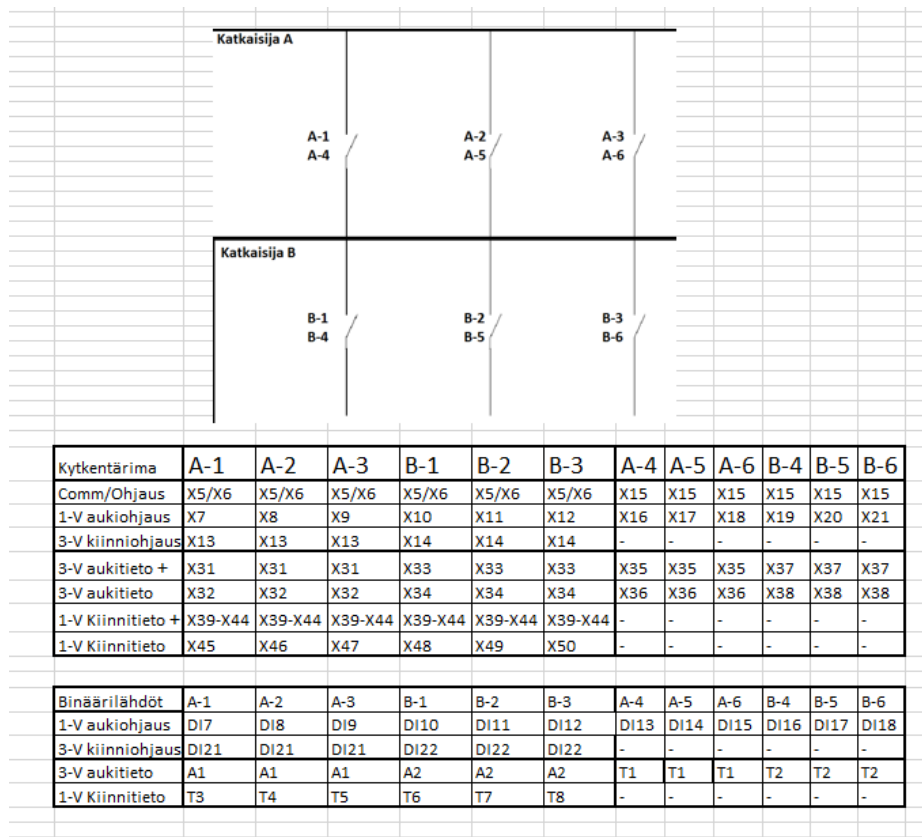
Johdottamisen visualisoinnissa käytettiin erivärisiä johtimia signaali- ja nollajohtimille ja vaihejohtimille. Johtimet suojattiin johtosukalla. Tämän jälkeen suojarele kytkettiin suunniteltuun liityntärajapintaan. Liityntärajapinta koostui DIN-kiskosta, johon tuli riviliittimiä. Riviliittimet olivat malliltaan katkaistavia ja molemmilla puolilla oli kosketussuojatut turvaliitinpaikat. Johdotuksen jälkeen kytkennät varmistettiin yleismittarilla (Ks. Kuvio 10).



Kuvio 10 Liityntäraajapinnan ja suojareleen väliset kytkennät varmistettiin mittamalla.

Kytchentävaiheen jälkeen alkoi ohjelmointivaihe. Ohjelmointiosuudessa käytettiin Vamp-releiden ohjelmointityökalua Vampsettia. Käytettävään suojareleeseen konfiguroitiin ohjelmoitava logiikka, mimiikka ja mimiikassa käytetyt objektit.

Toteutettavan simulaattorin kaksoiskatkaisijakentän katkaisijat nimettiin tunnuksilla AQ0 ja BQ0. Koskettimet ja niiden ohjaukset numeroitiin järjestyksessä. Kytkennoistä tehtiin kytkentäkuva tulo- ja lähtötiedoille ohjausmatriisi, joka sisältyi myös katkaisijasimulaattorin käyttöohjeeseen (Ks. Kuvio 11).



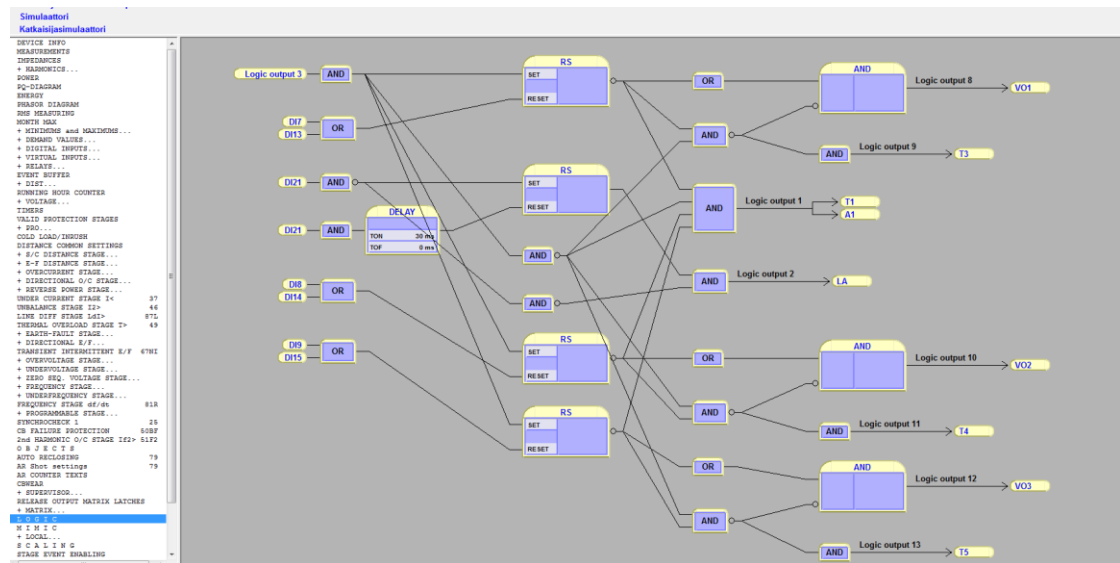
Kuvio 11 Katkaisijasimulaattorin ohjeeseen tehtiin ohjausmatriisi.

Työssä tarvittuja signaaleita siirrettiin logiikkaohjelmoinnissa käytettyjen peruspiirien avulla. Toimeksiantajan vaatimuksissa edellytetty pumppauksen esto-toiminto tehtiin ohjelmoitavalla logiikalla. Pumppauksen estoa ohjelmoidessa ilmeni pieniä haasteita, koska suojarleen logiikka tuki melko vähän erilaisia ohjelmalohkoja. Ohjelmoituja toimintoja testattiin aina piirien muuttelun jälkeen. Logiikkaohjelmointia rajoitti myös Vampsetin logiikkamuisti, joka täyttyi lähes kokonaan, kun piireihin oli saatu tehtyä pumppauksen esto ja perustoiminnot. Logiikkamuistin täyttyminen oli laitteen kannalta epätoivottua, koska ohjelmointilohkoja ei olisi jäänyt tulevaisuuden laajenusten varalle. Tämän vuoksi logiikkaohjelmaa täytyi tehostaa ohjelmalohkoja vähentämällä, poistamalla samalla toimintoja. Ongelma ratkaistiin pilkkomalla piirejä pienemmäksi ja käyttämällä logiikkaohjelman tiedonsiirtelyssä virtuaalisia ulostuloja (Ks. Kuvio 12).

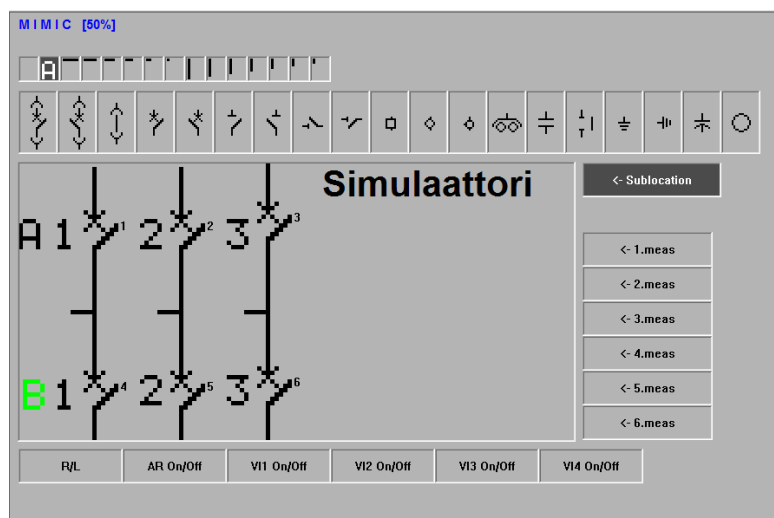
Simulaattorille annettu toiminta-aikojen muutos päätettiin toteuttaa muuttamalla binääristen sisääntulojen toiminta-aikoja. Tähän päädyttiin, koska tällöin toiminta-aikoja pystyttiin muuttamaan joko ohjelmamuutoksena tietokoneella tai suojarleen

HMI:llä. Toinen vaihtoehtoista olisi ollut toiminta-aikojen muutos logiikkaohjelmointiin, mikä olisi edellyttänyt aina tietokoneyhteyttä, koska Vamp 259-suojareleessä logiikkaohjelmaa ei pysty muokkaamaan suojareleen paikalliselta HMI:ltä.

Suojareleessä oleva mimiikka konfiguroitiin, jotta simulointitilanne näkyisi myös suojareleen näytöltä (Ks. Kuvio 13). Mimiikassa käyttöön tuli yksi objekti jokaiselle katkaisijan koskettimelle. Objektien tilaa ohjattiin logiikkaohjelmasta tulevien virtuaalisten ulostulojen avulla. Halutut ohjaukset lisättiin objektien hallintaan.



Kuvio 12 Virtuaalisia ulostuloja käytettiin tiedonsiirtämiseen.



Kuvio 13 Mimiikalla voidaan osoittaa laitteen tilatietoja visuaalisesti.

## 5.4 Käyttöohje

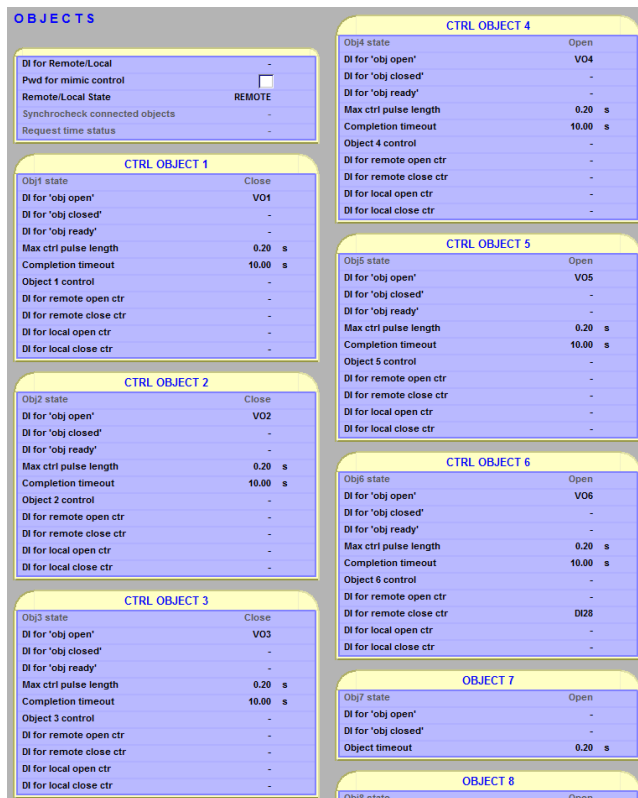
Laitteen käyttämiseen laadittiin käyttöohje, jossa käydään läpi, miten laite saadaan kytkettyä ja miten laitteen toiminta-aikoja muutetaan. Toiminta-aikojen muuttamiseen annetaan kaksi esimerkkiasettelua yleisesti käytettyjen katkaisijoiden toiminta-aikojen asettelusta (Ks. Liite 2). Tämän lisäksi ohjeeseen sisällytettiin katkaisijan kytkennästä tehdyt piirustukset, jotka kuvaavat kytkentärimaa sekä simulaattorin sisään- ja ulostuloja.

## 5.5 Testausvaihe

Testausvaihe jakautui kahteen osaan, jossa ensimmäisessä testasin suojarelettä itsenäisesti ja toisessa vaiheessa suojarelettä testattiin laajemmin toimeksiantajan edustajan kanssa.

Ensimmäisessä testivaiheessa testattiin logiikkaohjelmoinnin ja toiminnallisuuksien toimivuus sekä toiminta-aikoja suojareleen ohjetta varten. Itsenäisessä testausvaiheessa suojareleeseen aiemmin ohjelmoidut toiminnallisuudet testattiin. Suojareleeltä vaaditut toiminnot oltiin saatu pääpiirteittäin toimimaan aiemmin tehdyssä ohjelmointivaiheessa, jossa samalla myös testattiin toimintoja. Testausvaiheessa parannettavaa löytyi mimiikassa käytettyjen objektien toiminnassa. Mimiikassa olevat ongelmat saatiin ratkaistua objektien hallinnassa (Ks. Kuvio 14). Toimivassa ohjelmassa objektien ohjaamiseen käytettiin pelkästään virtuaalisia ulostuloja muuttamalla objektin tilaa, kun katkaisijan kosketin on auki-ohjattu yksivaiheisesti.





Kuvio 14 Ohjattavat objektit asetellaan Vampsetissa objektien hallinnassa.

Mimiikassa olleiden ongelmien lisäksi sen hetkinen simulaatio ei miellyttänyt tekijää, vaikkakin se täyttikin työlle annetut kriteerit. Pumppauksen esto oli pulssitettu siten, että se esti katkaisijan kiinni-ohjaamisen, kun auki-ohjaus oli päällä. Auki-ohjauskäsyn jälkeen katkaisija toimi aina asetetulla auki-ohjaus viiveellä.

Pumppauksen esto täytti sille annetut kriteerit, mutta katkaisijasimulaattori ei toiminnut oikean katkaisijan lailla, minkä vuoksi simulaatiotilannetta haluttiin parantaa. Parannuksena simulaattorin kiinni-ohjaus-signaali pulssitettiin 30 ms:n pituiseksi, mikä mahdollisti katkaisijan kiinni-ohjauksen myös silloin, kun auki-ohjaus signaali on päällä. Tällä tavoin simulaatiosta saatiin todellisempi, sillä myös oikealla katkaisijalla kiinni-ohjaus on toteutettu pulssilla ja katkaisijaa voidaan kiinni-ohjata, vaikka auki-ohjaus-signaali olisi tuntemattomasta syystä jäänyt päälle.

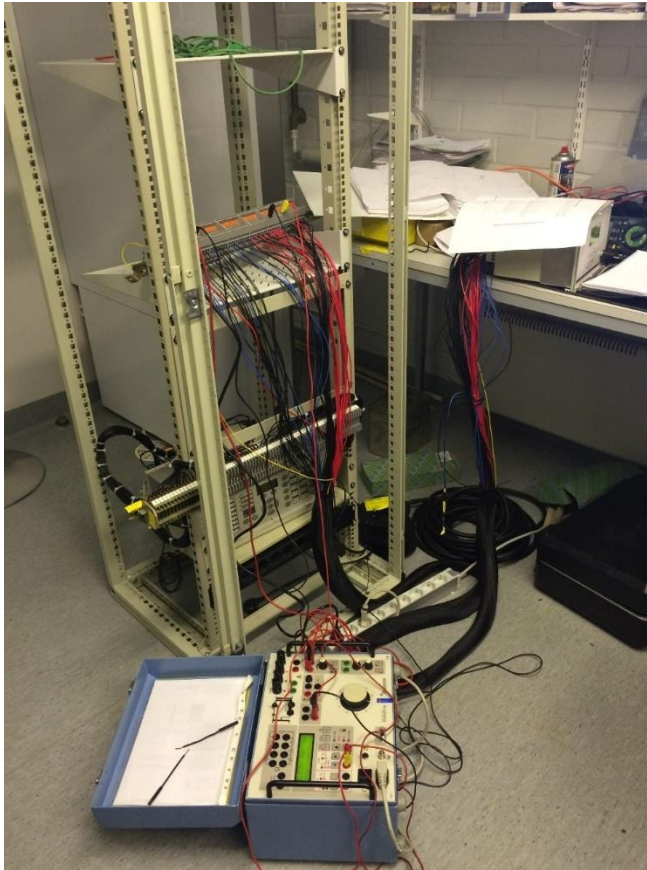
Pulssin pituudeksi määriteltiin myöhemmin testausvaiheessa 30 millisekuntia, koska pulssin pituus vastasi samalla aikaa, jonka oikea katkaisija olisi kiinni-tilassa ennen katkaisijan koskettimien nopeinta mahdollista uudelleen aukaisua. Viiveessä pyrittiin

pääsemään lähelle todellista katkaisijan "close+open"-aikaa, joka oli työssä tutkittujen katkaisijamanuaalien mukaan katkaisijan kiinni-ohjauksen toiminta-aika + viive 20-40 ms. (High-voltage circuit-breakers 3AP1 technical data. n.d, 5-6)

Todellisessa vikatilanteessa katkaisijan pikajälleenkytkennän jälkeen piirin avaamisessa voi olla vielä enemmän viivettä, koska vasta katkaisijan sulkeutumisen jälkeen suojariele voi havahtua verkossa olevasta viasta. Suojareleen laukaisu pikajälleenkytkennässä on kuitenkin melko nopeaa, sillä pikajälleenkytkennän yhteydessä käytetään myös SOTF-toimintoa (Switch on to fault). SOTF laukaisee piirin viiveettömästi suojarieleen havahtumisviiveen jälkeen. (Ojavalli 2011, 7; Viinikainen 2018)

Tehdyn toimivan logiikkaohjelmoinnin jälkeen katkaisijasimulaattorin varsinainen toiminta-aika mitattiin uudestaan Sverker 750-reletesterillä. Mittaus tehtiin, koska valmiin laitteen logiikkaohjelmointi oli muuttunut aiemmista testeistä ja haluttiin varmistaa, ettei suojarieleen viive ole muuttunut liikaa.

Suojareleen toiminta-aika mitattiin samalla laitteella kuin suojarieleen valintavaiheessa, koska mittausten haluttiin olevan vertailukelpoisia (Ks. Kuvio 15). Suojareleen toiminta-ajaksi mitattiin laukaisupiireissä 11-17 ms ja hälytyspiireissä 8-13 ms. Mitatut arvot olivat hieman suurempia kuin suojarieleen valintavaiheessa tehdyt mittaukset (6-12 ms), jolloin suojarieleellä oli kevyempi logiikkaohjelmointi.



Kuvio 15 Sverker 750 laitetta käytettiin suojarleen toiminta-aikojen mittaamiseen.

Mitattujen toiminta-aikojen perusteella tehtyyn käyttöohjeeseen lisättiin vähennys suojarleen toiminta-ajasta simuloinnin parantamiseksi. Vähentämisessä päädyttiin aluksi aikaan 15 ms, koska suurin osa simulaattorin tilatietoihin käytetyistä ohjattavista piireistä oli laukaisupiirejä, joiden mitattu toiminta-aika oli 11-17 ms.

Tämän jälkeen siirryttiin laitteen lopputesteihin. Lopputesteissä simulaattorista testattiin sen käyttötarkoituksenvaihtoehdot, toiminnallisuudet sekä tarkat toiminta-ajat. Testeihin ja niiden toteuttamiseen osallistui toimeksiantajan edustaja, joka myös osallistui työssä tehtävään loppuhaastatteluun. Loppuhaastattelussa käytettiin strukturoitua haastattelua, jonka teemana oli laitteen toimintojen toimivuus, tutkimuskysymykset ja jatkokehitysmahdollisuudet. Haastattelussa käytettiin apuna haastattelupohjaa (Ks. Liite 3).

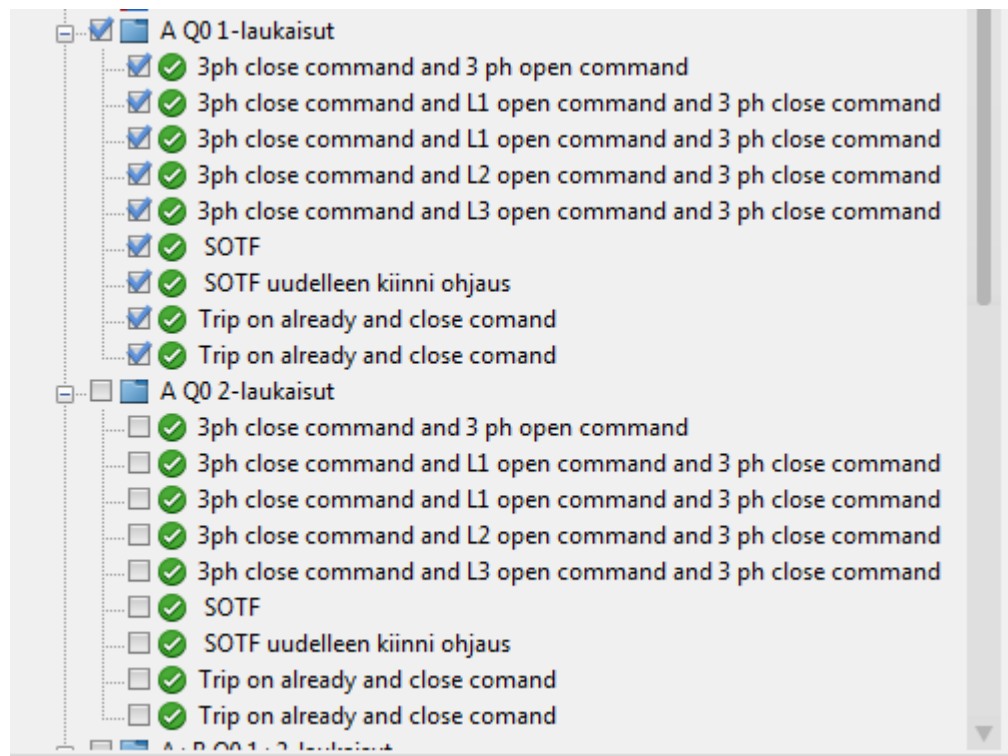
Toisessa testausvaiheessa laitteiden väliseen kommunikointiin tarvittavat kytkennät suoritettiin katkaisijasimulaattorin käyttöohjeella, jonka laatiminen kuului opinnäyte-työhön.

Suojareleen testaamisessa käytettiin Omicronin cmc 156-koestuslaitetta. Katkaisija-simulaattorin ja koestuslaitteen välisen kytkennän suoritti toimeksiantaja, koska ohjeella oli vaikutusta työn onnistumisen arviointiin liittyvissä tutkimuskysymyksissä. Kytkentöjen jälkeen alettiin suorittaa testejä.

Laitteelle tehtäviä testejä ohjattiin Omicronin Test Universe-ohjelmistolla, johon toimeksiantajan edustaja loi testaussekvenssit. Testauksessa oli katkaisijan kolmen koskettimen ohjaus samanaikaisesti, auki-ohjauksien testaaminen yksivaiheisesti, pump-pauksen eston toiminta ja vikaa vasten kytkentä. Samalla simulaattorin viivettä saatiin testattua.

Kaikki testit tehtiin ensin jokaiselle katkaisijan ohjauspiirille eriaikaisesti, eli kaksi kertaa molemmille katkaisijoille (Ks. Kuvio 16), jonka jälkeen sama testi ajettiin A- ja B-katkaisijalle samanaikaisesti.

Lopputestit tehtiin toimeksiantajan kanssa, koska toimeksiantaja samalla seurasi, toimiiko toteutettu laite vaatimusten mukaisesti. Minulla ei myöskään ollut aiempaa kokemusta testilaitteen käytöstä, minkä vuoksi toimeksiantaja samalla varmisti, että testit tehdään oikein. Testit myös haluttiin tehdä siinä laajuudessa, että lopputestien jälkeiset haastattelukysymykset saadaan ratkaistua.



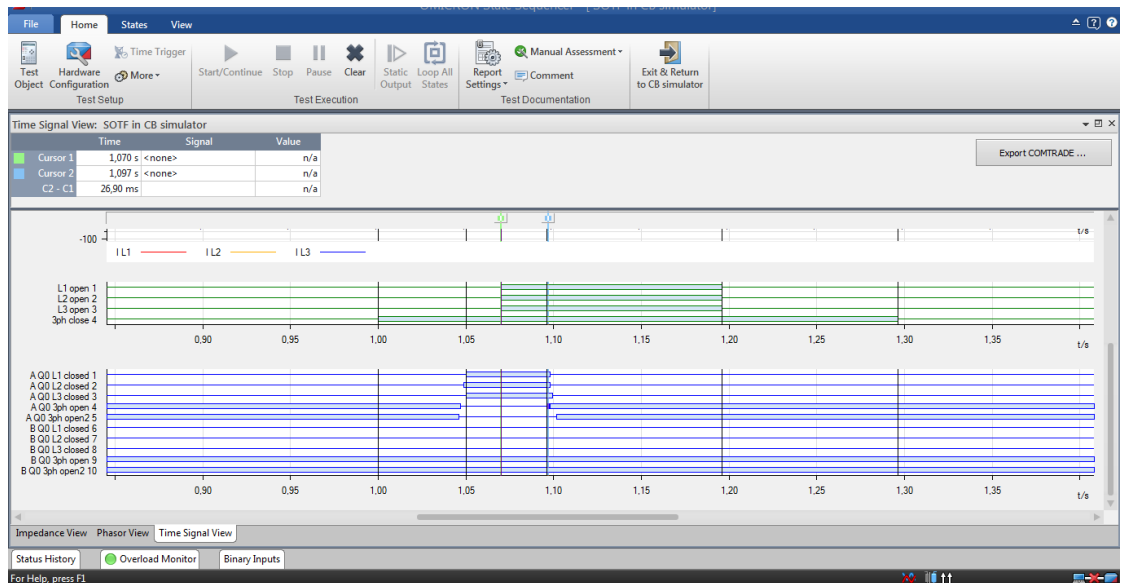
Kuvio 16 Simulaattorin testit tehtiin katkaisijan molemmille laukaisu-piireille.

## 5.6 Katkaisijan ohjaus

Katkaisijan koskettimen yksivaiheinen auki-ohjaus testattiin ohjaamalla katkaisija ensin kiinni, jonka jälkeen yhdelle vaiheelle annettiin auki-ohjaukäsäsky, jonka jälkeen katkaisija ohjattiin takaisin kiinni. Testaus tehtiin jokaiselle katkaisijan koskettimelle erikseen ja toistettiin myös katkaisijan toisella ohjauspiirillä. Laitteesta testattiin myös katkaisijan koskettimien avaaminen samanaikaisesti.

## 5.7 Pumppauksen esto

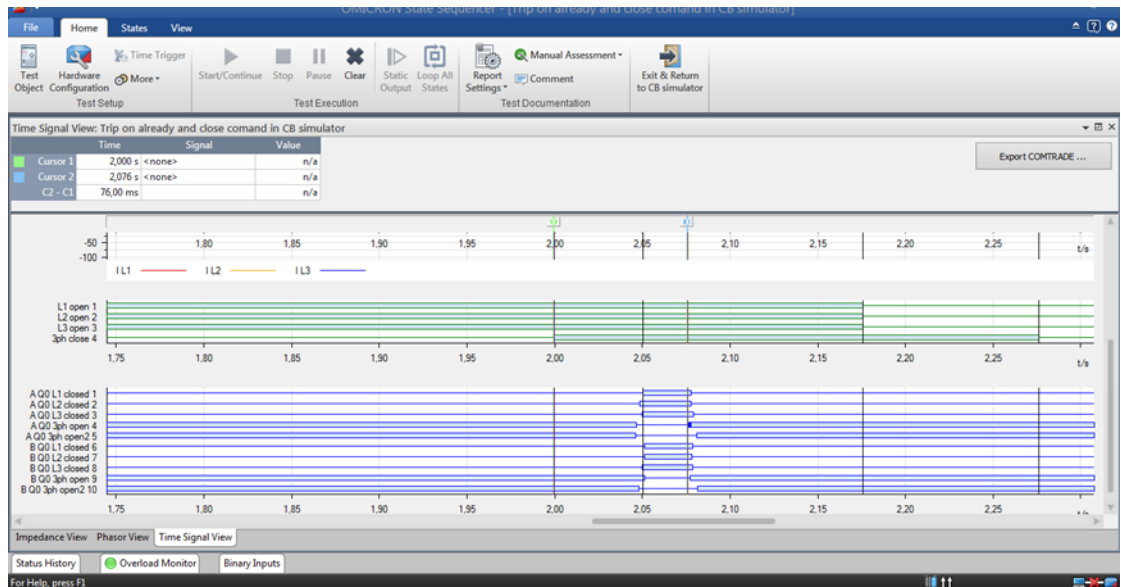
Pumppauksen esto testattiin ohjaamalla ensin pysyvä kolmivaiheinen kiinni-ohjaus, jonka jälkeen tehtiin auki-ohjaus jokaiselle katkaisijan kolmelle koskettimelle. Tämän jälkeen auki-ohjaukseen käytetty signaali lopetettiin, kun kiinni-ohjaus oli edelleen aktiivisena. Tällä pyrittiin siihen, että katkaisija ei ohjaudu kiinni silloin, kun auki-ohjauksiedot loppuvat ja kiinniohjaus on jäänyt tuntemattomasta syystä päälle (Ks. Kuvio 17).



Kuvio 17 Pumppauksen esto testattiin lopputesteissä.

## 5.8 Vikaa vasten kytkentä

Vikaa vasten kytkentä testattiin testattii siten, että simuloitavalle katkaisijalle annettiin pysyvä auki-ohjaus, jonka jälkeen annettiin kiinni-ohjaus. Testi on varsinaisesti kiinni-ohjaus vikatilanteen jo ollessa päällä. Samalla varmistettiin katkaisijan auki-ohjauksen viivettä vikaa vasten kytkennässä (SOTF). Vikaa vasten kytkennässä oleva katkaisija käy kiinni-tilassa, jonka jälkeen katkaisija aukeaa, vaikka kiinni-ohjaus olisikin vielä aktiivisena. Testissä varmistettiin, että simulaattoria voidaan ohjata kiinni myös vikatilanteessa ja että uudelleen auki-ohjaus luo noin 30 ms pituisen viiveen, joka vastaa katkaisijasta syntyvää ns. close+open-viivettä. (Ks. Kuvio 18). Oikeassa SOTF tilanteessa auki-ohjaukäskey tulee katkaisijalle vasta, kun piiri on ensin saatu onnistuneesti kiinni-ohjattua ja ja suojariele on havainnut vian.



Kuvio 18 Vikaa vasten kytkennässä katkaisija yritetään sulkea vikatilanteessa.

## 5.9 Toiminta-ajat

Katkaisijasimulaattorin toiminta-ajasta saatiin tietoa suoritettujen testien aikana. Testilaitte tallensi testisekvenssissä ilmenneet toiminta-ajat jokaisesta testistä. Testeissä myös ilmeni, että sisääntuloporttien viivettä pystytään muuttamaan vain 10 ms tarkkuudella. Suojareleen toiminta-aika näkyi viiveenä suojareleen ohjauksessa, jonka vuoksi toiminta-ajoista saatiin selville suojareleen viive auki- ja kiinni-ohjauksessa. Katkaisijasimulaattorin toiminta-ajan katsottiin olevan ohjauksen kokonaistoimintaan käytetty aika ohjauksenkäskyä ohjaustapahtumaan.

Lopputestien jälkeen tein vielä lisätestejä, jossa seurasin laitteen toiminta-aikaa tarkemmin erilaisilla sisääntuloporttien viiveillä. Toiminta-aikaa seuraamalla saatiin simulaattorin käyttöohjeeseen esimerkkinä toimivat aikamäärittelyt. Ensimmäisillä aikamäärittelyillä katkaisijasimulaattori toimii 30 ms:n viiveellä aukiohjaus-tilanteessa ja 50 ms:n viiveellä kiinniohjaus-tilanteessa. Toisella määrittelyllä katkaisijan toiminta oli 40 ms auki-ohjauksessa ja 110 ms kiinni-ohjauksessa. Toiminta-aikojen testausta suoritettiin kokeellisesti simulaattorin binääristen sisääntulojen ohjauksen viivettä muuttamalla. Viivettä pystyi muuttamaan 10 ms:n tarkkuudella, jolla päästiin riittä-

vän tarkkaan lopputulokseen. Tarkemmat muutokset olisivat vaatineet viiveen lisäämistä logiikkaohjelmaan. Samalla saatiin testattua, että katkaisijalle annetut vaatimukset 30 ms:n auki-ohjauksesta ja 50 ms:n kiinni-ohjauksesta ovat mahdollista toteuttaa valmiiksi selvitettyillä parametreilla.

Yleispäteväksi vähennykseksi toiminta-ajoille saatiin auki-ohjauksien binääriporteissa 20 ms ja kiinniohjauksilla 30 ms halutusta toiminta-ajasta. Vähennykset lisättiin katkaisijasimulaattorin käyttöohjeeseen kohtaan, jossa kerrotaan toiminta-aikojen määrittelystä.

## 6 Tulokset

### 6.1 Suojareleen valinta

Vertailussa toisena ollut Siemensin valmistama suojarele oli työn vaatimilta ominaisuuksiltaan laajempi. Suojareleen valinnassa kuitenkin päädyttiin Vamp 259-suojareleeseen, koska se oli riittävien ominaisuuksien lisäksi fyysisesti huomattavasti pienempi kuin toinen suojarele. Laitteen koko vaikutti suoraan kriteereinä olleeseen helppokäyttöisyyteen ja toivomuksiin, että suojarele olisi helposti kuljetettavissa.

Suojareleen valinnassa tehdyssä benchmarkingissa todettiin, että molemmilla laitteilla pystyttäisiin rakentamaan haluttu kaksikatkaisijajärjestelmää simuloiva katkaisija-simulaattori, joka täyttäisi esisuunnitteluvaiheessa rajatut minimivaatimukset. Tämä perustui siihen, että suojareleissä oli riittävästi binääritietoja ja toiminta-ajat olivat tarpeeksi pienet (Ks. Kuvio 19).

Toiminta-aikojen testauksessa todettiin, että molempien laitteiden toiminta-ajat olivat riittävät. Vamp 259-suojareleessä Sverker 750-testerillä mitattu toiminta-aika oli 6-12 ms ja Siemens 7SJ6355-suojareleessä 11-13 ms.

Binääritietoja vertaillen Vampin suojareleessä oli simulaattorin toteuttamiseen alkuperäisten suunnitelmien mukaan vielä 12 DI- ja 4 DO-porttia ylimääräisenä ja Siemensin suojareleessä oli 29 DI- ja 6 DO-porttia ylimääräisenä. Valittuun



laitteeseen jäi binääritietoja lisätoimintojen jälkeen varalle 6 binääristä sisääntuloa (DI) ja 3 binääristä ulostuloa (DO).

Relevertailu Ominaisuudet / minimivaatimukset	Minimi	Vamp 259 VAMP259-3C7AAM	Siemens 7SJ63 7SJ63-SAB32-3FAD/CC
8 IO porttia ohjaukseen	8	20kpl + 6kpl 48V laitteen omalla powerilla	37
8 DO porttia tilatietoihin	8	12	14
Varalle jäävät binääritiedot	-	12 DI + 4 DO	29DI + 6DO
Minimi toiminta-aika	alle 30ms	Mitattu 6-12ms	mitattu 11-13ms
Käyttöjännite	-	40-265 AC/DC	110-250DC, 115-230AC
Muuta	-	Vampin releitä on 2 täysin ylimääräisenä	Releitä on saatavilla
Muuta 2	-	Vampin rele on reilusti pienempi kooltaan	Rele on kooltaan isompi (19") ja siinä on irtomainen näyttö

Kuvio 19 Molemmat toimeksiantajan releistä täytti laitteen minimivaatimukset.

## 6.2 Simulaattorin lopputestaus

Katkaisijasimulaattorin lopputestaus tehtiin toimeksiantajan kanssa. Siinä tarkasteltiin suojareleen käyttötarkoituvaihtoehdot ja suojareleelle asetetut toiminnallisuudet. Suojareleen testauksella pyrittiin saamaan vastaukset tärkeimpiin tutkintakysymyksiin, jotka olivat: *"Saako suojareleestä rakennettua tarpeeseen sopivan ja helppokäyttöisen katkaisijasimulaattorin?"* ja *"Miten eri katkaisijajärjestelyiden mallinnus onnistuu katkaisijasimulaattorilla?"* Lopputestejä tehtiin kahdella eri toiminta-ajan asettelulla.

Laitteen toiminta-ajoissa ei ollut havaittavissa muutosta ohjattavien katkaisijoiden määrän muuttuessa. Simulaattorista aiheutuva toiminta-aikojen viive oli aukiohjaustilanteessa 16-23 ms ja kiinniohjauksessa 25-37 ms.

Simulaattorin yksivaiheiset ja kolmivaiheiset auki-ohjaustestit saatiin tehtyä molemmille katkaisijoille onnistuneesti. Tämä tarkoitti sitä, että suojarelettä voidaan käyttää sekä yksivaiheisesti ohjautuvien että kolmivaiheisesti ohjautuvien katkaisijoiden simuloimiseen. Kolmivaiheisessa ohjauksessa riittää, kun laitteen liityntärajapinnalta ketjutetaan katkaisijan auki-ohjaukset. Tämä tarkoitti myös sitä, että simulaattoria voidaan kaksoiskatkaisijakentän lisäksi käyttää muissakin katkaisijakenttäjärjestelmissä. Käyttökohteita on järjestelmät, joissa kiskoon liittyy yksi tai kaksi katkaisijaa, joiden koskettimia ohjataan yksi tai kolmivaiheisesti. Tällaisia muita kiskojärjestelmiä ovat esimerkiksi yksikisko-, kisko-apukisko- ja kaksoiskisko-järjestelmät. Myös

suojareleen muut toiminnot, eli pumppauksen esto ja vikaa vasten kytkentä saatiin testattua onnistuneesti.

Pumppauksen estoa testatessa katkaisija ei ohjautunut kiinni sen jälkeen, kun aukiohjaus-signaali loppui. Vikaa vasten kytkennässä simuloitavan katkaisijan koskettimet kävivät vikatilanteen ollessa päällä kiinni, jonka jälkeen koskettimet aukesivat. Vikaa vasten kytkennässä close+open-toiminta-ajaksi tuli 75,9 ms, joka koostui katkaisijan kiinniohjausajasta 50,4 ms ja koskettimien kiinnioloajasta 25,5 ms.

### 6.3 Haastattelujen tulokset

Haastatteluita oli laitteen suunnitteluvaiheessa sekä sen jälkeen, kun valmista laitetta oltiin testattu. Suunnitteluvaiheessa olevissa haastatteluissa rajattiin katkaisijasimulaattorin toiminnallisuutta sekä keskusteltiin laitteeseen halutuista ominaisuuksista ja katkaisijasimulaattorin tarpeen muodostumisesta.

Alussa tehdyissä haastatteluissa ilmeni, että hyviä laitteen ominaisuuksia olisi helposti säädeltävät toiminta-ajat ja pumppauksen esto. Lisäksi toivottiin, että laite olisi helppokäyttöinen ja helposti liikuteltava.

Yhtenä haastattelun teemoista oli katkaisijan ja suojareleen välinen kommunikointi. Haastattelussa ilmeni, että kantaverkossa katkaisijalle annetaan laukaisukäsky, vaikka katkaisijalla oleva SF6-kaasun paine on liian alhainen. Toimeksiantaja pyrkii aina katkaisemaan piirin, vaikka katkaisijalla olisikin voimassaolevia vikailmoituksia. Tämä tieto varmistettiin piirikaavioista. Haastattelusta saatu tieto vaikutti siihen, että toteutettuun simulaattoriin ei lähdetty lisäämään katkaisijalta tulevia vikatietoja.

Haastatteluista selvisi myös, että tarve simulaattorille johtuu verkkojen jatkuvasta kehittämisestä. Suurin tarve simulaattorille on silloin, kun testataan suojareleiden mallikonfiguraatioita, jota ei ole aiemmin vielä testattu.

Laitteen testausvaiheen jälkeen käydyssä loppuhaastattelussa noudatettiin haastattelupohjaa (Ks. Liite 3). Haastattelupohjan avulla pyrittiin ratkaisemaan

tutkimuskysymykset sekä toteuttaako laite toimeksiantajan työn alussa antamat vaatimukset. Tämän lisäksi haastattelussa kysyttiin parannusehdotuksia laitteen kehittämisen kannalta.

Haastattelun alussa selvitettiin toimeksiantajan mielipidettä laitteen ominaisuuksista. Laitteen toiminta-ajoista saatu palaute oli, että toiminta-ajat ovat säädeltävissä, mutta suojarahkeen mahdollisuudet säätelyyn eivät ole huipputarkat. Laitteen vakiona käytetyllä toiminta-ajalla (30 ms/50 ms) saadaan ajettua suurin osa testeistä, mutta vakiona käytettyä toiminta-aikaa joudutaan vaihtamaan, kun testataan normaalia hitaammin kiinni-ohjautuvia katkaisijoita tai muita poikkeustilanteita. Nykyisellä säätelytarkkuudella kuitenkin pystytään sellaiseen tulokseen, että toiminta-aikojen pienellä heittelyllä ei ole relesuojauksen testien kannalta vaikutusta.

Pumppauksen estosta ja kaksoiskatkaisijan simuloinnista tulokseksi saatiin, että laitteella pystytään simuloimaan kaksoiskatkaisijaa ja pumppauksen esto toimii halutusti. Lisäksi korostettiin että pumppauksen esto on perusedellytys, kun testataan jälleenkytkentöjä. Tämän lisäksi simulaattoria tarvitaan jälleenkytkentöjen lisäksi erityisesti, kun testataan suojauksen viestiyhteyden (SVY)-toimintoja ja vikaa vasten kytkentää (SOTF).

Seuraavaksi haastattelussa siirryttiin tutkintakysymyksiin. Toimeksiantajan mielipide laitteen helppokäyttöisyydestä oli, että olennaisinta on laitteeseen on saadut selkeät kytkentäkuvat, joiden avulla laite saadaan helposti käyttöön. Laite myös vastasi työnantajan tarvetta alussa toivotulle katkaisijasimulaattorille, koska se on laitteen käyttötarkoitukseen juuri sopiva. Laitteella tehtävä eri katkaisijajärjestelyiden mallinnus onnistuu järjestelmissä, joissa on kaksi tai yksi katkaisijaa ja joissa auki-ohjaus toteutetaan yksivaiheisesti tai kolmivaiheisesti.

Loppuhaastattelun vapaassa palautteessa mainittiin, että vaikka nykyinen laite on käyttötarkoitukselleen sopiva ja täyttää vaaditut ominaisuudet, niin voi olla, että tulevaisuudessa esiintyville vaativimmille poikkeustapauksille tarve olisi myös toiselle laitteelle, johon saadaan kaikki ohjaus- ja tilatiedot yksivaiheisena sekä kolmivaiheisena. Tämä kuitenkin lisää laitteelta vaadittuja ominaisuuksia

huomattavasti ja kasvattaa samalla laitteen kokoa ja vähentää laitteen helppoa liikuttelua.

## **7 Johtopäätökset ja pohdinta**

Työn toteuttamista ja lopputuloksia puntaroitiin haastatteluilla. Jälkeenpäin ajatellen haastattelut ovat edelleen oikea tapa ratkaista tutkimuksessa olleita kysymyksiä. Haastatteluiden kohteena oli laitteen tulevaisuuden käyttäjät. Mielestäni haastattelu tavoitti oikean kohderyhmän, vaikkakin haastateltavia oli määrältään vähän.

Haastatteluista saatava tieto oli laaja-alaista ja antoi osviittaa siitä, että sähköverkko ja sen ohjaaminen ovat aihealueeltaan melko laaja kokonaisuus. Tämän vuoksi työn raportointiosan tietoperustaan on pyritty tiivistämään vain oleelliset asiat ongelman ratkaisemiseen, minkä vuoksi monesta asiasta tekstissä raapaistaan vaan pientä osaa kokonaisuudesta.

Tietoperustan lähdemateriaalina on käytetty melko paljon muutamaa merkittävää sähköverkkoaiheista teosta, jotka käsittelevät teemaa laajasti. Tämän lisäksi muissakin lähdeaineistossa on pyritty luotettavuuteen käyttämällä sellaisia lähteitä, jota voidaan pitää luotettavana. Tällaisia lähteitä ovat esimerkiksi laitevalmistajan julkaisut ja manuaalit.

Katkaisijasimulaattoriin ohjelmoitavat toiminnot eli pumppauksen esto, toiminta-ajat ja katkaisijan ohjaukset on pyritty toteuttamaan työn teoreettisen tietoperustan mukaisesti. Tietoperustassa käytetyssä lähdemateriaalissa on pyritty useamman lähteen käyttöön, koska monilähteisyydellä pyritään parantamaan luotettavuutta.

Konkreetisen työn jälkeen tehty loppuhaastattelu perustui lopputesteihin, jossa laitetta testattiin alan ammattilaisen kanssa. Loppuhaastattelussa todettiin, että simulaattoriin ohjelmoidut ominaisuudet toimivat oikein.

Laitteen onnistunut lopputulos mielestäni vahvistaa sitä, että tietoperustasta saatu tieto on ollut luotettavaa. Näin ollen tarvittavien tietojen osalta tutkimuksen luotettavuustekijänä toimiva validiteetti käy mielestäni toteen, koska mielestäni työn ratkaisemiseen on tutkittu oikeita asioita. Mielestäni samoja tutkimuksessa saatuja suojarleen ominaisuuksien mittareita käyttämällä voitaisiin saman kaltaista katkaisijasimulaattoria tulevaisuudessa suunnitella myös eri valmistajan digitaalisella suojarleellä. Tutkimustuloksella on merkitystä esimerkiksi yrityksille, joilla on tarvetta katkaisijasimulaattorille.

Suojareleen toiminta-aikojen tutkinnassa mittauksia tehtiin useita, minkä avulla pyrittiin tutkimaan mittausten toistettavuutta. Toiminta-ajoissa oli millisekuntien heittoa, mutta missään vaiheessa tulokset eivät poikenneet huomattavasti toisistaan. Mittauksen toistettavuus todettiin melko stabiiliksi ja mittaustulokset vastasivat laitevalmistajan ilmoittamia arvoja. Mielestäni laitteen toiminta-ajan mittaamisessa on huomioitu mittauksen toistettavuustekijät tarpeeksi hyvin laitteen valinnassa sekä lopputestauksissa.

Releelle tehdyissä testeissä kävi ilmi, että erilaisten katkaisijajärjestelyiden mallinnus onnistuu samalla suojarleellä. Testit suoritettiin mielestäni oikein, koska testeissä ohjattiin molempia katkaisijoita eriaikaisesti, samanaikaisesti, yksivaiheisesti ja kolmivaiheisesti. Simulaattorin sopivuus muille järjestelyille oli mahdollista todeta, koska yksinkertaisemmissa kiskojärjestelmissä on vähemmän ohjattavia katkaisijan koskettimia, kuin kaksoiskatkaisijajärjestelmässä. Työn aikana tehtyä simulaattoria voidaan siis käyttää kaksoiskatkaisijakentän lisäksi esimerkiksi yksikisko-, kisko-apukisko- ja kaksoiskiskojärjestelmissä.

Toinen tutkimuskysymyksistä oli, saako suojarleestä sopivan ja helppokäyttöisen katkaisijasimulaattorin. Kysymyksen vastaus on riippuvainen käyttäjän mielipiteestä, jonka vuoksi kysymykseen ei mielestäni saada luotettavaa vastausta, ennen kuin laitetta testataan laajemmin ja suuremmalla käyttäjämäärällä.

Tutkimuksen jatkokehitykseksi ehdotan, että katkaisijasimulaattorista tehdään laajempi versio, jossa kaikki tilatiedot ja ohjaukset ovat toteutettu yksivaiheisena ja

kolmivaiheisena. Laajempaan simulaattoriin on myös syytä tutkia, olisiko IEC 61850-kommunikointiyhteyden lisäämisessä suuria etuja laitteelle.

## Lähteet

Advanced test equipment corp. n.d. Omicron cmc 156 testilaite. viitattu 20.11.2018  
<https://www.atecorp.com/products/omicron/cmc-156>

Azetek engineering. n.d Omicron cmc 156 laitemanuaali. viitattu 20.11.2018  
<http://www.azetek.com.sg/webdiskkenny/Technical%20Manuals/Test%20Equipments/Omicron%20CMC%20156/Technical%20Documents/CMC156.pdf>

Elovaara, J., Haarla, L., 2011a, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatiето

Elovaara, J., Haarla, L., 2011b, Sähköverkot II: verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatiето

Energiateollisuus n.d. Yleistietoa häiriöistä. Viitattu 20.11.2018  
[https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/sahkokatkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkokatkot)

Fingrid. n.d. Sähkön siirtovarmuus. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/sahkon-siirtovarmuus/>

Fingrid. n.d. Fingridin sähkönsiirtoverkko. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>

Fingrid. n.d. Käyttöhäiriöt. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/kayttohairiot/>

Fingrid. n.d. Suomen sähköjärjestelmä. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid. n.d. Sähkön Tasepalvelut. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/#mittausalueen-yllapitajan-tehtavat-ja-vastuut>

Fingrid. n.d. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017 – 2027. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2017-2027.pdf>

Fingrid. n.d. Sähköasemat. Viitattu 25.11.2018  
<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/sahkoasemat/>

Inductive Automation. n.d. What is HMI. Viitattu 25.11.2018.  
<https://inductiveautomation.com/what-is-hmi>

Itä-Suomen yliopisto. n.d. Benchmarking. Viitattu 20.10.2018.  
<http://www.uef.fi/benchmarking>

Jyväskylän yliopisto. 2015. Monimenetelmällisyys. Viitattu 20.11.2018  
<https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/monimenetelmaisyys>

Jyväskylän yliopisto. 2015. Haastattelut. Viitattu 20.11.2018.  
<https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineistonhankintamenetelmat/haastattelut>

Kajaanin ammattikorkeakoulu. n.d. Haastattelu. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.kamk.fi/fi/opari/Opinnaytetyopakki/Teoreettinen-materiaali/Tukimateriaali/Aineiston-keruumenetelmat/Haastattelu>

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas: Näin kirjoitan opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

KvantiMOTV 2008. Mittarin luotettavuus. KvantiMOTV - Kvantitatiivisten menetelmien tietovaranto. Viitattu 20.11.2018  
<https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/mittaaminen/luotettavuus.html>

Laaksonen, M. Saarinen, K. Sederlund, J. Sulamaa, P. Uusitalo, J. Uusitalo, M. Yli-Salomäki, P. 2011. Fingrid Kantaverkon käsikirja. Helsinki. Fingrid.

Megger. n.d. Sverker 750/780 laitemanuaali. Viitattu 20.11.2018.  
[https://www.perel.fi/files/hierarchy/73283014/sverker-750-780\\_ds\\_en\\_v06.pdf](https://www.perel.fi/files/hierarchy/73283014/sverker-750-780_ds_en_v06.pdf)

Ojavalli, P. 2011. Relekoestuksissa käytettävä kytkinlaitesimulaattori. Opinnäytetyö. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma.

Omicron. 2018. Testing solutions for protection and measurement systems.

Omicron. n.d. Test Universe. Viitattu 25.11.2018.  
<https://www.omicronenergy.com/en/products/test-universe/description/>

Pass. n.d. Megger SVERKER750 Multifunction Single Phase Relay Test Set. Viitattu 25.11.2018  
<https://www.testers.co.uk/megger-sverker750-relay-test-set>

Perel oy. n.d. Sverker 750/780 myyntisivu. Viitattu 20.11.2018  
<https://www.perel.fi/tuotteet/73283014/reletesteri-megger-sverker-750-780/1>

Powerpoint Engineering Ltd. n.d. Sverker 750 Myyntisivu. Viitattu 20.11.2018.  
<https://www.powerpoint-engineering.com/product/cd-12390/>

QL Laatu toiminta. n.d. Mitä on laatuajattelu?. Viitattu 12.11.2018.  
<https://www.ql.fi/missiomme/mita+on+laatuajattelu/>



Saaranen-Kauppinen, A., Puusniekka A., 2006a. Avoin haastattelu. KvaliMOTV - Menetelmäopetuksen tietovaranto. Tampere. Viitattu 20.11.2018  
[https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L6\\_3\\_1.html](https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L6_3_1.html)

Saaranen-Kauppinen, A., Puusniekka A., 2006b. Strukturoitu ja puolistrukturoitu haastattelu. KvaliMOTV - Menetelmäopetuksen tietovaranto. Tampere. Viitattu 20.11.2018  
[https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L6\\_3\\_3.html](https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L6_3_3.html)

Saaranen-Kauppinen, A., Puusniekka A., 2006c. Validiteetti. KvaliMOTV - Menetelmäopetuksen tietovaranto. Tampere. Viitattu 20.11.2018  
[https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L3\\_3\\_1.html](https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L3_3_1.html)

Sesko ry. 2015. SFS-Käsikirja 601. 2. p. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Siemens. n.d Suurjännitetuotteet. Viitattu 25.11.2019  
[www.siemens.fi/fi/energy/sahkon\\_siirto/suurjannitetuotteet.htm](http://www.siemens.fi/fi/energy/sahkon_siirto/suurjannitetuotteet.htm)

Siemens. n.d High Voltage Direct Current Transmission Viitattu 5.12.2018  
[https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC\\_Proven\\_Technology.pdf](https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf)

Siemens. 2001. Function Description of Control System for Circuit-Breaker 3AP1-FI

Siemens n.d High-voltage circuit-breakers 3AP1 technical data.

Siemens. n.d Disconnecting circuit breakers. Viitattu 20.11.2018  
<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/high-voltage/hv-switchgear/circuit-breakers/disconnecting-circuit-breaker.html>

Siemens. n.d Digi 4 engineering software. Viitattu 27.11.2018.  
<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/engineering-software-digi-4.html>

Siemens. n.d Siprotec 4 7SJ63 Multifunction Protection Relay. Viitattu 27.11.2018.  
[https://w5.siemens.com/web/ua/ru/em/Automation,\\_control\\_and\\_protection/Relay\\_Protection/Current\\_protection/Documents/file\\_30\\_1.pdf](https://w5.siemens.com/web/ua/ru/em/Automation,_control_and_protection/Relay_Protection/Current_protection/Documents/file_30_1.pdf)

Siemens. n.d Siprotec 7SJ63. Viitattu 27.11.2018  
<https://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/overcurrent-feeder-protection/pages/7sj63.aspx>

Schneider electric. n.d. Vampset käyttöohje. Viitattu 11.11.2018.  
[https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=VVAMPSET\\_FI\\_M\\_B006.pdf&p\\_Doc\\_Ref=VVAMPSET\\_FI\\_M\\_B006](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=VVAMPSET_FI_M_B006.pdf&p_Doc_Ref=VVAMPSET_FI_M_B006)

Schneider electric. n.d. Vamp 200 -sarja. Viitattu 10.11.2018.

<https://www.schneider-electric.fi/fi/product-range-presentation/62048-vamp-200-%E2%80%93sarja/#tabs-top>

Scheider electric. n.d. Vamp - Ohjelmistot. Viitattu 20.11.2018.

[https://www.se.com/fi/fi/product-range/62050-vamp---ohjelmistot/?subNodeId=189049426fi\\_FI](https://www.se.com/fi/fi/product-range/62050-vamp---ohjelmistot/?subNodeId=189049426fi_FI)

Tilastokeskus. n.d. Reliabiliteetti. Viitattu 20.11.2018.

<https://www.stat.fi/meta/kas/reliabiliteetti.html>

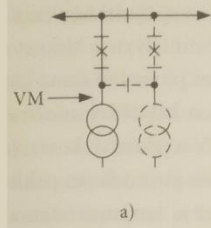
Vanninen, T. 2018. Fingridin relesuojaukoulutus: suojausviat. Helsinki. Fingrid.

Vamp. 2011. Vamp 259 ohjekirja. VAMP259.EN007

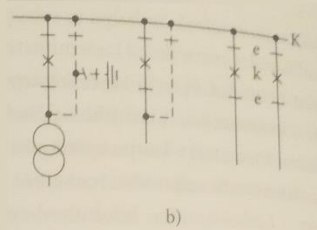
Viinikainen, T. 2018. Relesuojauksen erikoisasantuntija. Fingrid. Haastattelu 2.12.2018.

## Liitteet

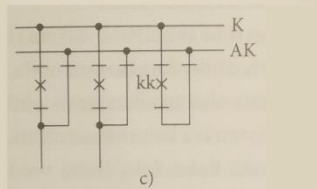
Liite 1. Yleisimmät kiskojärjestelmät (Laaksonen ym. 2011, 404, muokattu)



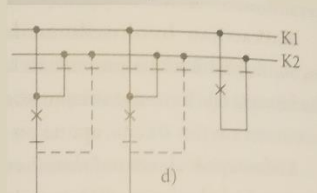
**Kiskoton järjestelmä**



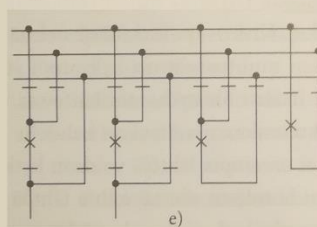
**Yksikiskojärjestelmä**



**Kisko-apukiskojärjestelmä**



**Kaksoiskiskojärjestelmä**



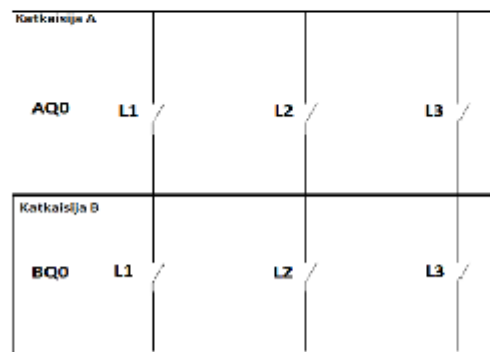
**Kaksoiskisko-apukiskojärjestelmä**

## Liite 2. Katkaisijasimulaattorin käyttöohje ja dokumentit

## Katkaisijasimulaattori Vamp 259 käyttöohje

Rele on jaettu kahteen katkaisijaan, katkaisijoihin A ja B. Katkaisijoita voidaan ohjata yksivaiheisesti auki tai kolmivaiheisesti kiinni.

Yksittäisen katkaisijan koskettimet on numeroitu luvuilla 1-6



	1-loukaisukelet						2-loukaisukelet					
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	A-4	A-5	A-6	B-4	B-5	B-6
Kytentärinä	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	A-4	A-5	A-6	B-4	B-5	B-6
Comin/Ohjtaus	X5/X06	X5/X06	X5/X06	X5/X06	X5/X06	X5/X06	X15	X15	X15	X15	X15	X15
1-V aukiohjtaus	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X10	X17	X18	X19	X20	X21
3-V kiinniohjtaus	X13	X13	X13	X14	X14	X14	-	-	-	-	-	-
1-V Kiinnitieto +	X39-X44	X39-X44	X39-X44	X39-X44	X39-X44	X39-X44	-	-	-	-	-	-
1-V Kiinnitieto	X45	X46	X47	X48	X49	X50	-	-	-	-	-	-
3-V aukitieto +	X31	X31	X31	X33	X33	X33	X35	X35	X35	X37	X37	X37
3-V aukitieto	X32	X32	X32	X34	X34	X34	X36	X36	X36	X38	X38	X38
Binaarihähdöt	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	A-4	A-5	A-6	B-4	B-5	B-6
1-V aukiohjtaus	DI7	DI8	DI9	DI10	DI11	DI12	DI13	DI14	DI15	DI16	DI17	DI18
3-V kiinniohjtaus	DI21	DI21	DI21	DI22	DI22	DI22	-	-	-	-	-	-
1-V Kiinnitieto	T3	T4	T5	T6	T7	T8	-	-	-	-	-	-
3-V aukitieto	A1	A1	A1	A2	A2	A2	T1	T1	T1	T2	T2	T2

## Sisääntulot:

Releen sisääntuloportteihin (DI) ohjataan simulaattoriin tulevat ohjauskäskyt koestettavalta releeltä.

Sisääntuloportteja 1-vaiheiselle aukiohjaukselle on 2\*6 kpl (DI7-12 ja DI13-18.) jotka ovat eri ohjauskorteissa ja voidaan sen takia kytkeä eri jännitelähteestä. Aukiohjaukset saadaan kolmivaiheiseksi ketjuttamalla katkaisijan koskettimien ohjaukset (DI7-9 tai/ja DI13-15) ja B (DI10-12 tai/ja DI16-18)

3-Vaiheisia kiinniohjauksia on 2kpl. (DI21 ja DI22.) Yksi molemmille katkaisijalle. Kiinniohjauksien nolla on oletuksena ketjutettu samaan piiriin, kuin 1-vaiheisen aukiohjauksen portit DI7-12. Ketjutus on tehty kytkentärimalla ja sen voi tarpeen vaatiessa poistaa.

Varalla olevia sisääntuloja releellä on 3\*2kpl. (DI23-28)

## Liite 3. Laitteen lopputestien jälkeinen haastattelu

1

**1 Haastattelupohja**

Täyttääkö rele toimeksiantajan vaatimukset:

Säädeltävät toiminta-ajat

Pumppauksen esto

Kaksoiskatkaisijan simulointi

Tutkintakysymykset:

Onko katkaisijasimulaattori tarpeeseen sopiva ja helppokäyttöinen?

Miten eri katkaisijajärjestelyiden mallinnus onnistuu samalla releellä?

Vapaa palaute:

Onko simuloinnin toiminnoissa jotain paranneltavaa