



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Santtu Asikainen

# KAAPELIPÄÄTESUOJA

Suojafunktion kehittäminen maasulun havaitsemiseen  
kaapelipäätteessä

Tekniikka  
2023

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Santtu Asikainen
Opinnäytetyön nimi	Kaapelipäätesuoja
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Mikko Västi

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää ABB Distribution Solutions-yksikölle suojafunktiota, joka havaitsee kaapelipääteen maasulut siten, että suojausalue on rajattu vaihevirtamuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan välille. Alueen ulkopuolisissa vioissa suojaus ei saa toimia. Funktio toteutettiin käyttäen C-ohjelmointikieltä ja testattiin Matlabiin ohjelmoidun testipenkin avulla.

Työn teoriaosuudessa pyritään avaamaan lukijalle, mikä on kaapelipääte ja mitä tapahtuu maasulkuilmiössä sekä miksi tällaiselle funktiolle on tarvetta. Teoriaosuudessa käydään myös läpi erilaisia ABB:n suojaraitteita ja niiden ominaisuuksia.

Työssä tutustuttiin maasulkusuojauksen toimintaperiaatteisiin, jonka pohjalta suunniteltiin vaatimusmäärittelyt kaapelipääteen maasulkusuojaukseen. Työn tuloksena luotiin suojafunktiota, joka havaitsee maasulun kaapelipääteessä ja sen toimintaa vakavoitiin erilaisin lisäehdoin.

## ABSTRACT

Author	Santtu Asikainen
Title	Cable End Protection
Year	2023
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Mikko Västi

---

The purpose of this thesis was to develop a protection function for the ABB Distribution Solutions division, so that the protection zone is formed between the phase current and the core-balance current transformer. Faults outside of the protection zone should not cause any operation.

The theoretical part of the thesis goes through what cable end is and what happens in the earth-fault phenomenon, as well as why there is a need for such a function. The theory part also covers different ABB protection relays and their characteristics.

In this thesis the principles of the earth-fault protection were studied based on which the requirement specifications for the earth-fault protection of the cable end were designed. The protection function was implemented using the C-programmin language and tested using a test bench programmed in MATLAB.

The outcome of this thesis project is a protection function, that detects an earth-fault in the cable end and its operation was made more stable with additional conditions.

---

Keywords	Earth-fault, cable end, protection relay and protection function
----------	--

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	8
2	MAASULKU KAAPELIPÄÄTTEESSÄ.....	10
	2.1 Kaapelipääte .....	10
	2.2 Maasulku.....	13
	2.3 Funktion tarve.....	14
3	ABB SUOJARELEET .....	17
	3.1 ABB 615-, 620-suojareleet .....	17
	3.2 ABB REX640-suojarele .....	18
	3.3 ABB SSC600 .....	19
4	FUNKTION VAATIMUSMÄÄRITTELY.....	21
	4.1 Kaapelipäätesuoja.....	22
	4.2 Vaatimukset funktiolle .....	23
	4.3 Funktion toiminnallisuus.....	24
	4.3.1 Erovirran tarkistus.....	24
	4.3.2 Nollajännitteen tarkistus.....	27
	4.3.3 Ajastin.....	27
	4.3.4 Toiminnan lukituslogiikka .....	28
	4.4 Funktion asettelut.....	28
5	SUOJAUSFUNKTION KEHITTÄMINEN.....	30
	5.1 Kehitysympäristö .....	30
	5.1.1 Matlab .....	30
	5.1.2 Microsoft Visual Studio .....	31
	5.2 Funktion toteutus .....	31
6	FUNKTION TESTAUS.....	33
	6.1 Matlab-testaus.....	33

6.2	Algoritmin toiminnan todentaminen.....	34
6.2.1	Erovirran laskennan testaus.....	35
6.2.2	Nollajännite-ehdon testaus.....	36
6.2.3	START- ja OPERATE-lähtöjen testaus .....	38
6.2.4	BLOCK-lukitustulon testaus.....	38
6.2.5	Vakavointivirran testaus .....	43
6.2.6	Läpimenevän vian tunnistuksen testaus.....	43
6.2.7	Virtamuuntajan kytkentätyypin asettelun testaus .....	45
7	FUNKTION JATKOKEHITYS .....	47
8	YHTEENVETO .....	48
	LÄHTEET .....	49

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Frontec kaapelipääte .	10
<b>Kuva 2.</b> Kaapelipäätteiden kytkennät .	12
<b>Kuva 3.</b> Kaapelipäätteet ja nollavirran mittaamiseen käytetty kaapelivirtamuuntaja.	13
<b>Kuva 4.</b> Maasulkuvikojen vikatyypit .	14
<b>Kuva 5.</b> Suojausalueet.	15
<b>Kuva 6.</b> ABB 615-suojarele .	17
<b>Kuva 7.</b> ABB REX640 .	18
<b>Kuva 8.</b> ABB SSC600 .	20
<b>Kuva 9.</b> Funktion symboli.	22
<b>Kuva 10.</b> Toiminnallinen moduulikaavio.	24
<b>Kuva 11.</b> Vakavoidun maasulkusuojauksen toimintakarakteristika.	26
<b>Kuva 12.</b> Matlab-testipenkin vuokaavio.	34
<b>Kuva 13.</b> Erovirran laskennan testisyötteet.	36
<b>Kuva 14.</b> Nollajännite-ehdon-testauksen lähdöt.	37
<b>Kuva 15.</b> Ensimmäisen "Freeze timer"-testin BLOCK-tulo.	39
<b>Kuva 16.</b> Ensimmäisen "Freeze timer"-testin lähdöt.	39
<b>Kuva 17.</b> Toisen "Freeze timer"-testin lähdöt.	40
<b>Kuva 18.</b> "Block All"-testin BLOCK-tulo.	41
<b>Kuva 19.</b> "Block All"-testin lähdöt.	41
<b>Kuva 20.</b> "Block operate"-testin BLOCK-tulo.	42
<b>Kuva 21.</b> "Block operate"-testin lähdöt.	42
<b>Kuva 22.</b> Läpimenevän vian tunnistuksen kolmannen testin testisyöte.	44
<b>Kuva 23.</b> Läpimenevän vian tunnistuksen kolmannen testin lähdöt.	45

<b>Taulukko 1.</b> Vaatimusmäärittelyt.....	23
<b>Taulukko 2.</b> Asettelut.....	29
<b>Taulukko 3.</b> Testit vaatimuksien mukaisesti.....	35

## 1 JOHDANTO

Suojareleet ovat tärkeä osa sähköjärjestelmiä, sillä ne havaitsevat erilaiset vikatilanteet sähköverkossa ja laukaisevat katkaisijan tarvittaessa. Tämä suojaa laitteita, järjestelmiä, ihmisiä ja eläimiä vaurioilta, joita voivat aiheuttaa ylijännite, ylivirta tai muut sähköhäiriöt.

Kaapelipääteessä tapahtuu maasulku, kun vaihejohtimen ja maan välinen jänniteero ylittää tietyn rajan. Maasulku tapahtuu tyypillisesti silloin, kun kaapeli on vaurioitunut tai kaapelipääte on virheellisesti rakennettu, jolloin kentäntihentymästä johtuen pääsee syntymään läpilyönti. Se voi tapahtua normaalijännitteillä tai jonkin ylijännitetilanteen yhteydessä. Kaapelipäätteet ovat luontainen muutoskohta kaapelin eristysrakenteissa, joten niissä tyypillisesti voi esiintyä vikoja. Perinteiset maasulkusuojausfunktiot, joiden mittaukset perustuvat kaapelivirtamuuntajaan, eivät havaitse kaapelipääteessä tapahtuvia maasulkuja, joten on tarve muodostaa suojausfunktiot näiden vikatilanteiden varalta.

Tässä työssä on tarkoituksena suunnitella ja toteuttaa suojafunktio, joka havaitsee maasulut kaapelipääteessä. Työssä tehdään vaatimusmäärittely suojafunktion toiminnallisuudelle, jonka pohjalta voidaan testata ja todeta funktion oikeanlainen toiminnallisuus hyödyntäen MATLAB nimistä laskentaohjelmistoa ja sinne ohjelmoitua testipenkkiä. Itse funktion toteutus tapahtuu C-ohjelmointikielellä.

Opinnäytetyö tehdään teknologiateollisuuden yritykselle ABB Oy, joka on perustettu vuonna 1988, kun sveitsiläinen BBC yhdistyi jo aiemmin yhdistyneisiin suomalaisen Strömberg Oy ja ruotsalaisen ASEA AB yhtiöihin. ABB on erikoistunut sähkö- ja automaatiotekniikkaan. ABB työllistää maailmalla noin 105 000 henkilöä,



joista Suomessa noin 5000. Distribution Solutions -liiketoimintalinja keskittyy tuottamaan sähkönjakeluverkkoihin suojarkeitä ja lisäksi ohjaus-, automaatio- ja valvontalaitteita. Vaasassa suojarkeitä on valmistettu jo noin 50 vuoden ajan.<sup>1,2</sup>

---

<sup>1</sup> ABB Suomessa. ABB Oy. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa> Viitattu 15.2.2023

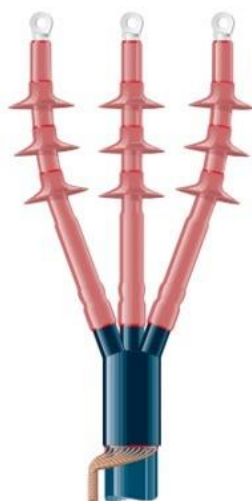
<sup>2</sup> ABB Oy, Distribution Solutions. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoimintat/distribution-solutions> Viitattu 15.2.2023

## 2 MAASULKU KAAPELIPÄÄTTEESSÄ

Tässä luvussa kerrotaan teoriaa kaapelipäätteestä sekä maasulusta. Lisäksi käydään läpi, miksi tarvitaan kaapelipäätteen maasulut havaitseva suoja-funktio.

### 2.1 Kaapelipääte

Kaapelipääte (**Kuva 1.**) on keskijännitekaapelin osa, jossa kolmivaiheinen kaapeli jaetaan kolmeen vaihejohtimeen ja päättyy tiettyyn pisteeseen tai paikkaan, kuten kojeistoon, muuntajaan tai moottoriin. Näitä käytetään paikoissa, missä tarvitaan paljon sähkötehoa, kuten teollisuuslaitoksissa ja sähkönjakelujärjestelmissä.



**Kuva 1.** Frontec kaapelipääte <sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>TechBaniya. Frontec cable outdoor termination kit. <https://techbaniya.com/33kv-termination-kits/10532-frontec-300-sqmmx3c-xlpe-u-g-ht-cable-outdoor-termination-kit.html> Viitattu 6.3.2023

Kaapelin päät täytyy suunnitella niin, että ne kestävät suurta sähköistä rasitusta, sekä erilaisia ympäristötekijöitä, kuten lämpötilan vaihteluita, kosteutta ja myös mekaanista rasitusta. Kaapelikengät on valmistettu korkean johtavuuden materiaaleista, kuten kuparista tai alumiinista. Kaapelikenkiä käytetään kaapelin pään liittämiseen sähkölaitteeseen tai liittimeen. Kaapelipääteissä olevia jännityskartioita käytetään sähköisen jännityksen jakamiseen tasaisesti kaapelin eristeeseen. Tämä auttaa kaapelin rikkoutumisen estämisessä, sekä parantaa kaapelin suorituskykyä.<sup>4</sup>

Kaapelipääteissä käytetään tyypillisesti eristemateriaalina silloitettua polymeeriä, kuten eteenipropreenikumia tai silikonikumia, mikä antaa hyvän sähköeristyksen ja suojan. Lisäksi kaapelipääteissä voidaan käyttää ulompia suojakerroksia, kuten lämpökutistuvaa letkua tai kylmäkutistuvaa materiaalia, jotka antavat lisäsuojaa kaapelille.

---

<sup>4</sup> Compaq. 2020. What are cable terminations.<http://www.compaqinternational.com/what-are-cable-terminations.php> Viitattu 6.3.2023

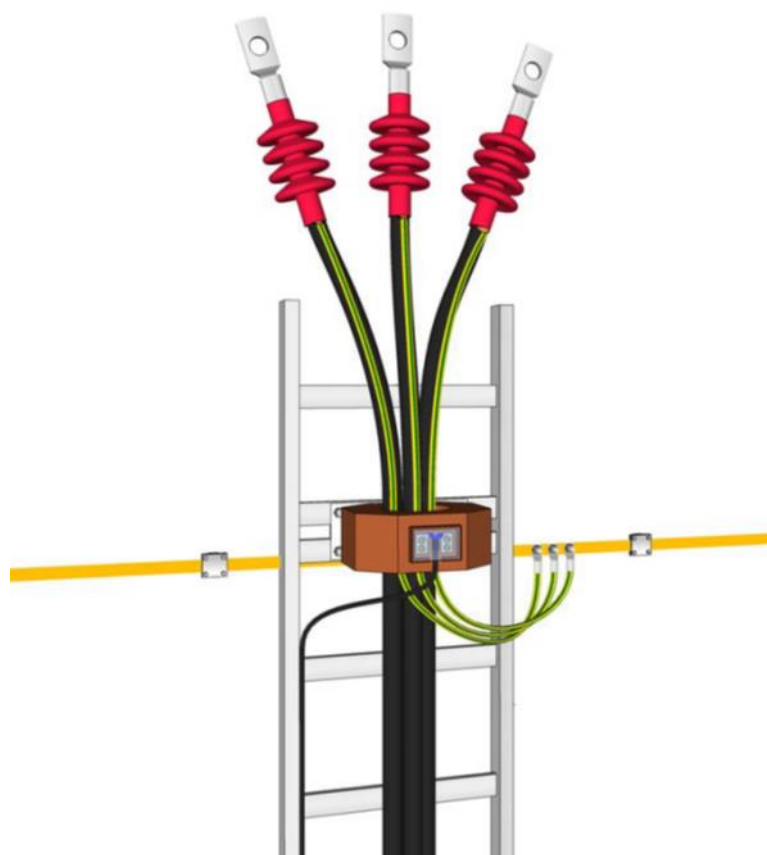


**Kuva 2.** Kaapelipäätteiden kytkennät <sup>5</sup>.

Kaapelipäätteen asentamisessa ja huoltamisessa on tärkeää noudattaa valmistajan suosittelemia menettelyjä sekä oikeanlaisia turvallisuusstandardeja. Tämä varmistaa oikeanlaisen toimivuuden kaapelijärjestelmässä ja lisää turvallisuutta, luotettavuutta sekä suorituskykyä. Kuvassa 2 oranssinväriset kaapelit ovat työmaadoituskaapeleita. Kuvasta 3 nähdään nollavirran mittaamiseen käytetty kaapelivirtamuuntaja.

---

<sup>5</sup> Dekra Industrial Oy, Prysmian Finland Oy 2018 Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökero- ja osittaispurkausmittauksilla, Loppuraportti Viitattu 6.3.2023



**Kuva 3.** Kaapelipäätteet ja nollavirran mittaamiseen käytetty kaapelivirtamuuntaja<sup>6</sup>.

## 2.2 Maasulku

Sähkövikaa, kun johtimessa virtaava virta poikkeaa suunnitellulta reitiltä ja virtaa maahan, kutsutaan maasulkuksi. Tämä vikatilanne voi tapahtua silloin, kun johtimen eristeessä on katkos tai vika, minkä takia virta on kosketuksissa maahan.<sup>7</sup>

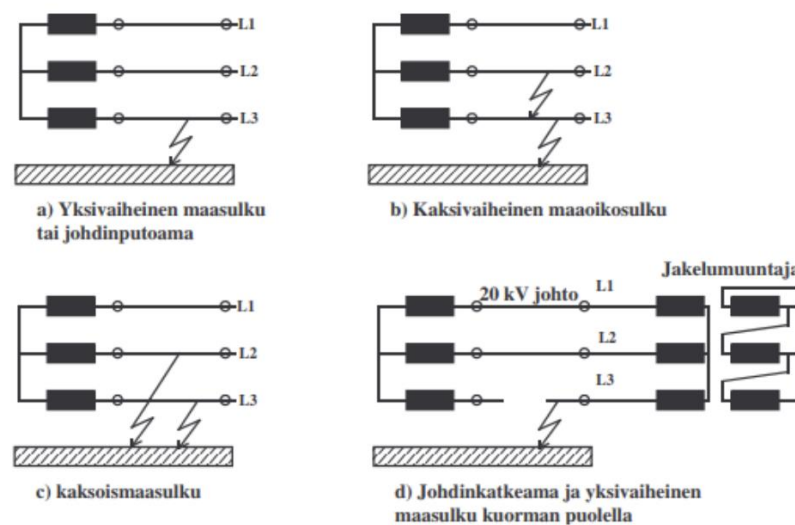
---

<sup>6</sup> Lehesvuo, V. ABB Oy. 2023 Johtolähdön suojaus – koulutusmateriaali Viitattu 6.3.2023

<sup>7</sup>Electrical-Technology. 2022. Earth-fault. <https://www.electrical-technology.com/2022/10/earth-fault.html> Viitattu 6.3.2023

Sähkövirran vuotaessa maahan, aiheutuu sähköiskun vaara sekä mahdollisia laitteiden vaurioitumisia.

Keskijänniteverkoissa yleisin vika on maasulku, joka kattaa noin 60...70 % kaikista keskijänniteverkkojen vioista. Maasulkuviat voidaan luokitella neljään eri tyyppiin: yksivaiheinen maasulku, kaksoismaasulku, kaksivaiheinen maaosulku ja johdonkatkeaman aiheuttama yksivaiheinen maasulku kuorman puolella.<sup>8</sup> Kuvassa 4 esitellään neljä eri vikatyppiä.



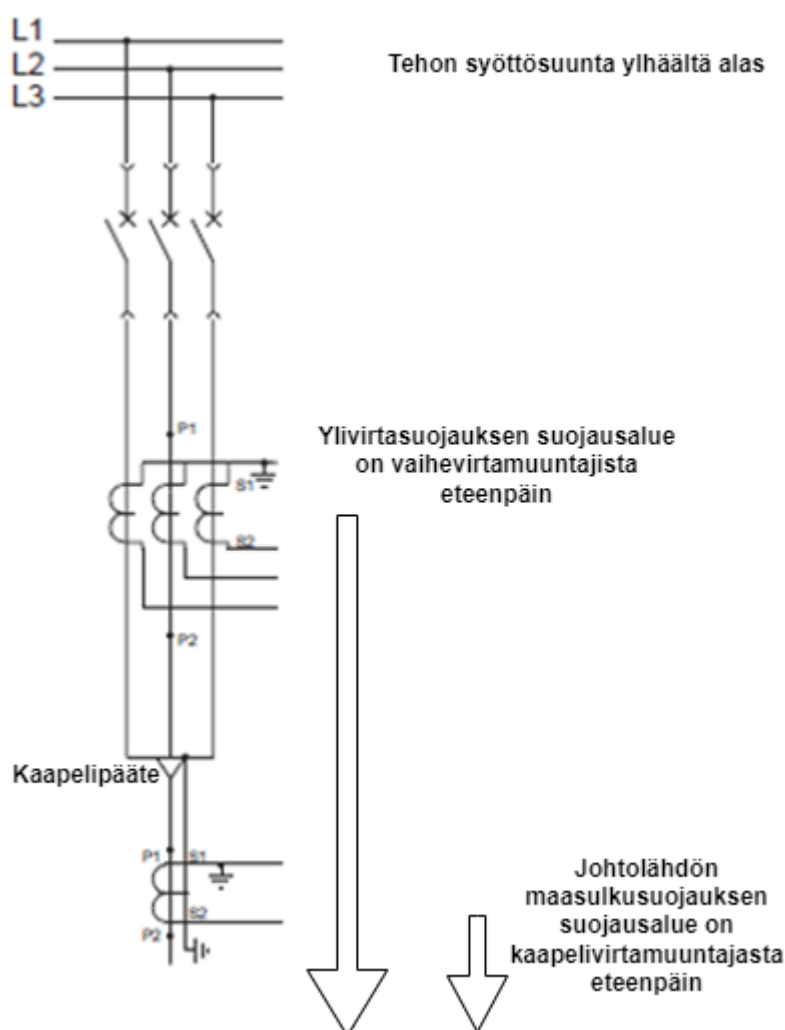
**Kuva 4.** Maasulkuvikojen vikatyypit <sup>8</sup>.

### 2.3 Funktion tarve

Johtolähdön maasulkusuojaus toteutetaan mittaamalla vaihevirtojen summaa tai mittaamalla nollavirtaa kaapelivirtamuuntajalla. Tässä työssä tarkastellaan aino-

<sup>8</sup> Harbi, D. 2017 Monitaajuusadmittanssipohjaisen maasulkusuojan toisiokoestus, Insinöörityö Viitattu 6.3.2023

astaan jälkimmäistä tapausta. Kaapelivirtamuuntajaa käytettäessä maasulkusuojauksen suojausalue on tehon syöttösuunnasta katsottuna kaapelivirtamuuntajasta eteenpäin eli kaapelipääte ei kuulu tähän maasulkusuojaukseen. Jos kaapelipääteeseen tulee vika, niin tätä maasulkusuojaus ei havaitse. Kuvassa 5 havainnollistetaan suojausalueet ja kaapelipäätteen sijainti.



**Kuva 5.** Suojausalueet.

Kuvasta 5 voidaan huomata, että johtolähdön maasulkusuojauksen suojausalue ei voi havaita kaapelipääteessä olevaa vikaa, sillä suojausalue alkaa vasta kaapelipääteen jälkeen kaapelivirtamuuntajasta.

Ylivirtasuojan suojausalue on vaihevirtamuuntajista eteenpäin eli kaapelipääte kuuluu tämän suojausalueeseen. Mikäli kaapelipääteeseen tulee oikosulku, niin normaali ylivirtasuojaus hoitaa sen.

ABB:llä ei ole kaapelipääteen suojaukseen omaa funktiota, joten tällaiselle funktiolle on tarvetta asiakkaiden puolelta.



### 3 ABB SUOJARELEET

Tässä luvussa tutustutaan yleisimpiin ABB:n suojarleihin sekä käydään läpi niiden toiminnallisuuksien eroja.

#### 3.1 ABB 615-, 620-suojareleet

Kuvassa 6 on esitetty ABB:n 615-suojarele.



**Kuva 6.** ABB 615-suojarele <sup>9</sup>.

ABB:n 615- ja 620-sarjan suojarleet ovat suunniteltu voimalaitosten, jakeluverkkojen sähköasemien ja teollisuudessa olevien sähkövoimajärjestelmien suojaamiseen, ohjaamiseen, mittaamiseen ja valvontaan. Tämän sarjan releet ovat suunniteltu IEC61850-standardin mukaisesti ja tukevat useita viestintäprotokollia, kuten IEC 61850 Edition 2, IEC 61850-9-2 LE, IEEE 1588 V2, Modbus, DNP3 ja IEC 60870-5-103.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>ABB Oy. Feeder protection and control REF615 IEC. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec> Viitattu 27.3.2023

Nämä releet tarjoavat suunnatun ja suuntaamattoman ylivirta- ja maasulkusuojauksen sekä termisen ylikuormituksen suojauksen. Tämän lisäksi rele tarjoaa useita muita suojauksia, kuten herkän maasulkusuojauksen, transienttimittaukseen perustuvan tarkan maasulkusuojan. Osana avojohtoverkon suojausta, releessä on monipuolinen jälleenkytkentäautomatiikka.<sup>10</sup>

615- ja 620-sarjan suojarleet eroavat toisistaan siten, että 620-sarjan releessä on tuloja sekä lähtöjä enemmän, kuin 615-sarjan releessä. Toiminnallisuudet releissä ovat samanlaiset.

### 3.2 ABB REX640-suojarele

Kuvassa 7 on esitetty ABB:n REX640-suojarele.



**Kuva 7.** ABB REX640<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup>ABB Oy. Syöttö- ja lähtökentän suojaus- ja ohjausrele REF615. Ostajan opas. [https://library.e.abb.com/public/f5dcf411ba594a388a7b8cc315ac01d3/REF615\\_pg\\_758316\\_Fla.pdf?x-sign=Bw6E64UfUQvQYid7CzRJte2/DUIXYkAvv2xnDcQauKCKmp3D7sOIoO8NtFFdDBU2](https://library.e.abb.com/public/f5dcf411ba594a388a7b8cc315ac01d3/REF615_pg_758316_Fla.pdf?x-sign=Bw6E64UfUQvQYid7CzRJte2/DUIXYkAvv2xnDcQauKCKmp3D7sOIoO8NtFFdDBU2) Viitattu 27.3.2023

<sup>11</sup>ABB Oy. Protection and control REX640. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/protection-and-control-rex640> Viitattu 27.3.2023

Uudempaa sukupolvea oleva ABB REX640 -suojarele on helppokäyttöinen ja sopii kaikkiin sovelluksiin voimantuotannossa, sähkönjakelussa ja teollisuudessa. REX640 -releen toiminnallisuuksia on helppoa päivittää sen modulaarisuuden ja helposti saatavilla olevien ohjelmisto- ja laitteistopäivitysten ansiosta.

REX640 tukee 615-sarjan viestintäprotokollien lisäksi, IEC 61850 Edition 2.1 ja tietoturvallisuutta parantavaa IEC 60870-5-104 sekä tietoliikenteen suojausta IEC 62351 -standardin mukaisesti.

REX640 -releessä on mahdollista testata suojaus- ja ohjausjärjestelmiä simuloituilla GOOSE-viesteillä. Rele asetetaan tilaan, jossa sallitaan simuloitujen GOOSE-viestien lähtö, niin sen jälkeen rele hyväksyy ainoastaan testauslaitteesta lähetetyt GOOSE-viestit ja jättää huomioimatta muista releistä saapuvia viestejä.<sup>12</sup>

### **3.3 ABB SSC600**

Kuvassa 8 on esitetty ABB:n SSC600.

---

<sup>12</sup>ABB Oy. Product news. 2020. <https://new.abb.com/news/fi/detail/58483/rex640-suojatermi-naalin-uudella-versiolla-parannettua-toiminnallisuutta-seka-turvallisempaa-tiedonsiirtoa-sahkon-tuotanto-ja-sahkonjakelusovelluksiin> Viitattu 27.3.2023



**Kuva 8.** ABB SSC600 <sup>13</sup>.

ABB:n SSC600 on uudempaa sukupolvea oleva älykäs keskitetty ohjaus- ja suojausratkaisu sähköjakelujärjestelmille ja se on suunniteltu erityisesti digitaalisille sähköasemille ja niiden tarpeille, mutta soveltuu myös perinteisille sähköasemille.

SSC600-suojausratkaisussa on keskitettynä kaikki suojaus- ja ohjaustoiminnot samaan laitteeseen, mikä helpottaa järjestelmän päivittämistä, kun muutoksia tarvitsee tehdä vain yhteen laitteeseen. Yhdistämällä SSC600 liitäntäyksiköihin, saadaan IEC61850 -yhteensopiva keskitetty suojaus- ja ohjausratkaisu.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup>ABB Oy. Smart substation control and protection SSC600. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/ssc600> Viitattu 27.3.2023

<sup>14</sup>ABB Oy. Product news. 2020. <https://new.abb.com/news/fi/detail/60017/keskitetyn-suojauksen-laite-ssc600-mahdollistaa-suojausratkaisujen-toteuttamisen-uudella-tavalla-jakeluverkon-sahkoasemilla> Viitattu 27.3.2023

## 4 FUNKTION VAATIMUSMÄÄRITTELY

Tässä luvussa esitellään funktion toiminnallisuutta ja määritellään funktion vaatimukset eli miten funktion tulee toimia.

Koska funktio on tarkoitettu edellisessä luvussa esitetyille releille, määrittelee releissä käytetyt toteutustavat pitkälti niin virtojen mittaustarkkuudet, kuin suoja-funktioiden toiminta-aikojen tarkkuudet ja siksi tarkkuusvaatimukset rajataan tämän työn ulkopuolelle.

Funktiossa tulee olla tietyt tulot ja lähdöt, joiden toiminnallisuus määritellään relekohtaisesti.

Periaatteessa kaapelipäänteen maasulku voidaan helposti tunnistaa siitä, ovatko vaihevirtamuuntajien summavirta ja kaapelivirtamuuntajien summavirta yhtä suuret ja saman suuntaiset. Tämä ei kuitenkaan riitä, vaan joudutaan huomioimaan, että virtamuuntajien mahdollisen kyllästymisen aiheuttamat mittausvirheet eivät saisi aikaan virheellistä toimintaa.

Virtamuuntajan kyllästymisellä tarkoitetaan ilmiötä, missä mitattava ensiövirta saa aikaan virtamuuntajan magneettisen sydämen kyllästymisen. Tämä voi johtua joko mitatun ensiövirran suuruudesta, virrassa esiintyvistä tasakomponentista, virtamuuntajan rautasydämen remanenssista tai näiden yhteisvaikutuksesta. Virtamuuntajan kyllästyessä toisiovirta ei enää vastaa ensiövirtaa, vaan vääristyy. Toisiovirran perustaajuisessa komponentissa tämä näkyy sekä amplitudin pienentymisenä, että ensiö- ja toisiovirtojen välisenä kulmavirheenä.<sup>15</sup>

---

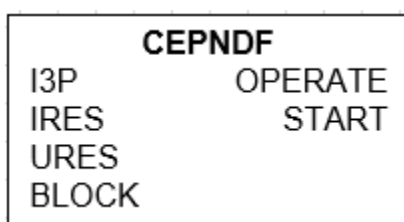
<sup>15</sup> Lehesvuo, V. ABB Oy. Kommentti opinnäytetyöstä. Viitattu 20.4.2023

#### 4.1 Kaapelipäätesuoja

Kaapelipäätesuojan toiminnan tulee perustua numeerisesti stabiloituun vaihevirroista lasketun ja kaapelivirtamuuntajalla mitatun nollavirtojen perustaajusten komponenttien erovirtaan. Tässä virtojen perustaajuisia komponentteja käytetään laskemaan vaihevirtojen summa, mitattu nollavirta kaapelivirtamuuntajalla ja erovirrat sekä vaihevirrat. Toiminta vakavoidsaan vaihevirroista lasketulla vakavointivirralla. Nollajännitteen perustaajuisia komponentteja käytetään valinnaisena lisäehtona.

Kaapelipäätesuojan funktiossa on kuvassa 9 esitetyn mukaisesti neljä sisääntuloa ja kaksi lähtöä. Sisääntuloista saadaan mitattua kolmivaihevirrat (I3P), nollavirta (IRES) sekä nollajännite (URES). Releen systeemiohjelmisto huolehtii mitattujen virtojen ja jännitteiden perustaajusten arvojen laskennasta, eli tätä laskentaa ei tarvitse tehdä itse funktiossa.

BLOCK-tulolla funktion toiminta voidaan lukita. Releen yleisellä asettelulla ”Blocking mode”, määritellään miten BLOCK-tulo vaikuttaa. Tähän tarkka selostus löytyy releen teknisestä ohjelehdessä.



**Kuva 9.** Funktion symboli.

START aktivoidaan, kun funktio havahtuu, eli havaitsee suojausalueella maasulun (suojausalue on virtamuuntajien ja kaapelivirtamuuntajien välinen alue eli siis käytännössä kaapelipääte).

OPERATE aktivoidaan, kun funktio laukaisee asetellun ajan kuluttua.

## 4.2 Vaatimukset funktiolle

Taulukossa 1 on esitetty funktion vaatimukset. Taulukossa käydään läpi vikatilanteet, milloin suoja saa laukaista ja milloin ei, sekä vaatimukset, mitä funktiossa täytyy olla.

Funktion toiminnallisuus suunnitellaan tämän taulukon vaatimuksien mukaisesti.

**Taulukko 1.** Vaatimusmäärittelyt.

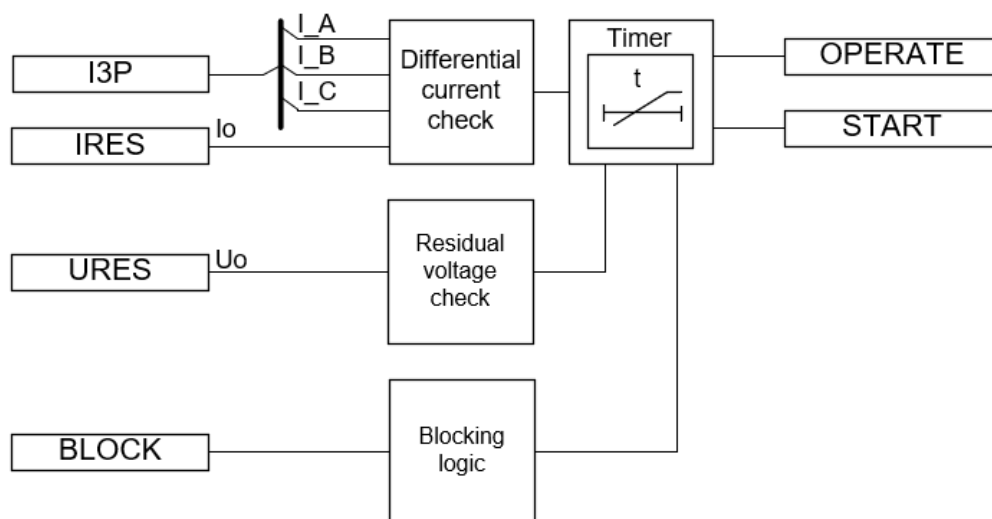
<b>1.</b>	<b>Ei saa laukaista (vikatilanteet suojausalueen ulkopuolella)</b>
1.1	Maasulku johtolähdöllä
1.2	Maasulku taustaverkossa
1.3	Kaksoismaasulku johtolähdöllä ja virtamuuntaja kyllästyy
1.4	Oikosulku johtolähdöllä ja virtamuuntajan kyllästyminen
<b>2.</b>	<b>Pitää laukaista (vikatilanteet kaapelipääteessä)</b>
2.1	Maasulku kaapelipääteessä
2.2	Kaksoismaasulku kaapelipääteessä ja virtamuuntajien kyllästyminen
<b>3.</b>	<b>Funktiossa pitää olla</b>
3.1	Havahtumislähtö START
3.2	Laukaisulähtö OPERATE
3.3	Lukitustulo BLOCK
3.4	Vakioaikainen asetettava laukaisuaika
3.5	Virtamuuntajien summavirran ja kaapelivirtamuuntajan virtojen eroon perustuva vian tunnistus
3.5.1	Toiminta vakavoitu vakavointivirran avulla
3.5.2	Toiminta vakavoitu läpimenevän vian tunnistuksella
3.5.3	Nollajännitteeseen asetettava perustuva laukaisulupa/esto
3.5.4	Asettelu virtamuuntajan liitäntätyypille, millä vaihevirtamuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan välinen polariteetti voidaan valita

Kohdissa 1 ja 2 on esitetty vaatimukset sähköverkon ilmiöiden kautta. Näiden perusteella on määritetty kohdassa 3 esitetyt vaatimukset funktion toimintaperiaatteelle.

Tämän taulukon avulla voidaan testaus osuudessa käydä kohta kohdalta läpi, että vaatimukset toteutuvat ja funktio toimii oikein.

### 4.3 Funktion toiminnallisuus

Kuvassa 10 on esitetty kaapelipäätesuojan toiminnallinen moduulikaavio, mistä voidaan huomata sisääntulot ja mihin moduuliin ne ovat kytketty. Seuraavissa kapaleissa esitellään jokaisen moduulin toiminta, minkä jälkeen lukijalla on parempi käsitys funktion toiminnallisuudesta.



Kuva 10. Toiminnallinen moduulikaavio.

#### 4.3.1 Erovirran tarkistus

Kuvasta 10 katsottuna ylimmän moduulin ”Differential current check” eli erovirran tarkistuksen toiminta perustuu vaihevirroista lasketun nollavirran ja kaapelivirtamuuntajalla mitatun nollavirran väliseen eroon.

Erovirta lasketaan vaihevirtojen perustaajusten komponenttien summan ( $\Sigma I = I_A + I_B + I_C$ ), ja kaapelivirtamuuntajalla mitatun nollavirran ( $I_o$ ) vektorisuureiden erotuksena lausekkeen 1 mukaisesti.



$$ID = |\overline{\Sigma I} - \overline{I_o}| \quad (1)$$

Missä

$\Sigma I$  = Vaihevirtojen summa eli laskettu nollavirta,

$I_o$  = Kaapelivirtamuuntajalla mitattu nollavirta.

Erovirtaa syntyy maasulun ollessa suojatulla alueella eli vaihevirtamuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan välillä.

Funktiossa olevalla "Start value"-asettelulla määritellään funktion erovirran havahtumisarvo.

Pois lukien virtamuuntajien kyllästymisen aiheuttamat mittausvirheet, erovirran mittaus varmistaa, että suoja toimii vain suojausalueen sisäisissä vioissa, mutta ei ulkoisissa.

Virtamuuntajien mahdollinen kyllästyminen suojausalueen ulkopuolisissa vioissa, sekä kytkentävirtasysäyksissä saa funktion näkemään näennäistä erovirtaa. Tämän vuoksi funktion toiminta pitää vakavoida.

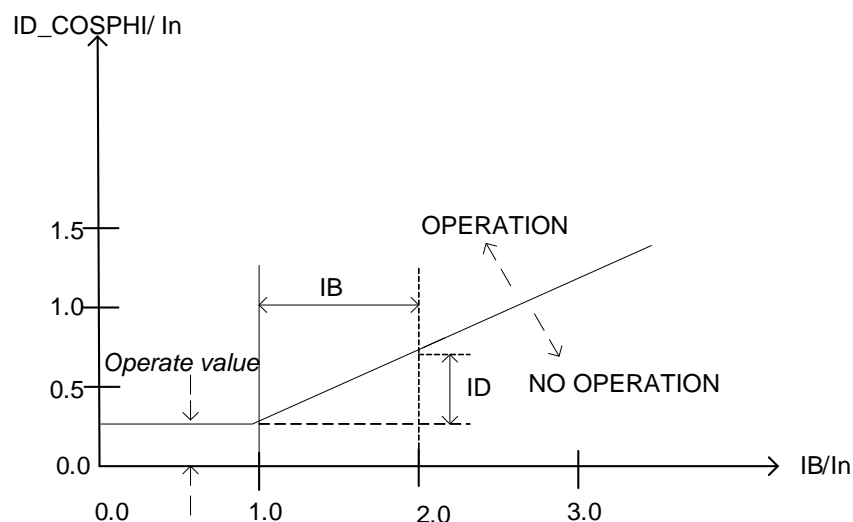
Ensimmäinen vakavointimenetelmä on kasvattaa havahtumiseen vaadittavaa vikavirran arvoa suurilla virroilla, lähinnä suojausalueen ulkopuolisissa vioissa. Tätä varten funktion pitää laskea vakavointivirta.

Vakavointivirta  $IB$  lasketaan vaihevirtojen perustaajujen komponenttien keskiarvosta lausekkeen 2 mukaisesti.

$$IB = \frac{|\overline{I_A}| + |\overline{I_B}| + |\overline{I_C}|}{3} \quad (2)$$

Havahtumiseen vaadittava erovirran arvo on vakio vakavointivirran arvoilla  $0.0 < IB/I_n < 1.0$ , missä  $I_n$  on vaihevirtamuuntajan nimellisvirta.

Kuvassa 11 on esitetty vakavoidun maasulkusuojauksen toimintakarakteristika.



**Kuva 11.** Vakavoidun maasulkusuojaus toimintakarakteristika<sup>16</sup>.

Kuvasta 11 huomataan, että vakavointivirran ollessa suurempi kuin 1.0, havahtumiseen vaadittavan erovirran suuruus nousee vakavointivirran kasvaessa. Käyrän kaltevuus on 50 %.

Toinen vakavointitapa, ja edellistä täydentävä on läpimenevän vian tunnistus suojausalueen ulkopuolisissa vioissa. Toiminta perustuu siihen, että vian alussa funktion pitää nähdä vakavointivirran nousevan yli aseteltavan ”*Stability limit*”-arvon, niin että samanaikaisesti erovirta ei ylitä havahtumiskynnystä. Kun läpimenevä

<sup>16</sup> ABB Oy. 2020. REX640 Technical Manual Viitattu 22.3.2023

vika on näin tunnistettu, estetään laukaisu, kunnes vakavointivirta laskee alle ”*Stability limit*”-asettelun. Tämän toiminnan ansiosta virtamuuntajien kyllästyminen ei saa aikaan virhetoimintaa, kunhan kyllästyminen ei tapahdu liian nopeasti. Sallittu kyllästyminennopeus tulee varmentaa todellisella funktiolla myöhemmin ja siksi on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Lähin vertailukohta on linjaerovirtasuojaus LNPLDEF, missä kyllästyminen sallitaan 5 millisekuntia vian alusta.

Vakavoinnilla ja läpimenevän vian tunnistuksella siis epäherkistetään suojan toimintaa tilanteissa, missä virtamuuntajat voivat kyllästyä aiheuttaen virhettä laskennalliseen nollavirtaan.

Kun kaikki vaihevirran ehdot ovat täyttyneet, lähetetään ”enable”-signaali ajastinmoduulille.

#### **4.3.2 Nollajännitteen tarkistus**

Kolmas tapa vakavoida toiminta on käyttää nollajännitteen lukitusta, silloin kun nollajännitemittaus on saatavilla.

Moduulia ”Residual voltage check” eli nollajännitteen tarkistus, voidaan käyttää valinnaisesti lisäehtona maasulun havaitsemiseen. Tämä kriteeri voidaan aktivoida asettamalla ”*Enable voltage limit*”-arvoon ”TRUE”. Näin suoja havahtuu vain, jos nollajännite ylittää asetetun arvon ”*Voltage start value*”.

#### **4.3.3 Ajastin**

Ajastin eli ”Timer”-moduulin aktivoituttua, se aktivoi START-lähdön. Ajastin aktivoituu vain, kun se saa ”enable”-signaalin sekä erovirran tarkistuksesta, että nollajännitteen tarkistuksesta. Kun toiminnan ajastin saavuttaa asetetun arvon ”*Operate delay time*”, OPERATE-lähtö aktivoituu. Mikäli vika häviää ennen moduulin toimintaa, aktivoituu ajastimen nollaus. Kun ajastimen nollaus saavuttaa asetetun arvon ”*Reset delay time*”, ajastimen nollaus resetoidaan ja START-lähtö kytketään pois päältä.

#### 4.3.4 Toiminnan lukituslogiikka

Toiminnan estologiikka eli "Blocking logic"-moduulissa on kolme toiminnallisuutta, joita ohjataan BLOCK-tulolla sekä releen yleisellä asettelulla "Blocking mode", millä määritellään, miten lukitus toimii.

Ensimmäinen lukitustoiminnallisuus on "Freeze timers", missä toiminnan ajastin jäädytetään vallitsevaan arvoon, jolloin suojaus ei pääse laukaisemaan. Ajan laskeenta jatkuu jäädytetystä arvosta lukituksen poistuessa, mikäli funktio edelleen näkee vian suojausalueella.

Toinen lukitustoiminnallisuus "Block All" lukitsee koko funktion ja nolaa ajastimet.

Kolmannessa lukitustoiminnallisuudessa "Block Operate", funktio toimii normaalisti, mutta OPERATE-lähtö ei aktivoidu.

BLOCK-tuloa on mahdollista ohjata kolmella eri tavalla: binääritulolla, kommunikatiotulolla sekä sisäisellä signaalilla, mikä löytyy suojarелеen ohjelmistosta.<sup>17</sup>

#### 4.4 Funktion asettelut

Taulukossa 2 esitellään funktion asettelut, mistä nähdään arvojen alue, yksikkö, askeleen suuruus sekä oletusarvo. Taulukossa "In" on vaihevirtamuuntajien nimellisvirta ja "Un" on nollajännitemittauksen nimellisarvo.

---

<sup>17</sup> ABB Oy. 2020. REX640 Technical Manual Viitattu 22.3.2023

**Taulukko 2.** Asettelut.

Parametri	Arvot	Yksikkö	Askel	Oletusarvo
<i>Start value</i>	5.0...50.0	%In	1.0	5.0
<i>Voltage start value</i>	0.010...1.000	xUn	0.001	0.010
Operate delay time	40...300000	ms	1	40
Enable voltage limit	0=False 1=True			1=True
Operation	1=on 5=off			1=on
CT connection type	1=Type 1 2=Type 2			2=Type 2
Reset delay time	0...60000	ms		20
Stability limit	1.0...5.0	xIn		1.5

## 5 SUOJAUSFUNKTION KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa kerrotaan, mitä kehitysympäristöön kuuluu ja tutustutaan hieman Matlabiin sekä Microsoftin Visual Studio-ohjelmistoon.

### 5.1 Kehitysympäristö

AFL (Application Function Library) -kehitys tapahtuu pääosin käyttäen ohjelmointiympäristöä, minkä suositellaan olevan Microsoft Visual Studio 2019 sekä Matlabin R2020b versiota. Funktioiden C-ohjelmointi siis tapahtuu Visual Studiossa ja funktiota testataan Matlabissa koodatun testipenkin ja referenssikoodin avulla.

#### 5.1.1 Matlab

Matlab on lyhenne sanoista ”matrix laboratory” ja se on tietokoneohjelmisto interaktiiviseen vektori- ja matriisilaskentaan sekä ohjelmointikieli. Matlabia käyttävät esimerkiksi insinöörit, tutkijat ja matemaatikot tietojen analysointiin, visualisointiin ja algoritmien kehittämiseen.

Matlabilla on laaja valikoima työkaluja ja toimintoja monimutkaisten matemaattisten ongelmien ratkaisemiseen. Matlabin syntaksi on suunniteltu niin, että se on helposti opittava ja siten suosittu ohjelmointikieli aloittelijoille.

Matlabia ylläpitää The MathWorks niminen yhtiö, joka on perustettu vuonna 1984.<sup>18,19</sup>

---

<sup>18</sup> Apiola, A & Laine, M. Lyhyt MATLAB-opas. <http://math.aalto.fi/~apiola/matlab/opas/lyhyt/> Viitattu 29.3.2023

<sup>19</sup> The Mathworks. MATLAB. <https://se.mathworks.com/products/matlab.html> Viitattu 29.3.2023

### 5.1.2 Microsoft Visual Studio

Visual Studio on Microsoftin luoma ohjelmointiympäristö, joka on paljon käytetty erilaisten applikaatioiden ohjelmoinnissa ja se tukee lähes kaikkia ohjelmointikieliä. Visual Studiolla on laaja valikoima työkaluja, kuten koodieditorit, virheenkorjaustyökalut, testaustyökalut ja projektinhallintatyökalut.

Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista Visual Studiolla on sen virheenkorjaustyökalut, joiden avulla kehittäjän on mahdollista tunnistaa ja korjata koodissa olevat virheet. Visual Studio tarjoaa laajan joukon virheenkorjausvaihtoehtoja, kuten keskeytyskohdat, kelloikkunat, kutsuntapinot ja sisäänrakennetut suorituskyvyn ja muistin profilointityökalut.

Visual Studio esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1997. Sen tarkoitus oli korvata Microsoftin aikaisempi kehitysympäristö Microsoft Developer Network. Tämän jälkeen Visual Studio on saanut useita päivityksiä ja sen uusin versio on Visual Studio 2022.<sup>20</sup>

## 5.2 Funktion toteutus

Funktion toteutuksessa pyritään luomaan toteutus C-ohjelmointikielellä, mikä vastaa mahdollisimman tarkasti "speksiä" eli vaatimusmäärittelyä. Tässä pystyttiin hyödyntämään ABB:n olemassa olevaa maasulkusuojausfunktioita muokkaamalla, poistamalla ja lisäämällä toiminnallisuuksia.

---

<sup>20</sup> Microsoft. Visual Studio. <https://visualstudio.microsoft.com/vs/> Viitattu 29.3.2023

Funktiossa lasketaan erovirrat vaatimusmäärittelyjen mukaisesti vaihevirroista lasketun nollavirran ja kaapelivirtamuuntajalla mitatun nollavirran erotuksesta.

Vakavointivirran toteutus on yksinkertaisesti vaihevirtojen keskiarvo.

Toiminnan vakavointi vakavointivirralla toteutettiin siten, että vakavointivirran ollessa suurempi kuin 1.0, asettelu "*Start value*" kasvaa kuvan 11 mukaisesti (ID/IB) suhteen 50 % kaltevuudella.

Toinen toiminnan vakavointitapa on nollajännitteen tarkistus, minkä toteutuksessa luetaan nollajännitteen arvo, sitten tarkistetaan, onko nollajännitteen tarkistus laitettu päälle. Mikäli tarkistus on päällä ja funktio havaitsee nollajännitettä, lähetetään "*enable*"-signaali ajastimelle.

Lisäksi funktioon toteutettiin kolmas vakavointitapa, läpimenevän vian tunnistusraja, eli asetetaan "*Stability limit*"-parametriin arvo ja tätä asettelua vertaillaan vakavointivirtaan. Vakavointivirran ollessa yli tämän rajan, funktio ei laukaise havaitessa erovirtaa ja vakavointivirran ollessa alle "*Stability limit*"-rajan, funktio laukaisee normaalisti havaitessa erovirtaa.

Näiden toiminnallisuuksien toimivuus testataan luvussa 6, käyttäen Matlab-laskentaohjelmistoa ja sinne ohjelmoitua testipenkkiä.



## 6 FUNKTION TESTAUS

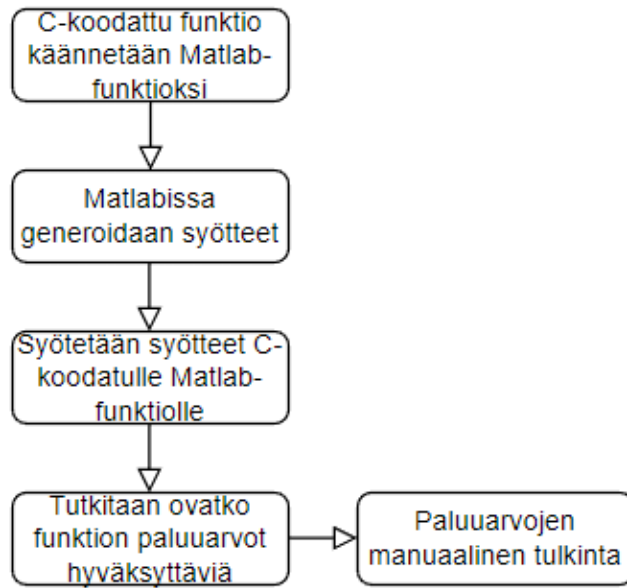
Tässä luvussa todennetaan funktion toimivuus testaamalla sitä erilaisissa vikatilanteissa ja varmistetaan, että Taulukon 1 vaatimusmäärittelyt täyttyvät.

### 6.1 Matlab-testaus

Matlabissa pystytään testaamaan funktioiden toimivuutta simuloimalla vikatilanteita. Tässä työssä funktiolle tehtiin testipenkki, mikä sisältää testitapauksia. On myös mahdollista ohjelmoida testipenkkiin ”referenssikoodi”, mikä on toteutettu Matlabin ohjelmointikielellä ja vastaa toiminnallisuudeltaan C-kielellä ohjelmoitua toteutusta. Jos käytettäisiin referenssifunktiota hyödyksi, sille syötettäisiin samat syötteet, kuin C-koodatulle Matlab- funktiolle ja täten pystytään vertaamaan vastaavatko referenssikoodin ja C-koodin erosignaalit toisiaan. Erosignaalin ollessa nolla, molemmat funktiot toimivat samoin ja täten oikein.

Tässä työssä ei kuitenkaan aikataulun niukkuuden takia ohjelmoitu referenssikoodia, vaan käännettiin C-funktio käyttäen ”MEX file” nimistä funktiota, millä pystytään kutsua C-funktiota Matlabista. Generoidaan Matlabissa syötteet funktiolle ja syötetään ne C-koodatulle Matlab-funktiolle. Tämän jälkeen voidaan eri testitapauksissa tutkia paluuarvoja tulostaen ne graafeina ja todennetaan niiden avulla funktion toimivuus.

Kuvassa 12 on esitetty Matlab-testipenkin vuokaavio.



**Kuva 12.** Matlab-testipenkin vuokaavio.

## 6.2 Algoritmin toiminnan todentaminen

Taulukossa 3 on esitetty vaatimukset ja siihen liittyvät testit sekä mistä kappaleesta löytyvät testin läpikäynti ja tulos.

Testitapauksissa käytetään Taulukon 2 mukaisia asetteluarvoja ellei toisin kerrota.

**Taulukko 3.** Testit vaatimuksien mukaisesti.

Vaatus	Testi	Kappale
1.1 Maasulku johtolähdöllä	Erovirran laskennan testaus	6.2.1
1.2 Maasulku taustaverkossa		
1.3 Kaksoismaasulku johtolähdöllä ja virtamuuntaja kyllästyy	Vakavointivirran testaus	6.2.5
1.4 Oikosulku johtolähdöllä ja virtamuuntajan kyllästyminen	Läpimenevän vian tunnistuksen testaus	6.2.6
2.1 Maasulku kaapelipääteessä	Erovirran laskennan testaus	6.2.1
2.2 Kaksoismaasulku kaapelipääteessä ja virtamuuntajien kyllästyminen	Erovirran laskennan testaus	6.2.1
3.1 Havahtumislähtö START	START ja OPERATE lähtöjen testaus	6.2.3
3.2 Laukaisulähtö OPERATE		
3.3 Lukitustulo BLOCK	BLOCK lukitustulon testaus	6.2.4
3.4 Vakioaikainen aseteltava laukaisuaika	START ja OPERATE lähtöjen testaus	6.2.3
3.5 Virtamuuntajien summavirran ja kaapelivirtamuuntajan virtojen eroon perustuva vian tunnistus	Erovirran laskennan testaus	6.2.1
3.5.1 Toiminta vakavoitu vakavointivirran avulla	Vakavointivirran testaus	6.2.5
3.5.2 Toiminta vakavoitu läpimenevän vian tunnistuksella	Läpimenevän vian tunnistuksen testaus	6.2.6
3.5.3 Nollajännitteeseen aseteltava perustuva laukaisulupa/esto	Nollajännite-ehton testaus	6.2.2
3.5.4 Asettelu virtamuuntajan kytkentätyypille	Virtamuuntajan kytkentätyypin asettelun testaus	6.2.7

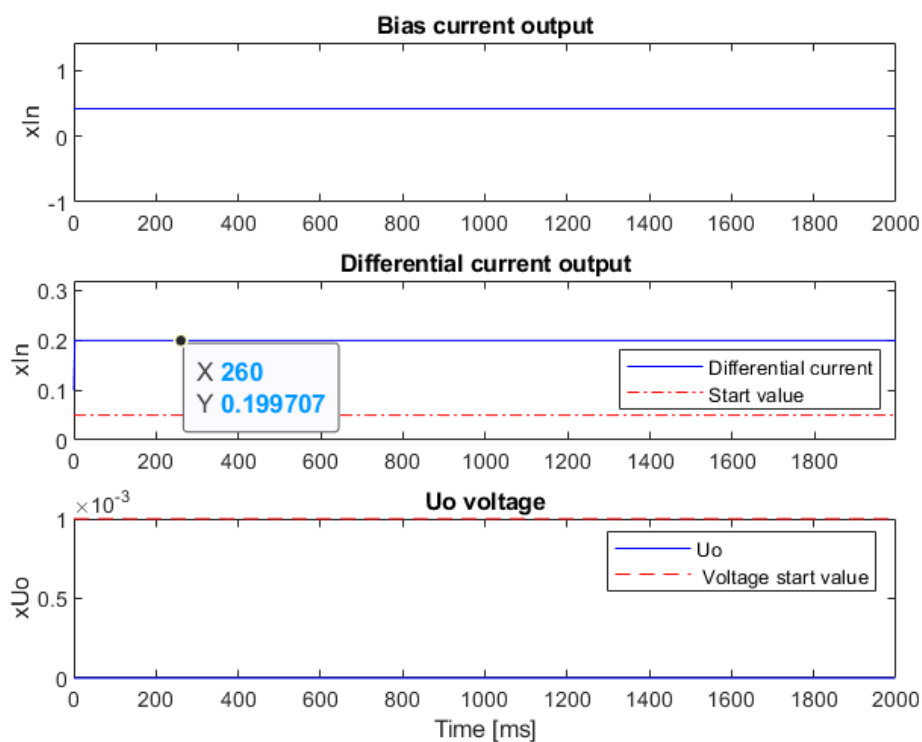
Seuraavaksi testataan eri vikatilanteita ja tällä pyritään todentamaan, että funktio varmasti toimii oikein.

### 6.2.1 Erovirran laskennan testaus

Testataan erovirran laskennan toimivuus.

Syötetään laskettua nollavirtaa -0.1 ja mitattua nollavirtaa 0.1. Tällöin erovirran laskennan pitäisi saada erovirran arvoksi 0.2. Syötettiin myös saman vaiheista laskennallista ja mitattua nollavirtaa ja tässä tilanteessa suojan ei tule laukaista.

Syötettäessä saman vaiheiset virrat, funktio ei laukaissut, joten tämän tuloksen ja kuvan 13 perusteella voidaan todeta erovirran laskennan toimivan.



**Kuva 13.** Erovirran laskennan testisyötteen.

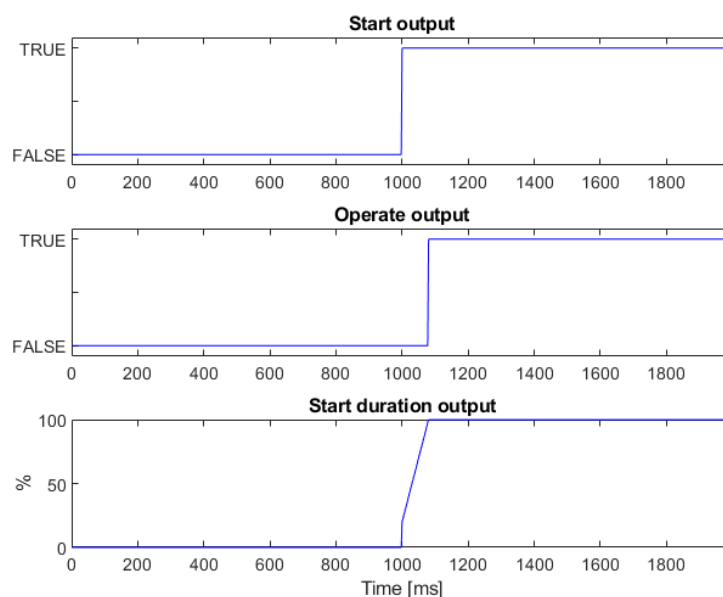
Maasulun ollessa taustaverkolla, ja suojattavan lähdön syöttäessä kapasitiivista virtaa ovat summavirta ja nollavirta saman vaiheisia eli erovirran laskenta toimii tässäkin tilanteessa.

### 6.2.2 Nollajännite-ehdon testaus

Tässä testissä testataan nollajännite-ehdon toimintaa, kun vika on suojausalueella eli kaapelipäätteessä.

Testissä syötetään laskettua nollavirtaa yli asettelun ja nollajännitettä. Nollajännite-ehdon ollessa pois päältä funktion tulee laukaista ilman nollajännitettä ja nollajännite-ehdon ollessa aktivoituna funktion tulee laukaista vain, jos nollajännite ylittää asettelun.

Ensimmäisenä testattiin tilannetta, että laskettu nollavirta ylitti asettelun nollajännite-ehdon ollessa pois päältä. Tässä tilanteessa funktio toimi oikein ja laukaisi hetimitä alettua. Toisena testattiin nollajännite-ehdon ollessa päällä, mutta nollajännitteen ollessa 0. Funktio toimi oikein eikä laukaissut, vaikka nollavirta ylitti asettelun. Viimeisenä testattiin lasketun nollavirran ylittäessä asettelun heti testin alussa nollajännite-ehdon ollessa päällä ja nollajännitteen ollessa yli asettelun testin puolivälissä. Testissä nollajännite nostetaan yli asettelun 1000 millisekunnin kohdalla. Kuvasta 14 nähdään funktion havaituvan nollajännitteen ylittäessä asettelun. Voidaan todeta testit onnistuneen hyväksytysti.



**Kuva 14.** Nollajännite-ehdon-testauksen lähdöt.

Kuvassa 14 oleva "Start duration" näyttää funktion laukaisuajan kulumisen. Laukaisu tapahtuu kun 100 % asetellusta laukaisuajasta on kulunut.

### 6.2.3 START- ja OPERATE-lähtöjen testaus

Tässä testissä testataan, että START aktivoituu vian alkaessa sekä OPERATE aktivoituu vian alusta asetellun ”Operate delay time”-ajan kuluttua.

Syötetään laskennallista nollavirtaa yli asettelun heti testin alkaessa ja funktion tulisi havahtua siihen.

START aktivoitui noin 15 millisekunnin vian jälkeen ja OPERATE aktivoitui asetellun ajan jälkeen. Todetaan funktion toimineen halutusti ja testin onnistuneen hyväksytysti.

### 6.2.4 BLOCK-lukitustulon testaus

Tässä osiossa testataan BLOCK-lukitustulon kolmea eri toiminnallisuutta, jonka voi valita releen yleisestä asettelusta ”Configuration/System/Blocking mode”. Ensimmäisenä testataan ”Freeze timer”-toimintaa, toisena ”Block All”-lukituksen toimintaa ja kolmantena ”Block operate”-lukituksen toimintaa.

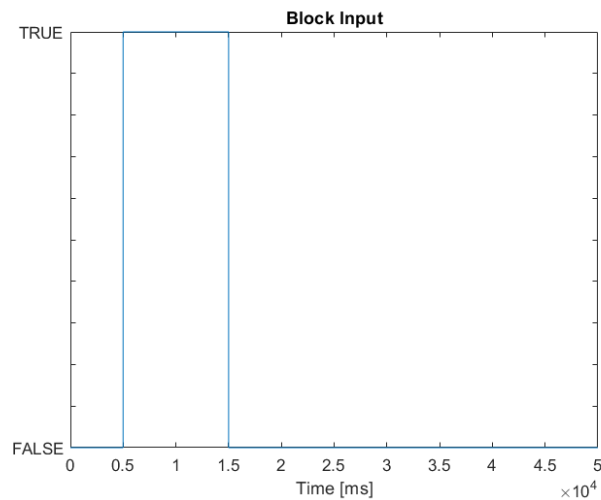
Jokaisessa testissä asetetaan ”Operate delay time” 10 sekuntiin. Ensimmäisessä ”Freeze timer”-testissä laitetaan vika päälle heti testin alkaessa ja 5 sekunnin kohdalla aktivoidaan BLOCK-tulo. Odotetaan 10 sekuntia, että funktio ei laukaise ja laitetaan BLOCK pois päältä, jonka jälkeen laukaisun pitää tulla 5 sekunnin kuluttua.

Toisessakin testissä testataan vielä ”Freeze timer”-toimintaa asettamalla BLOCK päälle ja sitten vika päälle. Näin START-lähdön tulisi aktivoitua, mutta OPERATE ei aktivoidu.

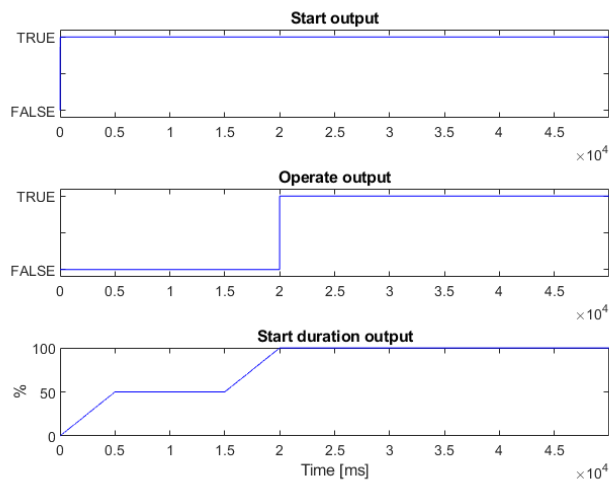
Kolmannessa testitapauksessa on käytössä ”Block All”-toiminta. Vika tulee heti testin alkaessa ja annetaan funktion laukaista. Sitten BLOCK asetetaan päälle, niin molempien START- ja OPERATE-lähtöjen tulee palautua. Tämän jälkeen otetaan BLOCK pois päältä, niin OPERATE tulisi aktivoitua asetellun ajan kuluttua.

Neljännessä testissä käytetään "Block operate"-toimintaa laittamalla heti BLOCK päälle ja vika päälle. Odotetaan "Operate delay time"-ajan, että funktio ei laukaise. Tämän jälkeen otetaan BLOCK pois päältä ja laukaisun tulisi tapahtua välittömästi.

Kuvien 15 ja 16 perusteella voidaan todeta ensimmäisen testin toimineen hyväksytysti.

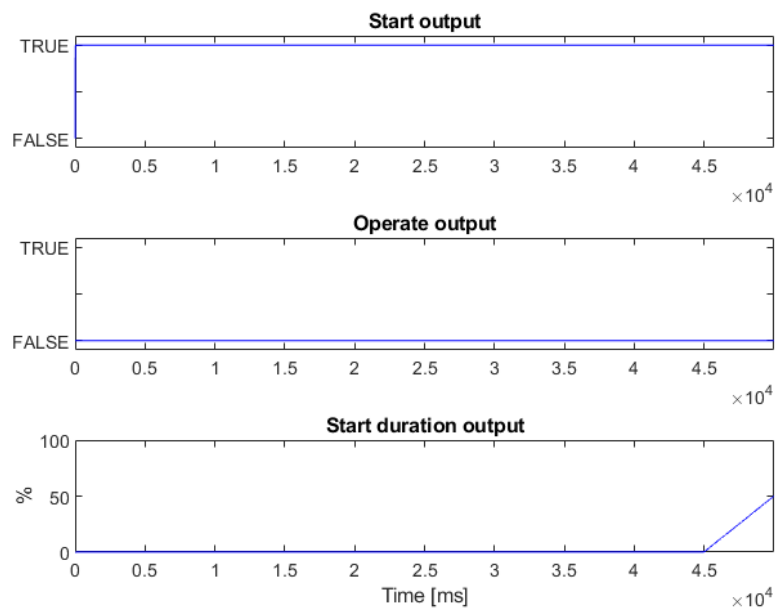


**Kuva 15.** Ensimmäisen "Freeze timer"-testin BLOCK-tulo.



**Kuva 16.** Ensimmäisen "Freeze timer"-testin lähdöt.

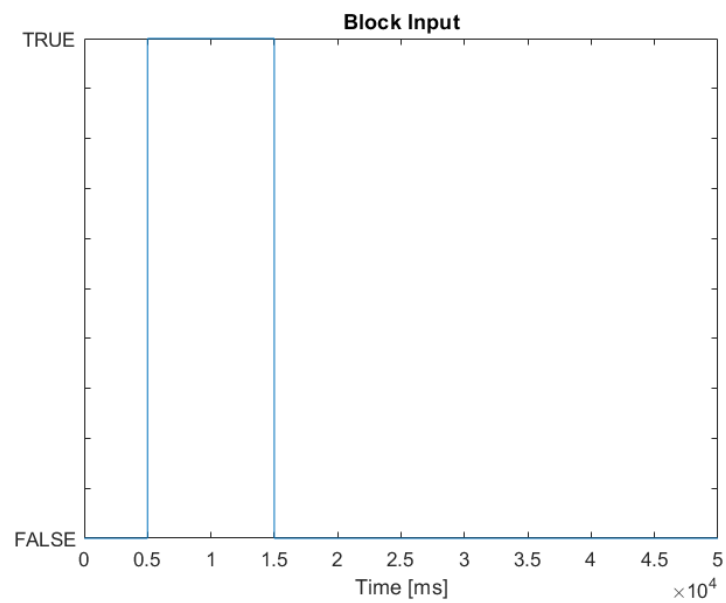
Kuvassa 17 on esitetty toisen testin tulos, mistä voidaan huomata, että START aktivoituu ja OPERATE ei. Tämän perusteella testi on suoritettu hyväksytysti.



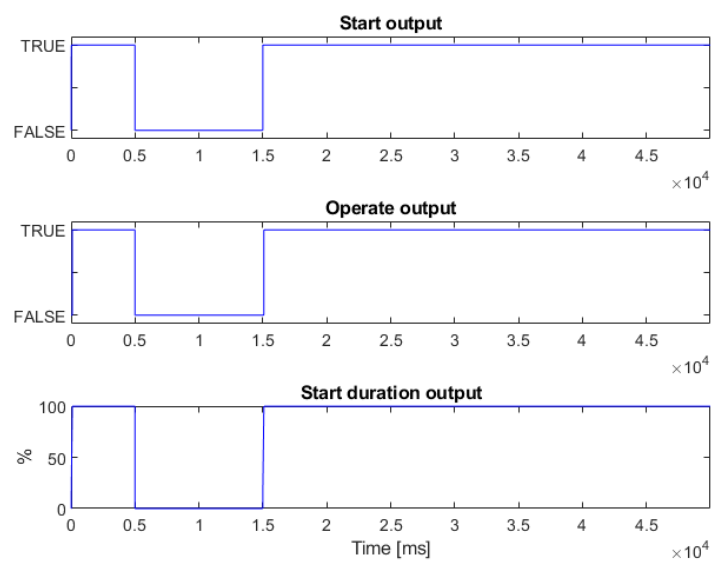
**Kuva 17.** Toisen "Freeze timer"-testin lähdöt.

Kuvissa 18 ja 19 on esitelty kolmannen eli "Block All"-toiminnallisuuden testaamisen tulokset. Voidaan tulosten perusteella todeta tämän toiminnallisuuden toimivan hyväksytysti.



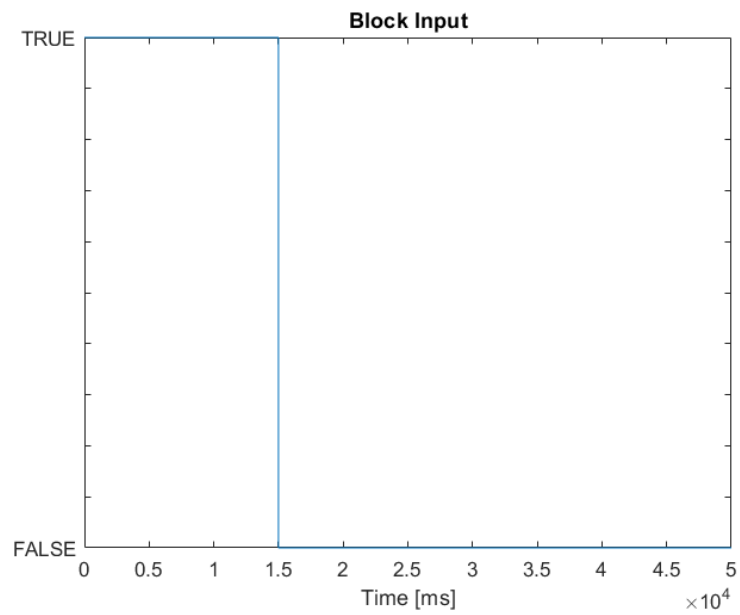


**Kuva 18.** "Block All"-testin BLOCK-tulo.

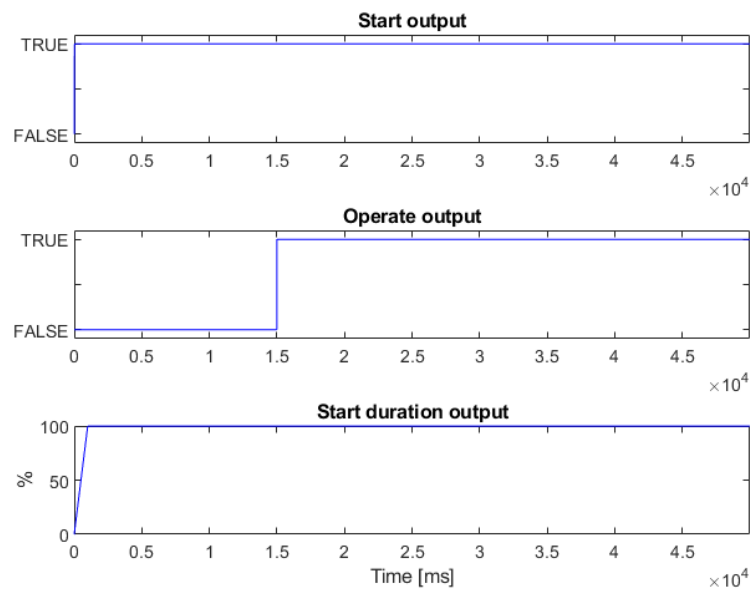


**Kuva 19.** "Block All"-testin lähdöt.

Neljännän testin eli "Block operate"-toiminnallisuuden tulokset ovat esiteltynä kuvissa 20 ja 21. Kuvista nähdään funktion toimivan halutulla tavalla ja voidaan täten todeta testin olevan hyväksytty.



**Kuva 20.** "Block operate"-testin BLOCK-tulo.



**Kuva 21.** "Block operate"-testin lähdöt.

### 6.2.5 Vakavointivirran testaus

Tässä testataan vakavointivirran toimivuutta sen ollessa 0, 1.0, 2.0 ja 3.0 xln.

Syötetään mitattua nollavirtaa yli asetteluun ja laitetaan läpimenevän vian tunnistusraja maksimiin. Tässä funktion tulee laukaista, kun

<u>Vakavointivirta</u>	<u>Laukaisuun vaadittava erovirta</u>
0	Start value
1.0	Start value
2.0	Start value + 0.5 xln
3.0	Start value + 1.0 xln

Kaikissa tilanteissa funktio toimi oikein, eli laukaisi mitatun nollavirran ylittäessä rajan ja havahtumisarvo kasvoi oikein. Voidaan todeta vakavointivirran toimivan oikein ja testin onnistuneen hyväksytysti.

Kaksoismaasulun ollessa johtolähdöllä virrat ovat saman vaiheisia, mutta on oletettavaa, että kaapelivirtamuuntaja kyllästyy ja tästä aiheutuu näennäistä erovirtaa. Tässä toimintaa vakavoidaan vakavointivirralla sekä läpimenevän vian tunnistuksella.

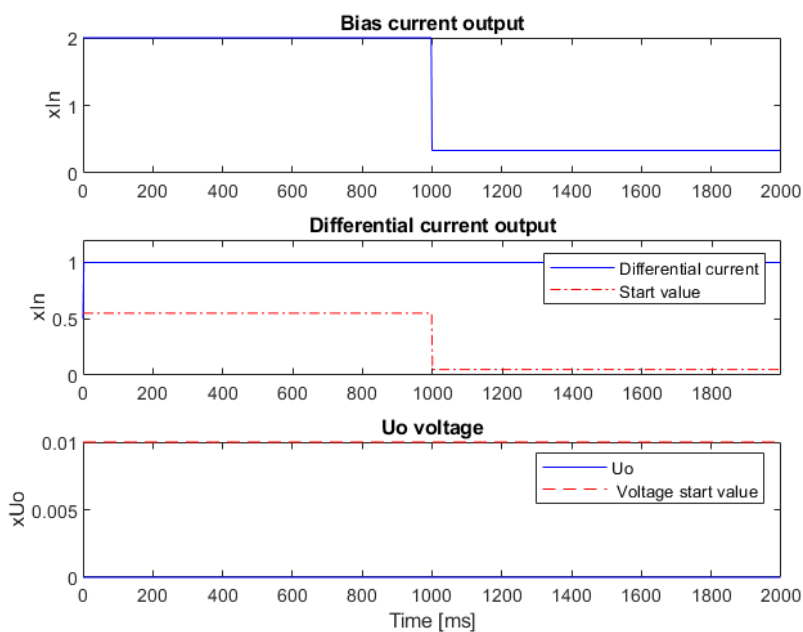
### 6.2.6 Läpimenevän vian tunnistuksen testaus

Testataan toiminnan vakavointia läpimenevän vian tunnistuksella.

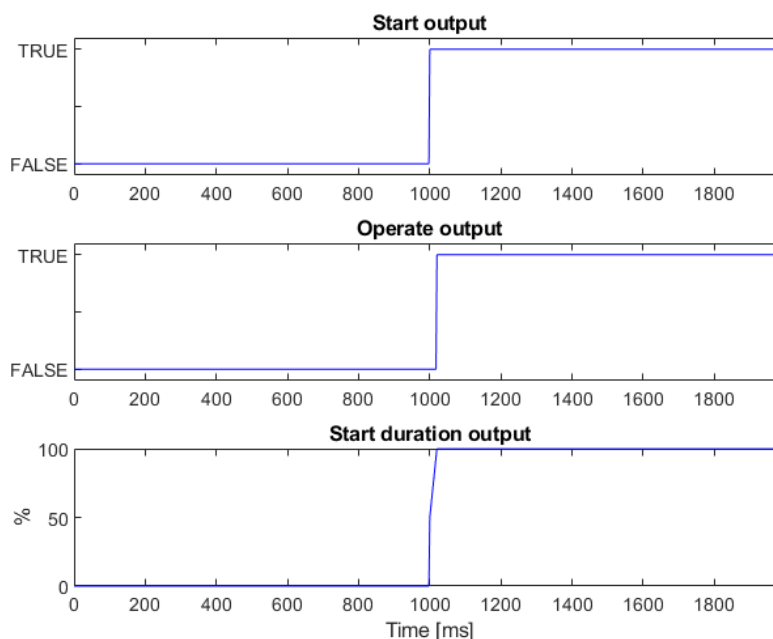
Ensimmäisessä testissä vakavointivirta on alle läpimenevän vian tunnistusrajan ja syötetään reilu mitattu nollavirta. Tässä funktion tulee laukaista mitatun nollavirran ylittäessä rajan. Toisessa testissä vakavointivirta on yli läpimenevän vian tunnistusrajan ja vasta tämän jälkeen syötetään mitattua nollavirtaa yli asetteluun.

Tässä tilanteessa funktio ei saa laukaista. Kolmannessa testissä testattiin tilannetta, että vakavointivirta ja mitattu nollavirta oli aluksi yli asettelun. Puolessa välissä testiä vakavointivirta laskettiin alle rajan, minkä jälkeen lukituksen täytyy mennä pois päältä ja funktion pitää laukaista.

Kaikissa testeissä funktio toimi oikein, eli ensimmäisessä testissä laukaistiin, sillä vakavointivirta oli alle tunnistusrajan ja näin ollen funktion tulee laukaista vian ilmetessä. Toisessa testissä funktio ei laukaissut, koska vakavointivirta oli yli tunnistusrajan niin funktio ei saa laukaista, vaikka mitattu nollavirta ylittäisikin rajan. Kolmannessa testissä vakavointivirran mennessä alle rajan, funktio laukaisi oikein. Kuvien 22 ja 23 perusteella voidaan todeta läpimenevän vian tunnistuksen toimivan hyväksytysti.



**Kuva 22.** Läpimenevän vian tunnistuksen kolmannen testin testisyöte.



**Kuva 23.** Läpimenevän vian tunnistuksen kolmannen testin lähdöt.

Johtolähdön 2 ja 3-vaiheinen oikosulku ei näy summavirran tai nollavirran mittauksissa paitsi vaihevirtamuuntajien kyllästyessä, luoden näennäistä erovirtaa. Tässä suojaus on vakavoitu sekä läpimenevän vian tunnistuksella, että nollajännite-ehdolla.

### 6.2.7 Virtamuuntajan kytkentätyyppin asettelun testaus

Tässä testataan virtamuuntajan kytkentätyyppin asettelua ”CT connection type”.

Asetetaan nollajännitteen ehto pois päältä. Ensimmäisenä testataan kytkentätyyppin ollessa 2 ja laskettu nollavirta sekä mitattu nollavirta ovat vastakkaisvaiheisia. Tässä funktion tulee laukaista. Tämä sama tehdään kytkentätyyppin ollessa 1 ja tässä tilanteessa funktio taas ei saa laukaista. Kolmantena testinä kytkentätyyppi on 2 ja virrat saman vaiheisia. Funktio ei saa laukaista tässä tilanteessa. Tämä sama toistetaan, mutta kytkentätyyppin ollessa 1 ja tässä funktion pitää laukaista.

Kaikki testit toimivat oikein, eli ensimmäisessä funktio laukaisi, niin kuin pitikin. Toisessa testissä funktio ei laukaissut, koska kytkentätyyppi oli 1. Kolmannessa testissä taas virtojen ollessa saman vaiheisia, funktio ei laukaissut kytkentätyypillä 2, mutta laukaisi kytkentätyypillä 1. Tästä voidaan todeta, että testit onnistuivat hyväksytysti ja kytkentätyyppien asettelu toimi oikein.

## 7 FUNKTION JATKOKEHITYS

Funktiota kehittäessä syntyi seuraavia jatkokehityksiä:

1. Funktion jatkokehittäminen kaapelipäätteen katkeilevien vikojen tunnistuksella

Tässä työssä kehitetyn funktion toiminta perustuu erovirran perustaajuihin komponentteihin, mikä katkeilevissa vioissa jää pieneksi. Erovirtaan perustuvan katkeilevien vikojen tunnistuksen lisäämisellä saataisiin funktion toiminnallisuutta parannettua.

2. Funktion jatkokehittäminen tilanteisiin, missä kaapelivirtamuuntaja kyllästyy erittäin nopeasti
3. Funktion jatkokehittäminen kaapelipäättilassa olevalla valokaarianturietiedolla

Funktion nähdessä samanaikaisesti erovirtaa ja valokaaren laukaisu pitää tehdä välittömästi ilman aseteltua laukaisuaikaa. Tässä olisi myös syytä tutkia pitäisikö laukaisu tehdä ilman vakavointia ja voitaisiinko toimintaa nopeuttaa käyttämällä erovirran huipusta-huippuun mittausperiaatetta.

## 8 YHTEENVETO

Työn lähtökohtana oli kehittää suojafunktiota, joka havaitsee maasulut kaapelipääteellä, jonka toiminta vakavoitetaan väärin laukaisujen estämiseksi. Itse maasulkujen havaitseminen kaapelipääteessä oli yksinkertainen toteuttaa, mutta funktion toiminnan vakavointi niin, että se ei laukaise tilanteessa, missä se havaitsee virtamuuntajien kyllästymisestä johtuvaa näennäistä erovirtaa, oli hieman haastavampaa.

Tietotekniikan opiskelijana haasteita aluksi oli sähkötekniikan teorian ymmärtämisessä ja sisäistämisessä, sillä käytössä oli aivan uusia termejä, mitä opinnoissa ei olla koskaan läpi käyty. Kuitenkin työn edetessä opin paljon uutta sähkötekniikasta ja suojaruleiden toiminnallisuuksista.

Työn aikataulun ollessa melko tiukka, työssä onnistuttiin hyvin luoda toimivan suojafunktion kaapelipääteelle. Työn vaikein osuus oli funktion toiminnallisuuden määrittelyt aiemmin mainitseman sähkötekniikan teorian tietämyksen puutteen takia. Tämä vaati paljon uuden oppimista ja asioiden selvittämistä.



## LÄHTEET

ABB Oy, Distribution Solutions. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/distribution-solutions> Viitattu 15.2.2023

ABB Oy. 2020. REX640 Technical Manual. Viitattu 22.3.2023

ABB Oy. Feeder protection and control REF615 IEC. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec> Viitattu 27.3.2023

ABB Oy. Product news. 2020. <https://new.abb.com/news/fi/detail/60017/keskitetyn-suojauksen-laite-ssc600-mahdollistaa-suojausratkaisujen-toteuttamisen-uuudella-tavalla-jakeluverkon-sahkoasemilla> Viitattu 27.3.2023

ABB Oy. Product news. 2020. <https://new.abb.com/news/fi/detail/58483/rex640-suojaterminaalin-uuudella-versiolla-parannettua-toiminnallisuutta-seka-turvallisempaa-tiedonsiirtoa-sahkontuotanto-ja-sahkonjakelusovelluksiin> Viitattu 27.3.2023

ABB Oy. Protection and control REX640. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/protection-and-control-rex640> Viitattu 27.3.2023

ABB Oy. Smart substation control and protection SSC600. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/ssc600> Viitattu 27.3.2023

ABB Oy. Syöttö- ja lähtökentän suojaus- ja ohjausrele REF615. Ostajan opas. [https://library.e.abb.com/public/f5dcf411ba594a388a7b8cc315ac01d3/REF615\\_pg\\_758316\\_Fla.pdf?x-sign=Bw6E64UfUQvQYid7CzRJte2/DUIXYkAvv2xnD-cQauKCKmP3D7sOloO8NtFFdDBU2](https://library.e.abb.com/public/f5dcf411ba594a388a7b8cc315ac01d3/REF615_pg_758316_Fla.pdf?x-sign=Bw6E64UfUQvQYid7CzRJte2/DUIXYkAvv2xnD-cQauKCKmP3D7sOloO8NtFFdDBU2) Viitattu 27.3.2023

ABB Suomessa. ABB Oy. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa> Viitattu 15.2.2023

Apiola, A & Laine, M. Lyhyt MATLAB-opas. <http://math.aalto.fi/~apiola/matlab/opas/lyhyt/> Viitattu 29.3.2023

Compaq. 2020. What are cable terminations. <http://www.compaqinternational.com/what-are-cable-terminations.php> Viitattu 6.3.2023

Dekra Industrial Oy, Prysmian Finland Oy 2018 Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla, Loppuraportti Viitattu 6.3.2023

Electrical-Technology. 2022. Earth-fault. <https://www.electrical-technology.com/2022/10/earth-fault.html> Viitattu 6.3.2023

Harbi, D. 2017 Monitaajuusadmittanssipohjaisen maasulkusuojan toisiokoestus, Insinööriyö Viitattu 6.3.2023

Lehesvuo, V. ABB Oy. 2023 Johtolähdön suojaus – koulutusmateriaali Viitattu 6.3.2023

Lehesvuo, V. ABB Oy. Kommentti opinnäytetyöstä. Viitattu 20.4.2023

Microsoft. Visual Studio. <https://visualstudio.microsoft.com/vs/> Viitattu 29.3.2023

TechBaniya. Frontec cable outdoor termination kit. <https://techbaniya.com/33kv-termination-kits/10532-frontec-300-sqmmx3c-xlpe-u-g-ht-cable-outdoor-termination-kit.html> Viitattu 6.3.2023

The Mathworks. MATLAB. <https://se.mathworks.com/products/matlab.html> Viitattu 29.3. 2023