

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Riku Kakkonen

**ERÄÄN ENERGIA-YHTIÖN KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUKSEN KE-  
HITTÄMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 27.4.2020

Työn valvoja

Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaajat

Kimmo Kauhaniemi ja Tero Ovaskainen

Työn tarkastaja

Hannu Laaksonen

## ALKULAUSE

Kiitos vanhemmilleni, jotka ovat aina tukeneet ja kannustaneet minua opinnoissani.

Kiitos isovanhemmilleni, jotka pitivät ala-asteikäisenä huolen, että läksyt tuli tehtyä.

Kiitos vaimolleni, joka on ollut tärkein osa elämäni aina lukiossa tapaamisestamme alkaen.

Kiitos veljelleni siitä keskisormen näyttämisestä, mikä potki minua eteenpäin tämän työn loppuun saattamisessa. Kiitos siskolleni opintojen aikaisesta vertaistuesta.

Lopuksi vielä kiitos kaikille opiskelukavereilleni. En tiedä, olisinko koskaan valmistunut ilman teidän apuanne, mutta sen tiedän, että ilman teitä elämäni olisi ollut merkittävästi tylsempää. Kiitos erityisesti kämppekaverilleni ja hyvälle ystävälleni Jolelle unohtumattomista yhteisistä opiskelijavuosista.

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tavoitteet ja tausta	9
1.2 Työn rakenne	10
1.3 Outokummun Energia Oy:n jakeluverkko	11
2 SUOJAUKSEN TEORIAA	13
2.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa	13
2.2 Maasulku sammutetussa verkossa	22
2.3 SFS6001-standardin mukainen maadoitusjännitteeseen liittyvän virran laskeminen	25
2.4 Kaksoismaasulku	27
2.5 Johtimen katkeaminen avojohtoverkossa	28
2.6 Pika- ja aikajälleenkytkentä	28
2.7 Aika- ja virtaselektiivisyys säteittäisessä verkossa	29
3 MAASULKUSUOJAUKSEN KEHITTÄMINEN	31
3.1 Miksi Apteekin lähdön suojarele ei havainnut maasulkua?	31
3.2 Maasulkusuojauksen kehittäminen katkeilevien maasulkujen osalta	38

4	MAASTOKATKAISIJOIDEN LISÄÄMINEN JOHTOLÄHDÖILLE	42
4.1	Maastokatkaisijan suojauksen suunnittelu Kokonvaaran lähdölle	42
4.2	Kokonvaaran maastokatkaisijan taloudellisen kannattavuuden tarkastelu	48
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
	LÄHDELUETTELO	55

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Lyhenteet*

AJK	aikajälleenkytkentä
KAH	keskeytyksestä aiheutunut haitta
PJK	pikajälleenkytkentä
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index, pitkien keskeytysten keskimääräinen taajuus

*Kreikkalaiset symbolit*

$\omega$	kulmataajuus
$\tau$	johtimen jäähtymisaikavakio

*Muut symbolit*

$C$	kapasitanssi
$C_0$	verkon maakapasitanssi
$e$	Neperin luku
$f$	taajuus
$I$	virta, sisältää suunnan ja suuruuden, kompleksinen arvo
$I$	kompleksisen virran itseisarvon suuruus
$I_0$	vaihevirtojen summavirta eli nollavirta
$I_B$	kehon kautta kulkeva virta
$I_{Bp}$	sallittu kehon virta
$I_C$	verkon maakapasitanssista aiheutuva maasulkuvirta, sisältäen myös resistiivisen komponentin
$I_E$	maavirta
$I_F$	maasulkuvirta
$I_H$	harmoninen virta
$I_L$	sammutetussa verkossa sammutuskelan aiheuttama maasulkuvirta, sisältäen myös resistiivisen komponentin
$I_{RES}$	jännösvirta sammutetussa verkossa
$L$	induktanssi
$R$	resistanssi
$r$	reduktiokerroin

$R_F$	vikaresistanssi maasulun aikana
$t$	oikosulkuvirran ekvivalentti vaikutusaika
$t_1$	oikosulun kesto aika ennen AJK:n jännitteetöntä aikaa
$t_0$	AJK:n jännitteetön aika
$t_2$	AJK:n jälkeinen oikosulku aika
$U$	jännite, sisältää suunnan ja suuruuden, kompleksinen arvo
$U_0$	tähtipistejännite eli nollajännite
$U_E$	maajännite
$U_F$	maasulkujännite
$U_{Tp}$	suurin sallittu kosketusjännite
$U_T$	kosketusjännite
$V$	potentiaali
$Z$	impedanssi

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Riku Kakkonen
<b>Diplomityön nimi:</b>	Erään energiayhtiön keskijänniteverkon suojausten kehittäminen
<b>Valvoja:</b>	Kimmo Kauhaniemi
<b>Ohjaajat:</b>	Kimmo Kauhaniemi ja Tero Ovaskainen
<b>Tarkastaja:</b>	Hannu Laaksonen
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Koulutusohjelma:</b>	Energia- ja informaatiotekniikka
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2014
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2020

**Sivumäärä: 56**

---

**TIIVISTELMÄ**

Työssä tarkastellaan erästä verkossa tapahtunutta maasulkuvikaa, joka ei saanut keskijänniteverkon johtolähtöä suojannutta suojaarelettä toimimaan, jolloin sähköaseman varasuoja toimi ja avasi syöttökentän katkaisijan. Työssä todetaan, että tarkasteltava maasulkuvika oli todennäköisesti katkeileva maasulku, joiden havaitseminen on Outokummun Energian nykyisille johtolähdön suojaareille haastavaa. Katkeilevien maasulkujen tiedetään aiheuttavan maasulkusuojausten epäselektiivistä toimintaa.

Jotta katkeilevat maasulut eivät vastaisuudessa aiheuttaisi suojausten epäselektiivistä toimintaa, johtolähtöjen suojaareille on päätetty ottaa käyttöön uusi maasulkusuojausten suojausporras, joka havahtuu pelkästä nollajännitteen noususta. Tämän suojausporras toimii johtolähtöjen suunnatun maasulkusuojausten ja sähköaseman varasuojan välissä, joten sen hidastusaika määritetään suunnatun maasulkusuojausten hidastusaikaa pidemmäksi, mutta varasuojan hidastusaikaa lyhyemmäksi. Lisäksi jokaiselle johtolähdölle määritetään oma hidastusaikansa, jolloin jakeluverkon käyttöhenkilöstö pystyy päättämään vioittuneen johtolähdön, kun nollajännite alkaa laskemaan.

Outokummun Energia asensi Kokonvaaran johtolähdölle uuden maastokatkaisijan ja sen suojausasettelut on suunniteltu tämän työn neljännessä luvussa. Samalla johtolähdön suojaarelle otetaan käyttöön uusi ylivirtaporras, joka on virtaselektiivinen maastokatkaisijan kanssa. Lopuksi tarkastellaan Kokonvaaran maastokatkaisijan taloudellista kannattavuutta suhteessa hankintakustannuksiin ja saavutettuihin KAH-arvojen pienenemisiin, sekä verrataan saatua tulosta laajemmissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin. Pelkkien KAH-arvojen perusteella arvioitu taloudellinen kannattavuus ei vaikuta riittävän luotettavalta, verrattuna laajempien tutkimusten tuloksiin. Esitellyissä laajemmissa tutkimuksissa maastokatkaisijoiden taloudelliset hyödyt ovat merkittävät, joten esiteltyjen tutkimusten perusteella maastokatkaisijoille otollisia kohteita kannattaa etsiä verkosta verkoston suunnittelun yhteydessä.

---

**AVAINSANAT:** keskijänniteverkon suojaus, katkeileva maasulku, maastokatkaisija

---

**UNIVERSITY OF VAASA****The School of Technology and Innovations**

<b>Author:</b>	Riku Kakkonen
<b>Topic of the Thesis:</b>	Improving the protection of a medium voltage distribution network
<b>Supervisor:</b>	Kimmo Kauhaniemi
<b>Instructors:</b>	Kimmo Kauhaniemi and Tero Ovaskainen
<b>Evaluator:</b>	Hannu Laaksonen
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2014
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2020

**Pages: 56**

---

**ABSTRACT**

In this study, we observe an earth fault that occurred in one of the underground cables of Outokummun Energia's medium voltage distribution network. The feeder protection relay did not operate on the fault, and thus the backup protection of the substation operated. In this study, we show that the earth fault must have been an intermittent earth fault which can be difficult for traditional protection relays to identify. Intermittent earth faults are known to cause unselective operation of the protection system.

In order to avoid unselective operation of the protection during intermittent earth faults in the future, a new protection scheme is implemented in the feeder protection relays. This protection scheme operates on the neutral point voltage as the backup protection of the substation. The new protection scheme operates between the directional earth fault protection and the backup protection of the substation. Therefore, the operation delay of the new protection scheme is longer than the directional earth fault protection but shorter than the backup protection of the substation. Moreover, each feeder protection relay has designated operation delay in the new protection scheme so user can figure out which feeder is faulted if the neutral point voltage declines to normal.

Outokummun Energia installed a new line recloser in Kokonvaara feeder, and this added a new protection zone in the feeder. In this study, we express the protection settings of the new line recloser and a new over-current step for the feeder protection relay. Finally, we introduce a narrow calculation of the economic benefits of the new line recloser, and we compare the results to related research work regarding the topic. In the comparison we notice that the narrow calculations of this study are not enough in order to define the economic benefits of the line reclosers, compared to the related research work. However, the results of the related work do encourage to take advantage of the line reclosers in design of a medium voltage distribution network.

---

**KEYWORDS:** medium voltage grid, protection, intermittent earth fault, line recloser

# 1 JOHDANTO

Tämän työn teettäjä on Outokummun Energia Oy. Työn aihe ja työhön sisältyvät kehittämiskohteet sekä tapaukset on valittu yhdessä työn teittäjän kanssa. Sähkön jakeluverkkoa saneerataan, uudistetaan ja kehitetään jatkuvasti, minkä takia myös sähköverkon suojausta tulee tarkastella aina aika ajoin. Erityisesti viime vuosina jakeluverkkojen saneeraaminen ja uudistaminen on ollut poikkeuksellisen voimakasta useissa suomalaisissa jakeluverkkoyhtiössä, ja etenkin keskijänniteverkkojen maakaapelointiaste on kasvanut voimakkaasti. Osaltaan ilmiötä selittää vuonna 2013 voimaan astunut uudistettu sähkömarkkinalaki, joka velvoittaa jakeluverkkoyhtiöt saattamaan jakeluverkkonsa vuoteen 2029 mennessä sellaisiksi, etteivät myrskyt eikä lumikuorma aiheuta taajama-alueilla yli kuuden tunnin eikä taajama-alueen ulkopuolella yli 36 tunnin sähkön jakelun keskeytystä (Sähkömarkkinalaki 588/2013, §51). Myös Outokummun Energian jakeluverkon maakaapelointiaste on kasvanut viime vuosina merkittävästi, mutta yhtiö käyttää lain täyttämiseksi myös muita keinoja, kuten siirtää ilmalinjoja teiden varsille, leventää johtokatuja ja asentaa verkkoon automaattista vianrajausta helpottavia maastokatkaisijoita.

## 1.1 Työn tavoitteet ja tausta

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016 määrää, että ”sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että: 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa; -- ” (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, §6). Laissa tarkoitetaan ”sähkölaitteella” myös sähkön siirtoon tarkoitettuja laitteita, jolloin myös sähkön jakelua harjoittavien verkkoyhtiöiden tulee suunnitella suojauksensa siten, että sillä taataan sähköturvallisuuslaissa määrätty turvallisuuden taso (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, §4). Tämän lisäksi suojauksella pyritään estämään verkkoon asennettujen kalliiden komponenttien vahingoittuminen. Tässä työssä keskitytään keskijänniteverkon suojaukseen.

Sähköverkossa komponentit suunnitellaan asennettaviksi ja käytettäväksi siten, että jännitteiset osat ovat käytön aikana kosketussuojattu ja tarvittaessa suojamaadoitettu. Keski-jänniteverkossa on käytössä myös paljaita jännitteisiä komponentteja, kuten avolinjoja ja pylväsmuuntamoita, mutta esimerkiksi sijoittamalla paljaat jännitteiset osat tarpeeksi korkealle maan pinnalta, voidaan osoittaa, ettei niihin voi päästä vahingossa koskettamaan. Sähköiset komponentit voivat kuitenkin aina vikaantua, jolloin sähkövirta saattaa päästä kulkemaan sille suunnittelematonta reittiä pitkin tai jännitteettömäksi tarkoitettuihin pisteisiin saattaa syntyä vaaraa aiheuttava potentiaali. Tällöin sähköön syöttö tulee katkaista.

Keskijänniteverkossa verkon vikaantumista voidaan valvoa ja vikaantunut osa verkosta voidaan katkaista suojareleillä, jolloin puhutaan relesuojauksesta. Useimmiten suojareleitä sijoitetaan keskijänniteverkossa ainakin sähköasemille johtolähdön syöttävään päähän. Rele mittaa suojattavasta keskijännitelähdöstä esimerkiksi vaiheiden jännitteitä, vaihevirtoja, jännitteen ja virran vaihe-eroa, tähtipistejännitettä eli nollajännitettä sekä johtolähdön nollavirtaa. Tämän lisäksi releelle asetellaan ennen sen käyttöönottoa vikatilanteen havaitsemisen raja-arvoja, kuten ylivirran virta-asettelu, suurin sallittu nollavirta ja tähtipistejännitteen havahtumisraja. Lopuksi releelle asetellaan vielä muita releen toimintaa ohjaavia asetuksia, kuten katkaisijan laukaisun viive vian havaitsemisesta ja mahdolliset jälleenkytkentäsekvenssit. Tämän jälkeen rele kykenee tunnistamaan verkossa syntyneen vian ja tekemään päätöksen sähköön syötön katkaisemisesta. Työssä pyritään kehittämään Outokummun Energia Oy:n keskijänniteverkon relesuojausta.

## 1.2 Työn rakenne

Työn toisessa luvussa käydään läpi maasulkusuojauksen teoriaa maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa, sekä esitellään SFS6001-standardissa (2018) annetut kaavat maadoitus- ja kosketusjännitteeseen liittyvän virran määrittämiseen. Tämän lisäksi toisessa luvussa käsitellään myös pika- ja aikajälleenkytkennät sekä aika- ja virtaselektiivisyys.

Työn kolmannessa luvussa kehitetään Outokummun Energian maasulkusuojausta. Luvussa tarkastellaan erästä maakaapeliverkossa tapahtunutta maasulkuvikaa, joka ei aiheuttanut johtolähdön suojareleen toimintaa, jolloin koko sähköasemaa suojannut suoja-rele ohjasi sähköaseman syöttökentän katkaisijan auki. Luvussa pyritään kehittämään maasulkusuojausta tämän tapauksen pohjalta siten, että vastaisuudessa johtolähdön suoja-rele toimisi tämänkaltaisissa vikatilanteissa.

Työn neljännessä luvussa tarkastellaan maastokatkaisijan lisäämistä johtolähdölle. Luvussa tarkastellaan Kokonvaaran johtolähdölle asennettua maastokatkaisijaa ja luvun tavoitteena on saada johtolähdön suojareleen ja maastokatkaisijan asetelut selektiivisiksi ja mahdollisimman optimaalisiksi eri tilanteissa. Tämän lisäksi neljännessä luvussa tarkastellaan maastokatkaisijoiden taloudellista kannattavuutta toteutuneiden hankintakustannusten ja KAH-arvojen pienenemisen avulla, jonka jälkeen tuloksia verrataan laajemmissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin.

### 1.3 Outokummun Energia Oy:n jakeluverkko

Outokummun Energialla on neljä erillistä sähköasemaa, joista kaksi sijaitsee Ruutulla ja kaksi Vuonoksella. Ruuttu 1 sähköasema syöttää pääasiassa taajama-alueita, Ruuttu 2 sähköasema syöttää pääosin haja-asutusalueita, Vuonos 1 sähköasema syöttää haja-asutusalueita ja Vuonos 2 sähköasema on puhtaasti teollisuuden tarpeisiin. Ruuttu 1 ja Ruuttu 2 sekä Vuonos 1 ja Vuonos 2 voidaan yhdistää keskijännitepuolelta ja samoin Ruuttu 1 ja Vuonos 1 voidaan tarvittaessa yhdistää keskijännitepuolelta. Outokummun Energialla on yhteensä noin 350 kilometriä keskijänniteverkkoa, josta on maakaapeloitu tällä hetkellä noin 80 kilometriä. Pienjänniteverkkoa on noin 550 kilometriä ja kuluttajia on tällä hetkellä reilu 5000 kappaletta. Outokummun Energian keskijänniteverkkoa käytetään kaikilla johtolähdöillä säteittäisesti. Suuri osa keskijänniteverkosta on rakennettu silmukoiduksi, mutta silmukat ovat normaalikäyttötilanteessa auki ja johtolähdöt on erotettu toisistaan jakorajoin.

Tämän työn alaluvussa 3.1 tarkasteltava Apteekin johtolähtö on Ruuttu 1 sähköasemalla ja se syöttää keskusta- ja taajama-alueita. Apteekin lähtö on keskijänniteverkon osalta kokonaan maakaapeloitu ja maakaapelien asennusvuodet vaihtelevat 1980-luvulta 2010-luvulle. Yhteensä Apteekin lähdöllä on keskijännitemaakaapelia noin kolme kilometriä, josta noin 1100 metriä on vuonna 2011 rakennettua AHXAMK-W 3x120 mm<sup>2</sup> -kaapelia ja noin 1900 metriä on 1980-luvulla rakennettua öljyeristeistä APYAKMM-kaapelia, jonka poikkipinta-alat vaihtelevat välillä 3x35 – 3x120 mm<sup>2</sup>.

Työn alaluvussa 4.1 tarkasteltava Kokonvaaran johtolähtö on Vuonos 1 sähköasemalla ja sen keskijänniteverkko on pääosin avojohtoverkkoa, jonka poikkipinta-alat vaihtelevat välillä 3x25 – 3x132 mm<sup>2</sup>. Kokonvaaran johtolähdön alkupäässä on yksi suurehko teollisuuden pienjänniteliittymä ja sen lisäksi Kokonvaara syöttää laajahkoa maaseutuverkkoa. Yhteensä Kokonvaaran lähdöllä on noin 37 kilometriä keskijänniteavojohtoverkkoa, jonka asennusvuodet vaihtelevat 1960-luvulta 2010-luvulle.

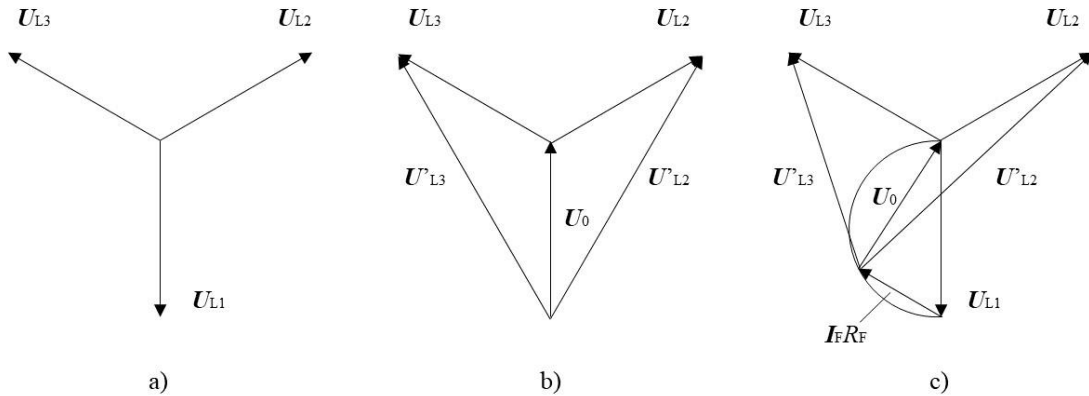
## 2 SUOJUKSEN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa sekä sammutetussa verkossa. Lisäksi luvussa käsitellään kaksoismaasulkua ja johtimen katkeamista verkon suojauksen ja käytön näkökulmasta. Tämän jälkeen luvussa käydään läpi pika- ja aikajälleenkytkennät ja sen jälkeen aika- ja virtaselektiivisyys säteittäisessä verkossa.

### 2.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa

Maasulku määritellään SFS6001:2018-standardin sivulla 21 viaksi, ”-- joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin pienenemisestä alle määrätyn raja-arvon”. Alaluvuissa 2.1, 2.2 ja 2.3 keskitytään yksivaiheiseen maasulkuun, missä nimensä mukaisesti yksi vaihe joutuu johtavaan yhteyteen maan kanssa. Suomen olosuhteissa käytetään keskijänniteverkon maadoituksessa useimmiten joko maasta erotettua tai sammutettua verkkoa, jolloin keskijänniteverkossa ei ole tähtipistemaadoitusta eikä nollajohdinta, mikä tekee maasulusta luonteeltaan erilaisen kuin oikosulku (Lakervi & Partanen, 2008: 176 & 182). Maasulku voi syntyä esimerkiksi avojohtimen pudotessa suojamaadoitetulle laitteelle, salaman aiheuttaessa valokaaren vaihejohtimen ja suojamaadoitetun laitteen välille, avojohtimen pudotessa maahan tai maakaapelin eristyksen pettäessä.

Maasulku voi olla joko suora tai maasulku voi syntyä vikaresistanssin kautta, jolloin vaiheen ja maan välillä on vikaresistanssi  $R_F > 0 \Omega$ . Suorassa maasulussa vaiheen jännitteeksi tulee nolla ja maan jännitteeksi eli tähtipistejännitteeksi  $U_0$  tulee maasulussa olevan vaiheen jännite. Vikaresistanssin kautta olevassa maasulussa tähtipistejännite on suoraa maasulkua pienempi. Kuvassa 1 on piirretty osoitinpiirroksilla vaihejännitteet terveessä tilassa, vaihejännitteet ja tähtipistejännite suorassa maasulussa, sekä vaihejännitteet, tähtipistejännite ja vikaresistanssin ja sen kautta kulkevan maasulkuvirran jännitehäviö vikaresistanssin kautta syntyneessä maasulussa. (Lakervi & Partanen, 2008: 186 – 187.)



Kuva 1. Kuvassa on vaihejännitteiden, tähtipistejännitteen ja vian aikaisten vaihejännitteiden osoitinpiirrokset a) terveessä verkossa, b) suorassa maasulussa ja c) vikaresistanssin kautta olevassa maasulussa (muokattu Lakervi & Partanen, 2008: 187).

Kuvassa 1 terveen tilan vaihejännitteitä kuvataan tunnuksilla  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  ja  $U_{L3}$ , tähtipistejännitettä tunnuksella  $U_0$ , vian aikaisia terveiden vaiheiden vaihejännitteitä tunnuksilla  $U'_{L2}$  ja  $U'_{L3}$ , vikaresistanssia tunnuksella  $R_F$  ja vikaresistanssin kautta kulkevaa maasulkuvirtaa tunnuksella  $I_F$ . Kuvasta voidaan havaita, että a)-kohdan terveessä tilassa vaihejännitteet ovat symmetriset, ne ovat itseisarvoltaan yhtä suuret ja niillä kaikilla on 120 asteen vaihesiirto toisiinsa nähden. Kuvan b)-kohdan suorassa maasulussa tähtipistejännitteestä tulee suuruudeltaan vikaantuneen vaiheen terveen tilan vaihejännitteen suuruisen. Samalla kahden terveenä pysyneen vaiheen vaihejännitteet kasvavat suuruudeltaan terveen tilan pääjännitteiden suuruisiksi. Kuvan 1 c)-kohdassa on kuvattu vikaresistanssin kautta tapahtunutta maasulkua. Siinä vikaresistanssin  $R_F$  ja sen kautta kulkevan maasulkuvirran  $I_F$  aiheuttaman jännitehäviön osoitin sijaitsee aina jossain kohdin kuvaan piirretyllä puolipallon muotoisella viivalla, riippuen vikaresistanssin ja maasulkuvirran suuruudesta. Kuvasta huomataan, että tähtipistejännite on vikaresistanssin kautta tapahtuvassa maasulussa aina pienempi kuin suorassa maasulussa. Lisäksi tietyllä vikaresistanssin arvolla toisen terveenä pysyvän vaiheen jännite voi maasulun aikana kasvaa suuruudeltaan jopa hieman terveen tilan pääjännitettä suuremmaksi. Suurimmillaan terveen vaiheen jännite voi kasvaa 1,05-kertaiseksi verrattuna terveen tilan pääjännitteeseen ja tämä saavutetaan, kun vikaresistanssin suuruus on noin 37 % johtimien maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista (Mörsky 1992: 301).

Suorassa maasulussa maasulkuvirran  $I_F$  suuruus riippuu päämuuntajan perään kytketyn galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuudesta ja verkossa käytettyjen johtimien ominaisuuksista (Lakervi & Partanen, 2008: 186). Maasulkuvirran itseisarvon suuruus suorassa maasulussa on suoraan verrannollinen galvaanisesti yhtenäisen verkon maakapasitanssista:

$$I_F = \sqrt{3} \cdot \omega C_0 U, \quad (1)$$

missä  $I_F$  on maasulkuvirran itseisarvon suuruus,  $\omega$  on kulmataajuus  $2\pi f$ ,  $C_0$  on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi ja  $U$  on verkon pääjännite (ABB, 2000: 248).

Keskijänniteverkossa käytetty avojohto tuottaa maasulkuvirtaa keskimäärin 0,067 A/km (Elovaara & Haarla, 2011b; 428). Maakaapelien tuottama maasulkuvirta vaihtelee kaapelityypin mukaan. Tietyille kaapeleille on laskettu ja taulukoitu niiden tuottamat maasulkuvirrat valmiiksi ja esimerkiksi Outokummun Energian verkossa käytössä oleva APY-AKMM 3x95 mm<sup>2</sup> tuottaa maasulkuvirtaa 3,2 A/km ja nykyaikainen AHXAMK-W vastaavalla 3x95 mm<sup>2</sup> poikkipinta-alalla tuottaa maasulkuvirtaa 2,3 A/km (ABB, 2000: 250). ABB:n vuonna 2000 julkaiseman *Teknisiä tietoja ja taulukoita* -kirjan sivulta 250 löytyvästä taulukosta havaitaan, että pääsääntöisesti saman kaapelityypin maakaapeleilla niiden tuottamat maasulkuvirrat kasvavat kaapelin poikkipinta-alan kasvaessa.

Nämä ilmoitetut johtimien tuottamat maasulkuvirrat pätevät suorassa maasulussa, mutta vikaresistanssin kasvaessa maasulkuvirrat pienenevät (Lakervi & Partanen, 2008: 186). Vikaresistanssin kautta olevassa maasulussa maasulkuvirran itseisarvon suuruus saadaan laskettua:

$$I_F = \frac{\sqrt{3} \cdot \omega C_0}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_F)^2}} \cdot U, \quad (2)$$

missä  $I_F$  on maasulkuvirran itseisarvon suuruus,  $\omega$  on kulmataajuus  $2\pi f$ ,  $C_0$  on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi,  $R_F$  on vikaresistanssi ja  $U$  on verkon pääjännite (ABB, 2000: 249).



vioittuneen johtolähdön itsensä tuottamaa osuutta maasulkuvirrasta. Kuvan mukaisesti summavirtamittaus mittaa vioittuneen johtolähdön tuottaman maasulkuvirran  $I_j$  molempiin suuntiin, joten summavirran  $I_0$  suuruudeksi jää taustaverkon tuottaman maasulkuvirran  $I_v$  itseisarvon suuruus. (ABB, 2000: 252; Lakervi & Partanen, 2008: 190 – 192.)

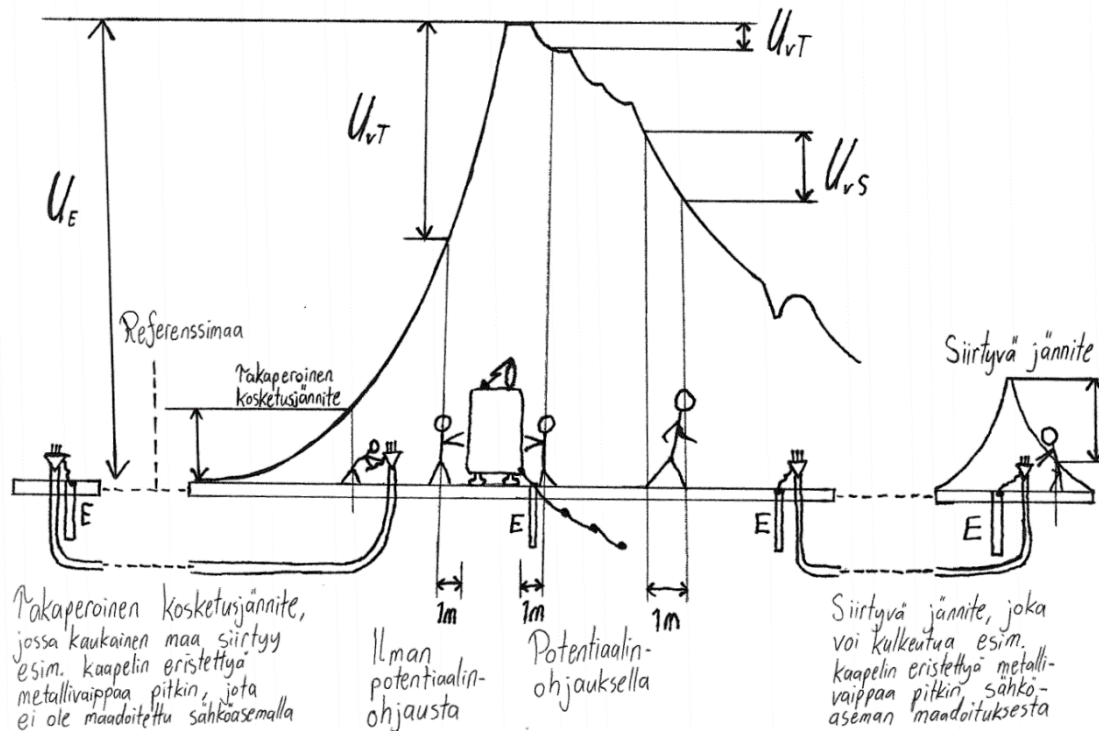
SFS6001-standardissa (2018) määritellään erikseen termit maasulkuvirralla  $I_F$  ja maavirralla  $I_E$ . Maasulkuvirralla  $I_F$  tarkoitetaan maasulkupaikassa maahan tai maadoitettuuhin osiin kulkevaa virtaa. Maavirralla  $I_E$  taas tarkoitetaan ”maadoitusimpedanssin kautta maahan kulkevaa virtaa”. Standardissa tarkennetaan, että maasulkuvirta voi vikapaikassa jakaantua kulkemaan kahta reittiä siten, että osa maasulkuvirrasta kulkee maadoitusimpedanssin kautta maahan (maavirta) ja osa maasulkuvirrasta kulkee esimerkiksi maakaapelin metallista vaippaa pitkin kohti sähköasemaa ja kaapelipäätteen maadoituksia tai vastaavasti suurjännitelinjojen ukkosjohtimia pitkin. Tässä työssä käytetään jatkossa yksinkertaisuuden vuoksi pääosin termiä maasulkuvirta. Outokummun Energian keskijänniteverkon johtolähdöistä suurin osa on avolinjaa tai sekaverkkoa, joten termien maasulkuvirta ja maavirta pitäminen erillään ei ole mielekäästä, koska avojohdoissa niillä ei käytännössä ole eroa. (SFS6001, 2018: 21, 22, 24.)

Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa maadoitusjännitteen (SFS6001, 2018: 21 – 22; Lakervi & Partanen, 2008: 187). Maadoitusjännitteen suuruus on suoraan verrannollinen sekä maasulkuvirran suuruuteen että vikapaikan maadoitusimpedanssiin (SFS6001, 2018: 94). Maadoitusimpedanssilla tarkoitetaan käytännössä maadoituksen ja tarpeeksi kaukana sijaitsevan referenssimaan välistä impedanssia (SFS6001, 2018: 19). Useimmissa oppikirjoissa puhutaan suoraan maadoitusresistanssista, mikä on maadoitusimpedanssin resistiivinen osuus (ks. SFS6001, 2018: 18; Elovaara & Haarla, 2011b: 428; Lakervi & Partanen, 2008: 187). Tämä johtune siitä, että useimmissa tapauksissa voidaan olettaa maadoitusimpedanssin reaktiivisen osuuden olevan merkitsemättömän pieni maadoitusjännitteen laskemisessa, jolloin pelkkä maadoitusresistanssin tarkastelu riittää. Maasulkuvirran aiheuttama maadoitusjännite maasulkupaikassa saadaan laskettua:

$$U_E = I_F \cdot R_E, \quad (3)$$

missä  $U_E$  on maadoitusjännite,  $I_F$  on maasulkuvirta ja  $R_E$  on maadoitusresistanssi (Lakervi & Partanen, 2008: 187). Kaavasta 3 havaitaan, että maadoitusjännitteen itseisarvon suuruutta saadaan pienennettyä joko maasulkuvirtaa pienentämällä tai maadoitusresistanssia pienentämällä. Maadoitusresistanssin suunnittelun ja laskemisen perustana on maan ominaisresistanssi, joka on Suomessa useimmiten hyvin suuri (Elovaara & Haarla, 2011b: 432). Maadoitusresistanssia voidaan kuitenkin pienentää parantamalla maadoituksia upottamalla maahan maadoituselektrodeja, jotka voivat olla esimerkiksi pystysuoria tankoja tai maan pinnan myötäisesti kulkevia suorja johtimia (Elovaara & Haarla, 2011b: 432 – 435; SFS6001, 2018: 121 – 124).

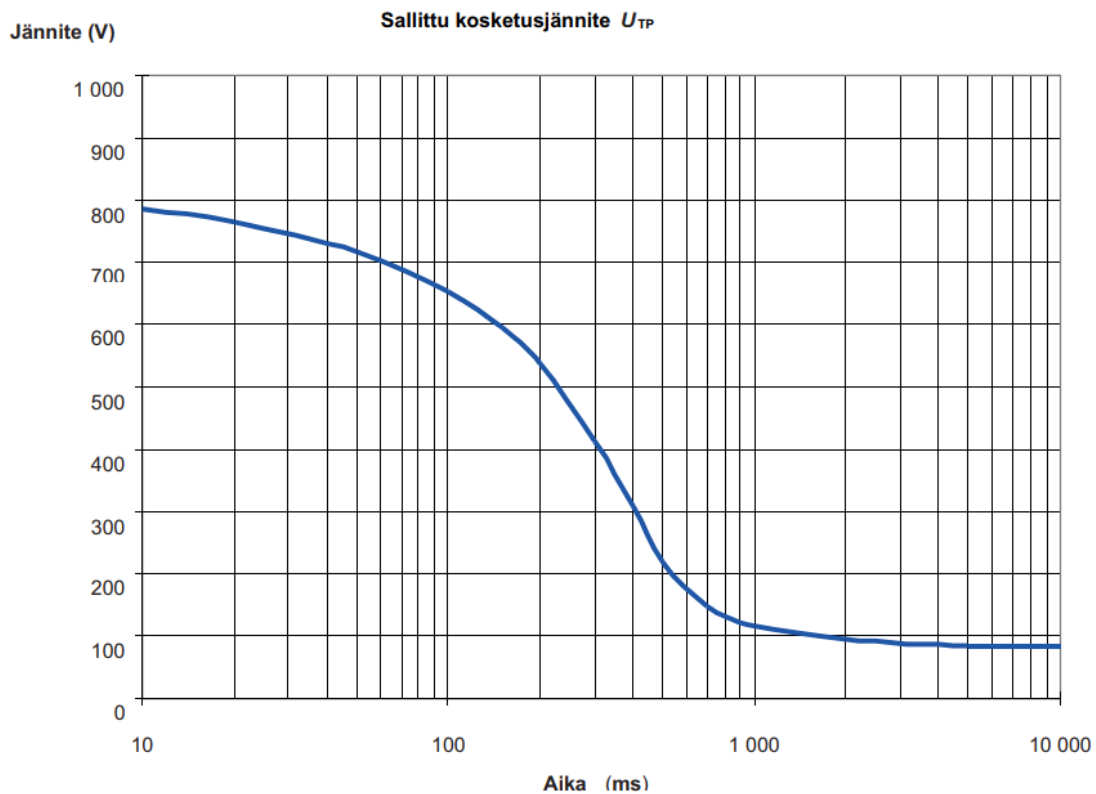
Maadoitusjännite aiheuttaa ihmiselle vaarallisia vaarajännitteitä, joita ovat kosketusjännite, askeljännite, takaperoinen kosketusjännite ja siirtyvät jännitteet. Kosketusjännite vaikuttaa ihmiskehon kosketuskohdan ja maan välillä kosketustilanteessa. Askeljännite on puolestaan kosketusjännitettä, joka esiintyy toisistaan metrin etäisyydellä olevien pisteiden välillä, jotka ovat samanaikaisesti jaloilla kosketeltavissa. Takaperoisella kosketusjännitteellä tarkoitetaan tilannetta, jossa maasulkupaikan läheisyyteen on tuotu jokin kaukana maadoitettu eristetty johde tai johdin, kuten vesijohto, jolloin maan pinnan potentiaali on ihmisen kohdalla edelleen koholla ja hän pääsee samanaikaisesti koskemaan kauas referenssi maahan maadoitettua vesijohdon metallivaippaa. Siirtyvässä jännitteessä maan potentiaali puolestaan siirtyy eristettyä johdettua tai johdinta, kuten vesijohtoa, pitkien kauas maasulkupaikasta ja tämä potentiaali voi olla kosketeltavissa esimerkiksi vesijohdon toisessa päässä. Kuvassa 3 on havainnollistettu erilaisia tilanteita, joissa näitä edellä lueteltuja vaarajännitteitä voi päästä syntymään. (Elovaara & Haarla, 2011b: 428; SFS6001, 2018: 19 & 23.)



Kuva 3. Maadoitusjännite aiheuttaa erilaisia vaarajännitteitä, kun maan potentiaali vaihtelee eri pisteissä tai kun kosketeltavissa olevien johtavien osien potentiaali poikkeaa maan potentiaalista (muokattu SFS6001, 2018: 23).

Kuvassa 3 on esitetty tilanne, missä sähkölaitteeseen syntyy maasulku ja millaisia vaarajännitteitä maasulussa ilmenee. Kuvassa  $U_E$  tarkoittaa maadoitusjännitteen suuruutta, joka aiheuttaa virrallisen maaelektrodin ympärille suppilon mallisen potentiaalijakauman. Kosketusjännitteen suuruutta on kuvattu tunnuksella  $U_{vT}$ . Kuvasta havaitaan, että kosketusjännitteen suuruutta saadaan pienennettyä potentiaaliohjauksella. Askeljännitteen suuruutta kuvataan tunnuksella  $U_{vS}$ . Askeljännitteen muodostumisen voi estää, jos ihminen ymmärtää poistua maajännitteen vaikutusalueelta yhdellä jalalla tai tasajalkaa hyppien. Kuvan 3 oikeassa laidassa on kuvattu siirtymä jännitettä, joka siirtyy eristettyä johdetta tai johdinta pitkin kauas maasulkupaikasta. Siirtymä jännitteen suuruus riippuu maapotentiaaliohjauksen suuruudesta siinä pisteessä, missä eristetty johde on maadoitettu. Kuvan vasemmassa laidassa on kuvattu takaperoista kosketusjännitettä, missä referenssimaa siirtyy eristettyä johdetta tai johdinta pitkin maasulkupaikkaan, missä sitä ei ole maadoitettu, jolloin vikapaikan maan ja kaukana maadoitetun johtavan materiaalin välillä on potentiaaliero. (Elovaara & Haarla, 2011b: 428 – 429; SFS6001, 2018: 19 & 23.)

SFS6001-standardissa (2018) on sivulla 93 kuvaaja, josta voi lukea suurimman sallitun kestoajan tietyn suuruiselle kosketusjännitteelle. Tämä kuvaaja on esitetty kuvassa 4. Kosketusjännitteen suuruuden ja kestoajan raja-arvojen perusteena on käytetty sähkön vaarallisuutta ihmiselle (Elovaara & Haarla, 2011b: 429). Kuvan 4 kuvaajasta havaitaan, että kosketusjännitteen käyrä laskee melko loivasti 100 millisekuntiin asti, jonka jälkeen käyrä jyrkkenee voimakkaasti noin 700 millisekuntiin saakka. Esimerkiksi 30 millisekunnin pituinen kosketusjännite saa olla enintään noin 750 voltia, 200 millisekunnin pituinen kosketusjännite saa olla enintään noin 550 voltia ja 700 millisekuntia kestävä kosketusjännite saa olla enää korkeintaan noin 150 voltia.



Kuva 4. Kuvaajassa on pystyakselilla kosketusjännite  $U_{Tp}$  ja vaaka-akselilla sen suurin sallittu kestoaika (SFS6001, 2018: 93).

Kuvan 4 kuvaaja määrittää suurimman sallitun kestoajan tietyn suuruisille kosketusjännitteille. SFS6001-standardissa (2018) pidetään maasta erotetun verkon maadoitusjärjestelmää ja sen kosketusjännitteiden kestoaikoja oikein suunniteltuna, kun seuraava ehto täyttyy:

$$U_E < 2 \cdot U_{Tp}, \quad (4)$$

missä  $U_E$  on maasulkupaikan maadoitusjännite ja  $U_{Tp}$  suurin sallittu kosketusjännite (SFS6001, 2018: 94). Mikäli kaavassa 4 esitetty ehto ei täyty, voidaan maadoitusjännitettä yrittää pienentää aiemmin esitellyn kaavan 3 mukaisesti joko maasulkuvirtaa tai maadoitusresistanssia pienentämällä. Jos maadoitusjännitettä ei saada pienennettyä tarpeeksi, voidaan lyhentää suojareleen toiminta-aikaa maasulkutilanteessa, jolloin kosketusjännitteen kesto-aika lyhenee ja suurimman sallitun kosketusjännitteen  $U_{Tp}$  suuruus kasvaa kuvan 4 mukaisesti. Mikäli kumpikaan edellä esitettyistä toimenpiteistä ei ole toteutettavissa tai kaavassa 4 esitetty ehto jää toimenpiteistä huolimatta täyttymättä, täytyy seuraavaksi pyrkiä täyttämään ehto:

$$U_E < 4 \cdot U_{Tp}, \quad (5)$$

missä  $U_E$  on maasulkupaikan maadoitusjännite ja  $U_{Tp}$  on suurin sallittu kosketusjännite. Kaavassa 5 esitetyn ehdon täyttymisen lisäksi täytyy huolehtia SFS6001-standardin (2018) sivuilla 113 – 115 esitettyjen erityistoimenpiteiden M täyttymisestä. Mikäli kaavassa 5 esitettyä ehtoa ei saada täytettyä, täytyy määrittää todellinen kosketusjännite  $U_T$  ja saada sen arvo pienemmäksi tai yhtä suureksi kuin suurin sallittu kosketusjännite  $U_{Tp}$  ja tämän lisäksi täytyy määrittää kehon kautta kulkeva virta  $I_B$  ja saada sen arvo pienemmäksi tai yhtä suureksi kuin sallittu kehon virta  $I_{Bp}$ . (SFS6001, 2018: 94.)

Vaikka maasulun aikana keskijänniteverkossa esiintyy voimakasta jännite-epäsymmetriaa, ovat jakelumuuntajien pienjännitepuolen jännitteet edelleen normaalit, kun jakelumuuntajan ensiökäämit on kytketty kolmioon. Tällöin ensiöpuolen käämien yli oleva jännite on pääjännitteen suuruinen myös maasulun aikana. Lisäksi maasulun aikaisten vikavirrat ovat sen verran pieniä, että ne eivät vahingoita laitteita, joten jos johtolähdöllä on jakeluverkon asiakkaina ainoastaan pienjänniteverkkoon liittyneitä kuluttajia, voitaisiin verkon käyttöä jatkaa normaalisti myös maasulun aikana. Ainoan rajoituksen verkon käytölle asettaa maasulun aikaisten vaarajännitteiden ilmeneminen ja sähkön jakelu joudutaan lopulta keskeyttämään kosketusjännitteen suurimman sallitun kestoajan jälkeen. (Lakervi & Partanen, 2008: 189.)

## 2.2 Maasulku sammutetussa verkossa

Sammutettu verkko on maasta erotetun verkon erityismuoto ja siinä verkon tähtipisteeseen kytketään induktanssi (sammutuskela), jonka tarkoitus on kompensoida verkon johtojen maakapasitanssien reaktanssia (Lakervi & Partanen, 2008: 182). Koska verkkoon kytkettyjen johtojen pituudet ja lajit ja sen myötä myös verkon maakapasitanssi saattavat eri käyttötilanteissa vaihdella, kannattaa myös sammutuksessa käytettävän induktanssin oltava säädettävissä, jolloin sammutuskelana käytetään niin kutsuttua Petersenin kela (Elovaara & Haarla, 2011a: 210). Useimmiten 110/20 kV päämuuntajien kytkentäryhmä on Suomessa YNd11, jolloin keskijännitepuolelta ei saada tähtipistettä esille (Mörsky, 1992: 320). Tällöin sammutuskelaa varten rakennetaan ZN-kytkentäinen maadoitusmuuntaja, jonka tähtipisteeseen sammutuskela kytketään (Elovaara & Haarla, 2011a: 210; Mörsky, 1992: 321).

Sammutetussa verkossa verkon maakapasitanssien kautta kulkeva virta  $I_C$  ja sammutuskelan kautta kulkeva virta  $I_L$  ovat lähes 180 asteen vaihesiirrossa. Sekä virta  $I_C$  että virta  $I_L$  sisältävät pienet resistiiviset osuudet, jotka syntyvät verkon komponenttien resistansseista. Jos virrat  $I_C$  ja  $I_L$  ovat itseisarvoiltaan yhtä suuret, puhutaan täysin kompensoidusta verkosta. Täysin kompensoidussa verkossa pätee kaava:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (6)$$

missä  $\omega$  on kulmataajuus,  $L$  on sammutuskelan induktanssi ja  $C$  on koko verkon maakapasitanssi (muokattu Elovaara & Haarla, 2011a: 210). Verkko voidaan jättää myös hieman alikompensoiduksi, jolloin sammutuskelan reaktanssia ei säädetä aivan yhtä suureksi kuin maakapasitanssien reaktanssia. Tällaisella sivuunvirityksellä pyritään siihen, että terveen tilan tähtipistejännite  $U_0$  saadaan pienemmäksi kuin resonanssissa. (ABB, 2000: 254; Elovaara & Haarla, 2011a: 210; Mörsky, 1992: 314.)

Sammutetussa verkossa maasulkuvirta saadaan pienennettyä noin 5 – 10 % suuruiseksi vastaavan maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta (Mörsky, 1992: 315). Jäljelle jäävä maasulkuvirta saadaan laskettua:



Kuvassa 5 on sammutuskelan rinnalla vastus  $R_L$  sekä kytkin lisävastukselle, jolla kuvataan sammutuskelan rinnalle kytkettävää lisävastusta. Lisävastuksella pyritään kasvattamaan maasulkuvirran pätökomponenttia, jotta johtolähtöjen suojaus pystytään paremmin mittaamaan ja tunnistamaan maasulkuvirran ja sen avulla päättämään maasulkuvian suunnan. Lisävastus voidaan pitää normaalisti irtikytkettynä, jolloin se kytketään sammutuskelan rinnalle sen jälkeen, kun nollajänniterele on havainnut tähtipistejännitteen nousun ja odottanut mahdollisen vian automaattisen poistumisen. (Mörsky, 1992: 316 – 317.) Lisävastus voidaan myös pitää jatkuvasti rinnalle kytkettynä ja tarvittaessa käyttää lisävastusta vian aikana hetkellisesti irti, jotta vian automaattiselle poistumiselle saadaan annettua parempi mahdollisuus.

Verkon sammuttamisella saavutetaan useita etuja verrattuna maasta erotetun verkon käyttöön. Sammutetussa verkossa maasulkuvirtoja saadaan pienennettyä kuten kaavassa 7 on esitetty ja tällöin myös maadoitusjännitteet pienenevät kaavan 3 mukaisesti, jolloin ihmiselle aiheutuvat vaarajännitteetkin pienenevät. Pienentyneiden kosketusjännitteiden ansiosta maasulun laukaisuaikojä voidaan halutessa kasvattaa kuvassa 4 esitellyn käyrän mukaisesti. Toinen merkittävä etu on lyhytaikaisten jakelukeskeytysten lukumäärän vähentyminen, koska verkon valokaariviat poistuvat useammin itsestään ilman, että verkkoa tarvitsee käyttää jännitteettömänä (Mörsky, 1992: 321). Seppo Hänninen on tutkinut väitöskirjassaan (2001) muun muassa maasta erotetun ja sammutetun 20 kV keskijänniteverkon itsestään sammuvia valokaarivikoja ja niiden vikavirtojen suuruuksia. Hännisen (2001: 38 – 39) mukaan maasta erotetussa verkossa suurin itsestään sammuva maavirta on 9,5 ampeeria ja sammutetussa verkossa 23,8 ampeeria. Kun ohimenevä vika poistuu itsestään ennen kuin katkaisijoiden tarvitsee suorittaa esimerkiksi pikajälleenkytkentä, niin samalla vähenee myös katkaisijan mekaanisten osien kuluminen (Mörsky, 1992: 321).

Outokummun Energian kaikkien sähköasemien keskijänniteverkko on sammutettu keskitetysti sähköasemilla sijaitsevilla Petersenin keloilla. Kaikkien johtolähtöjen suojauslaitteilla on sammutettuun verkkoon suunnitellun suojauksen lisäksi myös maasta erotetun verkon suojausasettelut, jotka kytkeytyvät automaattisesti päälle, jos sähköaseman sammutuskela syystä tai toisesta putoaa verkosta.

### 2.3 SFS6001-standardin mukainen maadoitusjännitteeseen liittyvän virran laskeminen

Kuten aiemmin alaluvussa 2.2 esitettiin, yksi syy sammutetun verkon käyttämiseen Suomen tyypillisesti heikoissa maadoitusolosuhteissa on maasulkuvirtojen pieneneminen maasta erotettuun verkkoon verrattuna. SFS6001-standardissa (2018) annetaan sivulla 90 olevassa taulukossa 5 ”Maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat (SFS-EN 50522 taulukko 1)” laskentakaavoja erilaisten suurjännitejärjestelmien maadoitus- ja kosketusjännitteisiin liittyvien virtojen laskennalliseen määrittämiseen. Suurjännitteellä tarkoitetaan standardissa yli 1 000 voltin vaihtojännitettä (SFS6001, 2018: 13). Maasta erotetulle järjestelmälle annetaan standardissa seuraava kaava:

$$I_E = r \cdot I_C, \quad (8)$$

missä  $I_E$  on maavirran itseisarvon suuruus,  $r$  on reduktiokerroin ja  $I_C$  on lasketun tai mitatun kapasitiivisen maasulkuvirran itseisarvon suuruus (SFS6001, 2018: 90). Reduktiokertoimen tarkoituksena on erotella maasulkuvirrasta se osuus, joka maasulkupaikassa kulkee mahdollisen maadoitusimpedanssin kautta maahan aiheuttaen maadoitusjännitteen siitä maasulkuvirran osuudesta, joka lähtee kulkemaan esimerkiksi kaapelin metallivaippaa pitkin kohti sähköasemaa ja kaapelipäätteen maadoituksia (SFS6001, 2018: 24). Reduktiokertoimille on annettu taulukko SFS6001-standardin (2018) liitteessä I sivuilla 119 ja 120, josta löytyy tyypillisiä arvoja tietyille ilmajohdoille ja maakaapeleille. Jake-luverkoissa käytettyjä maakaapeleita lähimmäksi osuu ”Paperieristeinen 20 kV kaapeli Al 95 mm<sup>2</sup> / 1,2 mm alumiinivaippa”, jonka reduktiokertoimeksi annetaan  $r = 0,20 - 0,30$ .

Sammutetulle järjestelmälle annetaan maadoitus- ja kosketusjännitteisiin liittyvän virran laskemiseksi kaksi kaavaa:

$$I_E = r \cdot I_{RES}, \quad (9)$$

$$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2}, \quad (10)$$

missä  $I_E$  on maavirran itseisarvon suuruus,  $r$  on reduktiokerroin,  $I_{RES}$  on maasulun jäännösvirran itseisarvon suuruus ja  $I_L$  on kyseessä olevan sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa (SFS6001, 2018: 90). Jos tarkkaa  $I_{RES}$  arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta  $I_C$  (SFS6001, 2018: 90). Jäännösvirran  $I_{RES}$  laskeminen on esitelty tämän työn kaavassa 7.

Taulukon mukaan kaavaa 9 käytetään ”sammutetuissa järjestelmissä ilman sammutuskeloja” ja kaavaa 10 ”sammutetuissa järjestelmissä, joissa on sammutuskelat”. Kaavassa 10 on huomiota herättävää, että sammutetun järjestelmän maavirran suuruuden laskennallisessa määrittämisessä täytyy laskea neliöllinen summa kaavassa 7 esitetyn jäännösvirran suuruudesta  $I_{RES}$  ja sähköaseman sammutuskelojen yhteen lasketusta nimellisvirrasta  $I_L$ . Kaavat 7 ja 10 ovat molemmat SFS6001-standardista (2018: 25, 90), mutta ne vaikuttavat siitä huolimatta olevan voimakkaasti ristiriidassa keskenään. Kaavassa 7 esitellään maasulkuvirran laskemiselle kaava, missä maasulkuvirta saadaan pienennettyä sammuttamisen ansiosta. Tämän jälkeen esitellään kaava 10, missä kaavalta 7 viedään koko pohja ja ajatus pois. Tämä ristiriita SFS6001-standardin (2018) sivuilla 25 ja 90 esitettyjen kaavojen 7 ja 10 välillä vaikeutti minun tulkintaani standardista, koska en ymmärtänyt missä tilanteissa kaavaa 10 tulee käyttää ja milloin se on edes mahdollista. Kun standardissa kuitenkin erikseen mainitaan, että maadoitus- ja kosketusjännitteiden määrittelyssä ovat olennaisia taulukossa 5 esitetyt virrat, niin tulkitsin, että sammutetuissa järjestelmissä tulee aina käyttää kaavaa 10, koska en ymmärtänyt mitä standardissa tarkoitetaan ”sammutetulla järjestelmällä ilman sammutuskeloja” (SFS6001, 2018: 92).

Tässä vaiheessa päätin kysyä asiaa SESKO:lta, joka on laatinut SFS6001:2018 -standardin. Löysin SESKO:n internetsivuilta SESKO:n teknisen johtajan Tapani Nurmen yhteystiedot ja kysyin häneltä sähköpostitse kaavojen 7 ja 10 ristiriidasta. Samassa sähköpostiviestissä kysyin, että mitä standardissa tarkoitetaan sammutetuilla järjestelmillä, joissa ei ole sammutuskeloja ja joissa on sammutuskelat. Tapani Nurmi ohjasi kysymykseksi Kiwa Inspectalla sähkölaiteistotarkastajana ja -kouluttajana työskentelevälle Rauno Järviluomalle. Järviluoma neuvoi tulkitsemaan standardia siten, että kaavaa 10 käytetään niillä jakelumuuntamoilla, joissa on hajautettu sammutuskela. Kaavaa 9 käytetään silloin, kun käytössä on keskitetty ja automaattisesti säätyvä sammutuskela. (Järviluoma, 2020.)

Haluan kiittää Järviluomaa tulkinta-avusta, sillä kyseisen kohdan tulkitseminen SFS6001-standardissa (2018) tuotti allekirjoittaneelle suuria vaikeuksia. En osaa oikeastaan vieläkään luotettavasti sanoa, että missä tilanteissa ja millä tavalla kaavaa 10 pitäisi hajautetussa sammutuksessa käyttää, koska kaavassa käytetty  $I_L$  määritellään koko sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirran summaksi. Jos verkkoyhtiöllä on saman sähköaseman useammalla johtolähdöllä käytössään hajautettuja sammutuskeloja, niin näiden nimellisvirtojen summa kasvaa nopeasti sammutetun järjestelmän jännösvirran suuruutta  $I_{RES}$  määräävämmäksi tekijäksi. Mikäli kaavassa 10 on tarkoitus ottaa huomioon vain tarkasteltavan muuntamon läheisyydessä oleva hajautettu sammutuskela eikä kaikkien johtolähtöjen sammutuskeloja, niin tällöin  $I_L$ :n määritelmässä ei pitäisi puhua sähköaseman rinnakkaisista sammutuskeloista. Lisäksi koen, että lauseet ”järjestelmät ilman sammutuskeloja” ja ”järjestelmät, joissa on sammutuskelat” johdattavat lukijaa turhan herkästi väärille poluille, sillä ainakin itse kuvittelin myös sähköasemalle keskitetyn sammutuksen kuuluvan sammutettuihin järjestelmiin, joissa on sammutuskeloja. Kehotan tässä työssäni SESKO:a korjaamaan edellä mainittua kohtaa muotoilultaan yksiselitteisemmäksi ja ymmärrettävämmäksi, jotta vastaavilta sekaannuksilta ja väärinymmärryksiltä voitaisiin seuraavien painosten ilmestyttyä välttyä. (SFS6001, 2018: 90.)

#### 2.4 Kaksoismaasulku

Kaksoismaasulussa verkossa on samaan aikaan kaksi erillistä maasulkuja eri vaiheissa (Elovaara & Haarla, 2011b: 342). Kaksoismaasulku alkaa tyypillisesti yksivaiheisena, minkä jälkeen terveiden vaiheiden jännitteiden nousu aiheuttaa toisen maasulun eri kohdassa verkkoa (Mörsky, 1992: 306). Kaksoismaasuluissa vikavirta on yleensä suuri ja se voi olla suuruusluokaltaan oikosulkuvirran suuruinen (Lakervi & Partanen, 2008: 198). Näin ollen samalla johtolähdöllä sattuva pienresistanssinen maasulku saattaa aiheuttaa oikosulkusuojauksen toiminnan (Mörsky, 1992: 309 – 310). Jos kaksoismaasulun viat ovat eri johtolähdöillä, niin myös tällöin saattaa oikosulkusuojaus toimia, tai sitten johtolähtöjen maasulkusuojaukset toimivat vuoron perään (Mörsky, 1992: 310).

## 2.5 Johtimen katkeaminen avojohtoverkossa

Johtimen katkeaminen avojohtoverkossa aiheuttaa useimmiten maasulun, kun vähintään joko verkon tai kuorman puoleinen pää putoaa maahan. Jos johdin putoaa verkon puolelta maahan, on kyseessä normaali maasulkutilanne ja maasulkusuojauksen pitäisi havaita tällainen vikatilanne helposti. Jos taas johtimen verkon puoleinen pää jää ilmaan ja kuorman puoleinen pää putoaa maahan, pienenevät maasulkuvirta ja nollajännite merkittävästi, mikä vaikeuttaa maasulkusuojauksen havahtumista. (Mörsky, 1992: 311; Elovaara & Haarla, 2011b: 341.)

Toisin kuin perinteisessä maasulussa, johtimen katketessa verkon käyttöä ei voida asiakasjännitteiden perusteella jatkaa normaalisti, koska pienjänniteverkon jännitteet eivät säily normaaleina. Jos jakelumuuntajan ensiökäämit on kytketty kolmioon, niin yhden johtimen katketessa yhden käämin yli vaikuttaa pääjännite ja kahden käämin yli vaikuttaa enää vaihejännite. Tämä aiheuttaa pienjännitepuolelle niin kutsutut ”puolivalot”, joissa yhden vaiheen jännite on normaali ja kahden vaiheen jännitteet ovat noin puolet normaalista jännitteestä. (Lakervi & Partanen, 2008: 189 – 190.)

## 2.6 Pika- ja aikajälleenkytkentä

Verkon ohimenevät viat, kuten avojohtoverkon valokaariviat, saadaan poistettua verkosta käyttämällä vikapaikkaa jännitteettömänä. Kun rele on havainnut verkossa vian ja antanut katkaisijalle käskyn aueta, niin vikapaikan jännitteetön aika alkaa. Pikajälleenkytkennässä (PJK) rele ohjaa katkaisijan uudelleen kiinni, kun katkaisija on ollut auki releelle asetellun jännitteettömän ajan. Pikajälleenkytkennän jännitteettömän ajan tulee olla vähintään valokaaren sammumisen ja ilman deionisoitumisen pituinen, että eristeenä toimiva ilma saavuttaa riittävän jännitelujuuden. Usein jännitteettömäksi ajaksi asetellaan kuitenkin hieman vähimmäisvaatimusta pidempi aika, esimerkiksi 0,5 – 1 sekuntia. Jos rele havaitsee pikajälleenkytkennän jälkeen suojattavalla alueellaan edelleen vian, niin rele ohjaa hidastusajan jälkeen katkaisijan uudelleen auki ja seuraa uusi jännitteetön aika. Tällä kertaa jännitteetön aika on huomattavasti pikajälleenkytkennän jännitteetöntä aikaa

pidempi, tyypillisesti noin 30 – 120 sekuntia ja tätä kutsutaan aikajälleenkytkennäksi (AJK). Aikajälleenkytkennän jännitteettömän ajan jälkeen rele ohjaa katkaisijan vielä kerran kiinni ja yrittää palauttaa suojattavalle alueelle jännitteen. Jos rele havaitsee vian vielä aikajälleenkytkennän jälkeen, niin rele ohjaa katkaisijan auki ja kyseistä vikaa kutsutaan pysyväksi viaksi. (Elovaara & Haarla, 2011a: 74; Lakervi & Partanen, 2008: 177 – 178; Mörsky, 1992: 349 – 354.)

Kun suunnitellaan johtojen oikosulkukestoisuutta, niin suunnittelussa on otettava huomioon myös pika- ja aikajälleenkytkentöjen vaikutus johtimien lämpenemiin. Jälleenkytkentöjen ollessa käytössä oikosulkuvirran kestolle lasketaan niin kutsuttu oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika  $t$ :

$$t = t_1 \cdot e^{\frac{-t_0}{\tau}} + t_2, \quad (11)$$

missä  $t_1$  on oikosulun kesto ennen AJK:n jännitteetöntä aikaa,  $e$  on Neperin luku,  $t_0$  on AJK:n jännitteetön aika,  $\tau$  on johtimen jäähtymisvakio ja  $t_2$  on AJK:n jälkeinen oikosulku-aika. (Lakervi & Partanen, 2008: 177.)

## 2.7 Aika- ja virtaselektiivisyys säteittäisessä verkossa

Säteittäisessä keskijänniteverkossa johtolähdön selektiivisyyttä tarvitaan sähköasemalla sijaitsevan suojareleen ja johtolähdöllä sijaitsevan maastokatkaisijan välillä. Selektiivisyyden tavoitteena on rajata viallinen verkon osuus mahdollisimman pienelle alueelle niin, että sähkön jakelua voidaan jatkaa terveessä verkossa normaalisti.

Aikaselektiivisyydellä tarkoitetaan johtolähdön peräkkäisille suojareleille aseteltujen hidastusten välistä riittävää aikaporrasta. Tarkoituksena on, että kauempana johtolähdöllä sijaitseva rele ehtii toimia ensin ja avata katkaisijansa, kun vika sijaitsee kyseisen suojareleen suojattavalla alueella, jolloin aiemmin johtolähdöllä sijaitseva rele huomaa vian poistuneen ja ehtii pyörtää päätöksensä katkaisijansa avaamisesta. Tällöin vika aiheuttaa keskeytyksen vain myöhemmin verkossa sijaitsevan katkaisijan takana oleville

asiakkaille ja johtolähdön alkupää auenneelle katkaisijalle saakka pysyy jännitteisenä. Jotta aikaselektiivisyys varmasti toimii kahden peräkkäisen suojareleen välillä, tulee näiden välisen aikaportaan olla riittävä. Aikaporrasta määriteltäessä tulee summata yhteen molempien releiden toiminta-aikojen toleranssit, katkaisijan toiminta-aika, releen pyörtöaika, vian poistumisen kestoaika ja suojalaitteiden toiminta-aikojen hajonnasta johtuva varmuusaika. (ABB, 2000: 217 – 222; Mörsky, 1992: 295 – 296.)

Virtaselektiivisyydellä saadaan toteutettua kaikkein suurimpien vikavirtojen selektiivisyys ilman aikaportaan hidastusta johtolähdön alussa olevalla suojareleellä. Virtaselektiivisyydessä yhden ylivirtaportaan virta-asettelu asetellaan niin ylös, että seuraavan releen suojattavalla alueella tapahtuva suurin oikosulkuvirta ei yllä virta-asettelun tasolle. Jos ensimmäinen suojarele havaitsee kyseisestä ylivirtaporrasta suuremman virran, se voi toimia välittömästi, sillä vikapaikka ei voi sijaita seuraavan suojareleen takana. Tällaisella virtaselektiivisyydellä ei yksistään saavuteta kattavaa suojausta, sillä suojausalueet eivät mene päällekkäin eikä suojausta saada aukottomaksi. Virtaselektiivisyyden rinnalla on aina käytettävä aikaselektiivisyyttä. (ABB, 2000: 227 – 228.)

Outokummun Energian keskijänniteverkko on kaikilla johtolähdöillä säteittäinen ja normaalissa käyttötilanteessa kaikki johtolähtöjen välistä varasyöttöä varten rakennetut rengasyhteydet ovat avoimia. Johtolähtöjen suojareleet ovat selektiivisiä sähköaseman syöttökentän suhteen ja tämän lisäksi selektiivisyyttä tarvitaan johtolähdön suojareleen ja johtolähdölle mahdollisesti asennettujen yhden tai useamman maastokatkaisijan välillä. Outokummun Energian verkkoon on kesän 2019 aikana asennettu ensimmäiset maastokatkaisijat ja näiden selektiivisyyteen palataan tarkemmin tämän työn luvussa 4.

### 3 MAASULKUSUOJAUKSEN KEHITTÄMINEN

Alaluvussa 3.1 tarkastellaan Apteekin johtolähdöllä 30.12.2018 tapahtunutta maakaapelivikaa, joka aiheutti koko Ruutu 1 sähköasemaa suojanneen varasuojan toiminnan, kun Apteekin suojarle ei kyennyt tunnistamaan johtolähdöllään ollutta maasulkuua. Alaluvussa pyritään myös selvittämään, mikä epäselektiivisen toiminnan syynä oli. Tämän jälkeen alaluvussa 3.2 keskitytään relesuojauksen kehittämiseen, jolla pyritään parantamaan maasulkusuojausten selektiivisyyttä kaikilla sähköasemilla, ettei vastaavat tapaukset enää jatkossa aiheuttaisi epäselektiivistä toimintaa.

#### 3.1 Miksi Apteekin lähdön suojarle ei havainnut maasulkuua?

Outokummun Energian kaikkien johtolähtöjen maasulkusuojauskset on suunniteltu suunnatuiksi eli johtolähtöä suojaavan suojarleen tulisi kyetä tunnistamaan, onko maasulku omalla johtolähdöllä vai ei. Käytännössä suunnattu maasulkusuojaus toteutetaan siten, että suojarleen havahduttua riittävän suureen nollajännitteeseen ja nollavirtaan, se tarkastelee nollavirran kulmaa suhteessa nollajännitteen kulmaan, minkä avulla suojarle päättelee sille asetellun toimintasektorin mukaisesti, onko maasulun vikavirran tehollisuunta suojattavalle johtolähdölle vai sähköaseman kiskostolle päin (ABB, 2000: 261). Jos vikavirran tehollisuunta on suojarleen sijainnista tarkasteltuna sähköaseman kiskoston suuntaan, niin suojarle ei toimi, koska tällöin maasulku on jollain toisella johtolähdöllä ja kyseisen vikaantuneen johtolähdön suojarleen tulee toimia.

Sähköasemalla on myös koko sähköaseman kiskostoa suojaava suojarle, joka toimii lisäksi varasuojana kaikkien sähköaseman johtolähtöjen maasulkusuojauskelle. Sähköaseman kiskostoa suojaavan suojarleen maasulkusuojaus havahtuu jo pelkästä nollajännitteen noususta. Tämän suojarleen toiminta on suunniteltu johtolähtöjen suojarleiden kanssa aikaselektiiviseksi siten, että johtolähtöjen suojarleet ehtivät toimia ensin ja näin ollen katkaista johtolähdöllään olevan maasulkuvian ennen kuin koko sähköasemaa suojaava suojarle toimii (ABB, 2000: 260).

Joulukuun 30. päivänä vuonna 2018 Apteekin johtolähdöllä olevaan maakaapeliin tuli maasulkuvika noin kolmen kilometrin etäisyydellä sähköasemalta. Apteekin lähtöä suojaava suojarole ei ohjannut katkaisijaansa auki maasulkuvian aikana, jolloin varasuojana toimiva koko sähköasemaa suojaava suojarole päätti toimia, kun se oli ollut havahtuneena nolajännitteen vuoksi sille asetellun hidastusajan verran. Kun sähköverkon päivystäjä sai hälytyksen sähköaseman syöttökentän katkaisijan aukeamisesta, hän ohjasi sähköaseman syöttökentän katkaisijan uudelleen kiinni, minkä jälkeen Apteekin lähdön suojarole havaitsi maasulkuvian ja pysyi havahtuneena sille asetellun hidastusajan verran, ja ohjasi katkaisijansa auki. Tämän jälkeen vikapaikkaa alettiin rajaamaan Apteekin lähdöltä.

Vioittuneesta APYAKMM 3x70 mm<sup>2</sup> -maakaapelista otettiin valokuva heti, kun vioittunut osa maakaapelista saatiin kaivettua esille ja tämä valokuva on esitetty kuvassa 6. Ennen kuin vikapaikka saatiin paikannettua, rajattiin vikaa sulkemalla ja avaamalla muutamia erottimia, joten maakaapeli on valokuvaushetkellä kokenut jo useamman maasulun. Lisäksi, kun vioittunut kaapeliosuus oli saatu rajattua, etsittiin varsinaista vikapaikkaa syöksyaaltogeneraattorilla, joka on myös voinut pahentaa kaapelissa näkyvää vauriota. Kuvasta havaitaan, että kyseessä on yksivaiheinen maasulku, jossa maakaapelin yhden vaihejohtimen eristys on pettänyt, jolloin vaihe on päässyt lyömään läpi maata vasten.



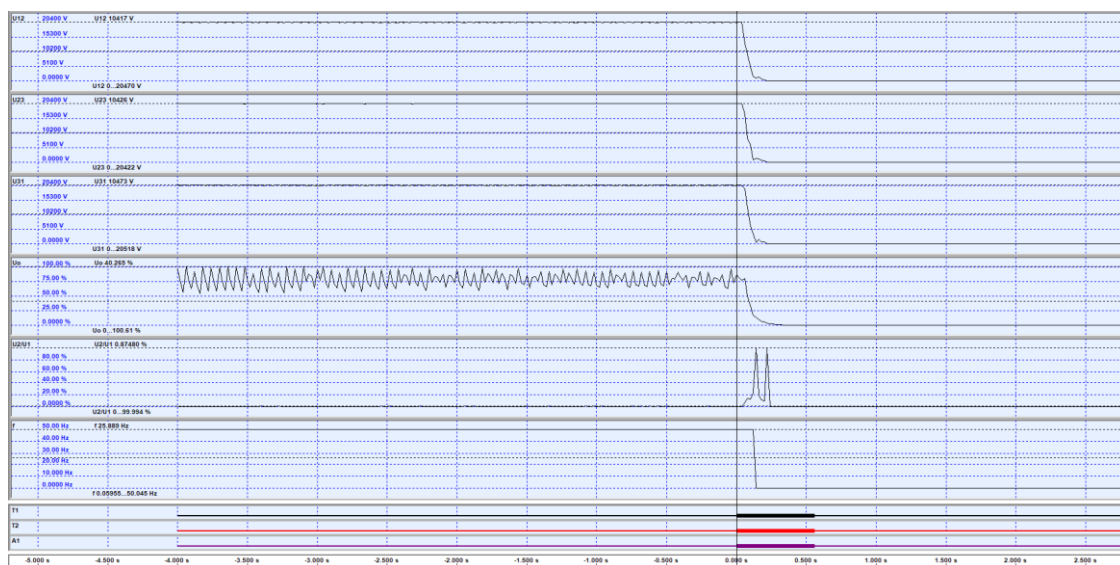
Kuva 6. Apteekin lähdöllä maasulun aiheuttanut vaurioitunut APYAKMM 3x70 mm<sup>2</sup>-maakaapeli.

Apteekin johtolähdön suojausasettelut tapahtumahetkellä on esitetty taulukossa 1. Taulukossa on kaksi eri asetteluryhmää, joista ryhmän 1 suojausasettelut ovat päällä silloin, kun sammutuskela ei ole kytkettynä ja verkon maadoitusjärjestelmä on maasta erotettu. Vastaavasti ryhmän 2 suojausasettelut ovat päällä silloin, kun sammutuskela on kytkettynä ja verkko on sammutettu. Suojausryhmät vaihtuvat suojarielelle automaattisesti sammutuskelan katkaisijan tilatiedon mukaisesti. Vian tapahtumahetkellä syöttävä sähköasema Ruutu 1 oli sammutettu, joten suojarielellä on ollut ryhmän 2 mukaiset suojausasettelut.

Taulukko 1. Apteekin johtolähdön suojusteiden suojustasettelut.

Suojuste	VAMP255	
	RYHMÄ 1	RYHMÄ 2
Oikosulkusuojaus		
I>/A	150	150
t/s	0,34	0,34
I>>/A	900	900
t/s	0,04	0,04
Maasulkusuojaus		
U <sub>o&gt;</sub> / %	20	20
I <sub>o</sub> /A	2,0	0,5
Peruskulma φ	90	0
t/s	0,3	0,7
PJK/ s	0,5	0,5
AJK/ s	120	120

Vika alkoi 30. joulukuuta 2018 kello 14.27, jolloin koko sähköaseman varasuojana toimiva suojuste päätti toimia ja ohjata sähköaseman päämuuntajan syöttökentän katkaisijan auki. Kaikki Ruutu 1 sähköaseman suojusteet käyttävät nollajännitteenä saman mittauskentän mittaamaa nollajännitettä. Sähköaseman varasuojaa havahtui mittauskentän toimittamaan nollajännitteeseen ja oltuaan havahtuneena varasuojalle määritellyn 4 sekunnin hidastusajan verran, se katkaisi jännitteet koko sähköasemalta. Kuvassa 7 on kuvakaappaus mittauskentän mittauksista, joiden tallennus on alkanut nollajännitteen nousuun havahtumisesta, jonka perusteella sähköasemaa suojaava suojuste laukesi. Kuvasta 7 nähdään, että nollajännite  $U_0$  on ollut koko mittauksen ajan 50 prosentin ja 100 prosentin välillä. Taulukon 1 mukaisesti Apteekin suojusteiden nollajännitteen havahtumisarvo on 20 prosenttia, joten kuvan 7 mukainen nollajännitteen taso on reilusti havahtumisarvoa korkeammalla. Apteekin suojustetta ei ole määritelty toimimaan pelkän nollajännitteen perusteella, joten nollajännitteen lisäksi releelle asetellun nollavirran havahtumisarvon tulee ylittyä, ennen kuin suojusteelle määritelty 0,7 sekunnin hidastusaika alkaa kulumaan.



Kuva 7. Mittauskentän tallentama tapahtuma kello 14.27, missä kolme ylintä käyrää ovat pääjännitteet  $U_{12}$ ,  $U_{23}$  ja  $U_{31}$ , neljäs käyrä on nollajännite  $U_0$ , viides on  $U_2/U_1$  ja kuudes käyrä on taajuus  $f$ . Alhaalla kulkeva aika-akseli alkaa  $-5,0$  sekunnista, mittaukset alkavat  $-4,0$  sekunnin kohdalla ja katkaisijan avaamiskäsky tapahtuu  $0,0$  sekunnin kohdalla.

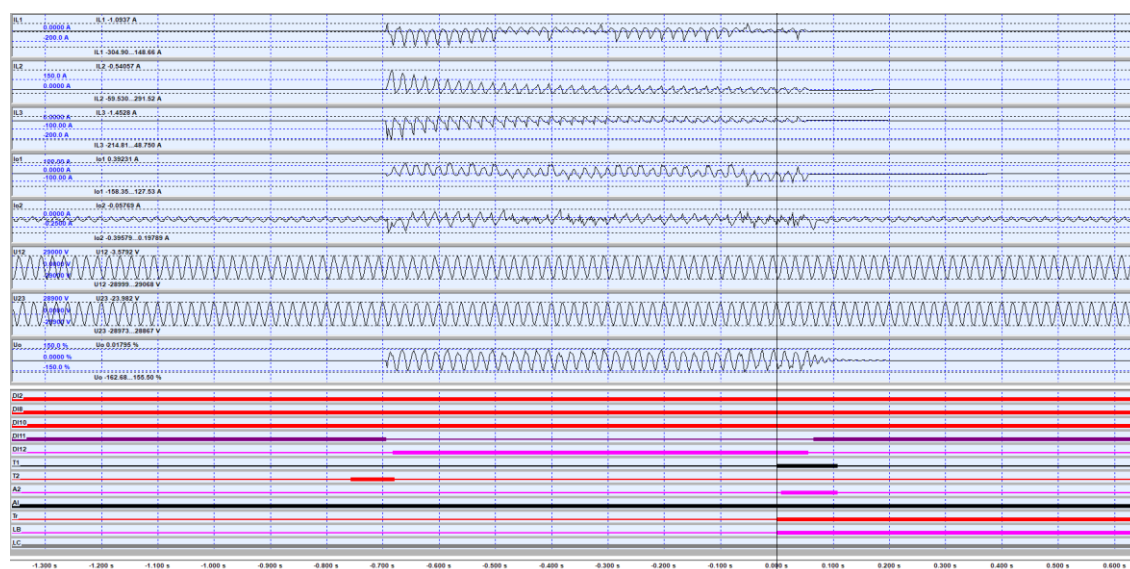
Apteekin suojariele oli tallentanut suunnatun maasulkusuojausvialokkiin useita havahtumisia vikalokkipäivänä 30.12.2018, jotka näkyvät kuvassa 8. Tarkastellaan kuvan 8 vikalokista ensin tapahtumia, joiden aikaleima on kello 14.27. Näiden havahtumisten kesto on jäänyt suojarielelle aseteltua hidastusaikaa lyhyemmäksi, jolloin katkaisijaa ei ole ohjattu auki. Kuvasta 8 nähdään, että kello 14.27 tapahtuneet havahtumiset ovat kestäneet 8 – 14 prosenttia vaaditusta  $0,7$  sekunnista, jolloin havahtumisten kestoiksi saadaan sekunneiksi muutettuna noin  $0,056$  –  $0,098$  sekuntia, mikä on noin 3 – 5 jaksonajan verran  $50$  hertsin verkossa. Näiden viiden kello 14.27 tallentuneiden havahtumisten välillä on kulunut aikaa noin  $0,33$  –  $1,9$  sekuntia, mikä puolestaan on noin 17 – 95 jaksonaikaa.

VIKALOKKI							
	Päiväys	hh:mm:ss.ms	Aktiivinen ryhmä	Vikavirta	Vian kulma	Vikajännite	Vian kesto
[1]	2018-12-30	14:33:53.975	2	0.24 pu	$-80^\circ$	91.9 %	100 %
[2]	2018-12-30	14:27:39.959	2	0.26 pu	$67^\circ$	30.1 %	8 %
[3]	2018-12-30	14:27:37.051	2	0.23 pu	$30^\circ$	30.3 %	8 %
[4]	2018-12-30	14:27:36.271	2	0.22 pu	$44^\circ$	30.1 %	8 %
[5]	2018-12-30	14:27:35.931	2	0.23 pu	$152^\circ$	29.8 %	14 %
[6]	2018-12-30	14:27:35.591	2	0.42 pu	$152^\circ$	29.9 %	14 %

Kuva 8. Apteekin suojarieleen suunnatun maasulkusuojausvialokki joulukuun 30. päivältä vuonna 2018.

Lisäksi kuvassa 8 on eri havahtumisten vikavirrat, vikojen kulmat ja vikajännitteet. Vikavirtojen arvot on ilmoitettu suhteellisarvoina. Apteekin johtolähdön kaapelivirtamuuntajan muuntosuhde on 70/1 A, jolloin esimerkiksi suhteellisarvo 0,24 pu tarkoittaa verkossa absoluuttista arvoa  $0,24 \cdot 70 \text{ A} = 16,8$  ampeeria. Vikojen kulmat ilmaisevat nollavirran kulmaa nollajännitteen kulmaan ja nämä arvot vaihtelevat kuvan 8 havahtumisissa merkillisen paljon. Tämä voi johtua vian keston lyhyydestä, jolloin suojarole ei ehtisi luotettavasti tulkitsemaan virran ja jännitteen välistä kulmaa.

Kun sähköverkon päivystäjä sai tiedon, että Ruuttu 1 sähköaseman syöttökentän katkaisija on auennut, hän ohjasi katkaisijan takaisin kiinni. Välittömästi katkaisijan kiinniohjaamisen jälkeen kello 14.33, Apteekin suojarole toimi ja ohjasi katkaisijansa auki, jolloin sähköaseman syöttökentän katkaisija pysyi kiinni. Kuvassa 9 on kuvakaappaus Apteekin suojaroleen tallentamista mittauksista kello 14.33, joiden perusteella suojarole ohjasi katkaisijansa auki. Kuvasta 9 havaitaan, että summavirta  $I_{01}$  vaihtelee 127 ampeerin ja  $-158$  ampeerin välillä. Tässä tilanteessa mitatusta summavirrasta tulee poikkeuksellisen suuri ja epäsymmetrinen johtuen jakelumuuntajien kytkentävirrasyöksystä.



Kuva 9. Apteekin suojaroleen tallentama tapahtuma kello 14.33, missä kolme ylintä käyrää ovat vaiheiden virrat  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$ , neljäs ja viides käyrä ovat  $I_{01}$  ja  $I_{02}$ , kuudes ja seitsemäs käyrä ovat pääjännitteet  $U_{12}$  ja  $U_{23}$  ja kahdeksas käyrä on nollajännite  $U_0$ . Alhaalla oleva aika-akseli alkaa  $-1,3$  sekunnista, nollajännitteen mittaus alkaa havahtumisesta hetkellä  $-0,7$  sekuntia ja katkaisijan avaamiskäskey on hetkellä  $0,0$  sekuntia.

Kuten kuvasta 9 huomataan, niin tällä kertaa sekä nollajännite että nollavirta pysyvät haatumisarvojen yläpuolella suojarielelle määritellyn 0,7 sekunnin ajan. Kun tarkastellaan kuvassa 8 esiteltyä vikalokia, niin vaikuttaa siltä, että Apteekin johtolähdöllä ollut vika on ollut ensin katkeileva maasulku, josta on tullut pysyvä maasulku ensimmäisen takaisin kytkennän jälkeen. Katkeileva maasulku on erityisesti sammutettuun maakaapeliverkkoon liitetty vikatyypin ja sen syynä on tyypillisesti maakaapelin eristeen heikkeneminen, joka johtaa lopulta jännitelujuuden riittävään pienenemiseen ja vaiheen läpilyöntiin maata vasten (Altonen, Mäkinen, Kauhaniemi, Persson, 2003: 1; Kuisti, Altonen, Svensson, Isaksson, 1999: 1).

Katkeilevassa maasulussa vikavirta on tyypillisesti hyvin epäsäännöllistä ja jäännösvirran piikit ovat lyhytkestoisia, jolloin nollavirran tunnistaminen voi olla perinteiselle suojarielelle haastavaa. Nollajännitteen havaitseminen on katkeilevassa maasulussa helpompaa, sillä vioittuneeseen vaiheeseen palaava jännite palautuu hitaasti jatkuvan tilan muotoonsa, jolloin nollajännite jää pidemmäksi aikaa koholle. Tällainen nollavirran ja nollajännitteen käyttäytyminen katkeilevassa maasulussa voi aiheuttaa sähköaseman varasuojan epäselektiiviseen toimintaan. (Altonen, ym., 2003: 4.)

Vaikuttaa siltä, että tässä vikatapauksessa on ollut kyseessä katkeileva maasulku. Tällä kertaa vian rajaamista helpotti ja nopeutti se, että vika muuttui riittävän pysyväksi maasulukuksi ensimmäisen jännitteen katkaisun ja takaisin kytkemisen jälkeen, jolloin käytössä olevat suojarieleet saivat tunnistettua maasulun. Suojareleiden päivittäminen katkeilevia maasulkuja paremmin tunnistaviksi nähdään Outokummun Energialla kustannustehokkaana vasta siinä yhteydessä, kun suojarieleet ollaan uudistamassa niiden käyttöiän tultua täyteen. Tällainen vastaava sähköaseman varasuojan epäselektiivinen toiminta saadaan kuitenkin estettyä myös nykyisillä suojarieleillä, kun niissä otetaan käyttöön uusi suojausasettelu, joka toimii samaan tapaan kuin varasuojan pelkän nollajännitteen perusteella. Jokaisen johtolähdön suojarieleen tulee toimia ennen kuin varasuojan toimii, jotta suojauksesta saadaan selektiivinen. Tämän uuden suojauksen tarkempi esittely ja sen selektiivisyyden suunnittelu käydään läpi alaluvussa 3.2.

### 3.2 Maasulkusuojauksen kehittäminen katkeilevien maasulkujen osalta

Outokummun Energian käytössä olevat suojareleet eivät kykene luotettavasti havaitsemaan katkeilevia maasulkuja. Ennen kuin suojareleet päivitetään uudempiin malleihin, jotka on suunniteltu tunnistamaan katkeilevia maasulkuja, niin kaikkien johtolähtöjen suojareleille suositellaan otettavaksi käyttöön uusi suojausporras, joka havahtuu pelkästään nollajännitteen arvosta. Tämän uuden suojausportaan on tarkoitus varmistaa koko sähköasemaa suojaavan varasuojan ja johtolähtöjen suojareleiden selektiivisyys maasulkutilanteissa, jotta edellisessä alaluvussa esiteltyä epäselektiivistä varasuojan toimintaa ei jatkossa tapahtuisi.

Johtolähtöjen suojareleiden toimiminen pelkästään nollajännitteen noususta tulee asetella aikaselektiiviseksi normaalin suunnatun maasulkusuojauksen kanssa siten, että suunnattu maasulkusuojaus ehtii toimia ennen kuin suojareleet alkavat toimia pelkän nollajännitteen nousun perusteella. Lisäksi pelkän nollajännitteen nousun perusteella tapahtuvat toiminnot porrastetaan kaikkien sähköaseman suojareleiden kesken siten, että jokaiselle suojareleelle on aseteltu oma aikaselektiivinen hidastusaikansa. Tarkoitus on, että suojareleet toimivat pelkän nollajännitteen perusteella ennalta määritellyssä järjestyksessä yksi kerrallaan, ja kun lopulta viallinen johtolähtö aukeaa ja katkeileva maasulku poistuu, ehtii nollajännite palata takaisin havahtumisrajan alapuolelle ja muut loput johtolähdöt jäävät jännitteisiksi. Kun suojareleille aseteltujen hidastusaikojen ero on riittävän suuri ja nollajännite ehtii laskea alle havahtumisarvon ennen seuraavan johtolähdön aukeamista, niin tällöin vikaantuneen johtolähdön tulisi olla viimeisimpänä toimineen suojareleen suojausalueella. Tämän perusteella mahdolliset muiden johtolähtöjen auenneet katkaisijat voidaan ohjata takaisin kiinni ja mikäli nollajännite ei näiden kiinniohjausten jälkeen lähde uudelleen nousemaan, on maasulkuvika saatu jo rajattua ainoastaan yhdelle johtolähdölle.

Valitaan nollajännitteen perusteella tapahtuvalle toiminnalle suojareleiden väliseksi aikaporttaaksi 0,3 sekuntia. Kokemusperusteisesti tätä aikaporrasta voidaan tarvittaessa kasvattaa, mikäli vaikuttaa siltä, että nollajännite ei ehdi laskea palautumisarvon alapuolelle määritellyssä aikaporttaassa ja muut suojareleet eivät ehdi pyörtää havahtumisiaan. Tällä

hetkellä varasuojan hidastusaika on neljä sekuntia. Varasuojan hidastusaika nostetaan viiteen sekuntiin, jotta ensimmäisen suojareleen hidastusaika pelkän nollajännitteen nousun perusteella saadaan riittävän pitkäksi. Varasuojan hidastusajan nostaminen viiteen sekuntiin käytiin läpi Outokummun Energian käytönvalvojan Tero Ovaskaisen kanssa. Näin ollen kaikkien johtolähtöjen suojareleiden tulee toimia viimeistään 4,7 sekunnin kuluttua. Jos viimeisen johtolähdön suojarele toimii 4,7 sekunnin kuluttua, niin toiseksi viimeinen suojarele toimii 4,4 sekunnin kuluttua, sitä edellinen 4,1 sekunnin kuluttua ja niin edelleen. Esimerkiksi Ruutu 1 sähköasemalla johtolähtöjä on kahdeksan, jolloin ensimmäiselle pelkän nollajännitteen perusteella toimivalle johtolähdön suojareleelle saadaan hidastusajaksi 2,6 sekuntia. Ruutu 1 sähköasemalla hitain suunnattu maasulkusuojaus toimii 0,7 sekunnin kuluttua havahtumisesta, joten uuden suojausportaan ja suunnatun maasulkusuojausvälinen aikaselektiivisyys on riittävä. Lisäksi 2,6 sekunnin hidastusajan tulee riittää verkon normaalien käyttötilanteiden aiheuttamien nollajännitteiden nousujen vaimenemiseen. Mikäli 2,6 sekunnin hidastusaika havaitaan käyttökokemusten perusteella riittämättömäksi ja suojaus aiheuttaa katkaisijan toimintoja normaaleissa käyttötilanteissa, täytyy ensimmäisen suojareleen hidastusaikaa nostaa ja suunnitella muiden suojareleiden hidastusajat uudelleen. Jos jokaiselle sähköaseman suojareleelle ei riitä oma aikaselektiivistä porrastaan, niin luonnollisesti johtolähtöjä voidaan ryhmitellä keskenään ominaisuuksiensa perusteella, jolloin samassa ryhmässä oleville johtolähdöille asetellaan samat hidastusajat ja tällöin niiden suojareleet toimivat yhtä aikaa.

Nollajännitteen havahtumisarvo Ruutu 1 sähköaseman varasuojalla on 55 prosenttia. Koska sähköaseman nollajännite mitataan samassa mittauskentässä ja sieltä mittausarvo toimitetaan kaikille sähköaseman suojareleille, voidaan tämän uuden suojausportaan nollajännitteen havahtumisarvoksi valita sama 55 prosenttia kuin varasuojallakin, eikä selektiivisyys vaarannu. Ruutu 1 sähköaseman johtolähtöjen suunnatussa maasulkusuojausessa nollajännitteen asetteluarvo on 20 prosenttia, joten suunnattu maasulkusuojaus toimii huomattavasti herkemmin kuin nyt määritelty uusi suojausporras.

Lopuksi sähköaseman johtolähdöt täytyy asettaa järjestykseen, minkä mukaisesti ne asetellaan putoamaan verkosta mahdollisen katkeilevan maasulkuvian sattuessa. Järjestyksen perusteena voidaan käyttää esimerkiksi johtolähdön arvioitua katkeilevan maasulun

todennäköisyyttä, jolloin maakaapelia sisältävät sekaverkot aseteltaisiin putoamaan ensimmäisenä. Järjestys voidaan myös muodostaa sähkön jakelun priorisoinnin näkökulmasta, jolloin esimerkiksi terveysasemia tai muita tärkeitä kulutuspisteitä sisältävät johtolähdöt putoaisivat viimeisenä. Ruuttu 1 sähköaseman johtolähdöille suunnitellut hidastusajat on esitelty taulukossa 2. Taulukossa mainittu Syöttö PM1 J01 tarkoittaa sähköaseman päämuuntajan syöttökenttää ja sen suojausasettelut ovat olleet jo ennen tätä työtä käytössä, mutta nyt sen hidastusaika on nostettu neljästä sekunnista viiteen sekuntiin.

Taulukko 2. Ruuttu 1 sähköasemalle käyttöönotettu maasulun suojausporras.

Johtolähtö	Syöttö PM1 J01	Teollisuuskylä E. J09	Miilu J06	Partala J11	Kyykeri J02
Suojarele	VAMP255	VAMP255	VAMP255	VAMP255	VAMP255
Uo>/ %	55	55	55	55	55
t/s	5	3,2	4,4	2,6	2,9
Johtolähtö	Vuonos J04	Teollisuuskylä P. J05	Hotelli J10	Apteekki J12	
Suojarele	VAMP255	VAMP255	VAMP255	VAMP255	
Uo>/ %	55	55	55	55	
t/s	4,7	3,5	4,1	3,8	

Ruuttu 1 sähköasemalla lyhyin hidastusaika pelkän nollajännitteen perusteella tapahtuvalle toiminnalle asetellaan Partala J11:n suojarielelle. Kyseinen johtolähtö on alkupäättään maakaapeloitu, mutta se sisältää edelleen avojohtoa ja PAS-ilmalinjaa. Haja-asutusaluetta syöttävät sekaverkot ovat Kuistin ym. (1999: 3) mukaan taipuvaisimpia katkeileville maasuluille, koska avojohtolinjojen maasulkuallisuus lisää sekaverkossa olevien maakaapeli eristeiden rasituksia, kun terveiden vaiheiden jännitteet maasulun aikana kohoavat. Loput Ruuttu 1 sähköaseman johtolähdöistä on käytännössä kokonaan maakaapeloituja. Seuraavaksi lyhin hidastusaika valittiin Kyykeri J02 lähdölle, koska se on Ruuttu 1 sähköaseman pisimpiä johtolähtöjä eikä sen syöttämät jakelupisteet ole poikkeuksellisen tärkeitä. Tämän jälkeen lyhimät hidastusajat ovat Teollisuuskylä Eteläinen J09:llä ja Teollisuuskylä Pohjoinen J05:llä, jotka syöttävät pääasiassa teollisuuden kuluttajia. Seuraavaksi asetellaan toimimaan Apteekki J12 ja Hotelli J10 johtolähdöt, jotka syöttävät pääasiassa keskusta-aluetta. Toiseksi viimeisenä suojarieleen toimii Miilu J06, joka syöttää muutamia tärkeimpiä kulutuspisteitä, kuten esimerkiksi terveysasemaa. Viimeisenä asetellaan toimimaan Vuonos J04:n suojariele, koska se on Ruuttu 1 ja Vuonos 1 sähköasemien välinen varayhteys, ja tämän varayhteyden Ruuttu 1

sähköaseman puoleinen katkaisija on normaalissa käyttötilanteessa auki, joten sen suojausalueella ei normaalisti pitäisi olla maasulkuja. Varasyöttö tilanteessa se on luonnollisesti tärkeässä prioriteetissa, joten se päätetään pitää mahdollisimman pitkään kiinni.

Tässä aluvussa esitellyllä suojauksella pyritään estämään, ettei aluvussa 3.1 esitellyn kaltainen epäselektiivinen toiminta pääsisi enää jatkossa toistumaan. Uudesta suojauksesta tulee pitää perehdytys kaikille jakeluverkkoa käyttäville henkilöille, missä esitellään suojauksen toimintalogiikka ja johtolähtöjen putoamisjärjestys katkeilevan maasulkuvian sattuessa. Johtolähtöjen putoamisjärjestyksen tulee olla aina sähköverkon päivystäjän saatavilla, jotta hän osaa päätellä vioittuneen johtolähdön myös ilman katkaisijoiden tarkkoja aikaleimoja ja ohjata oletettavasti terveet johtolähdöt takaisin kiinni. Tämän aluvun mukaiset suojausasettelut aiotaan suunnitella myös muille Outokummun Energian sähköasemille.

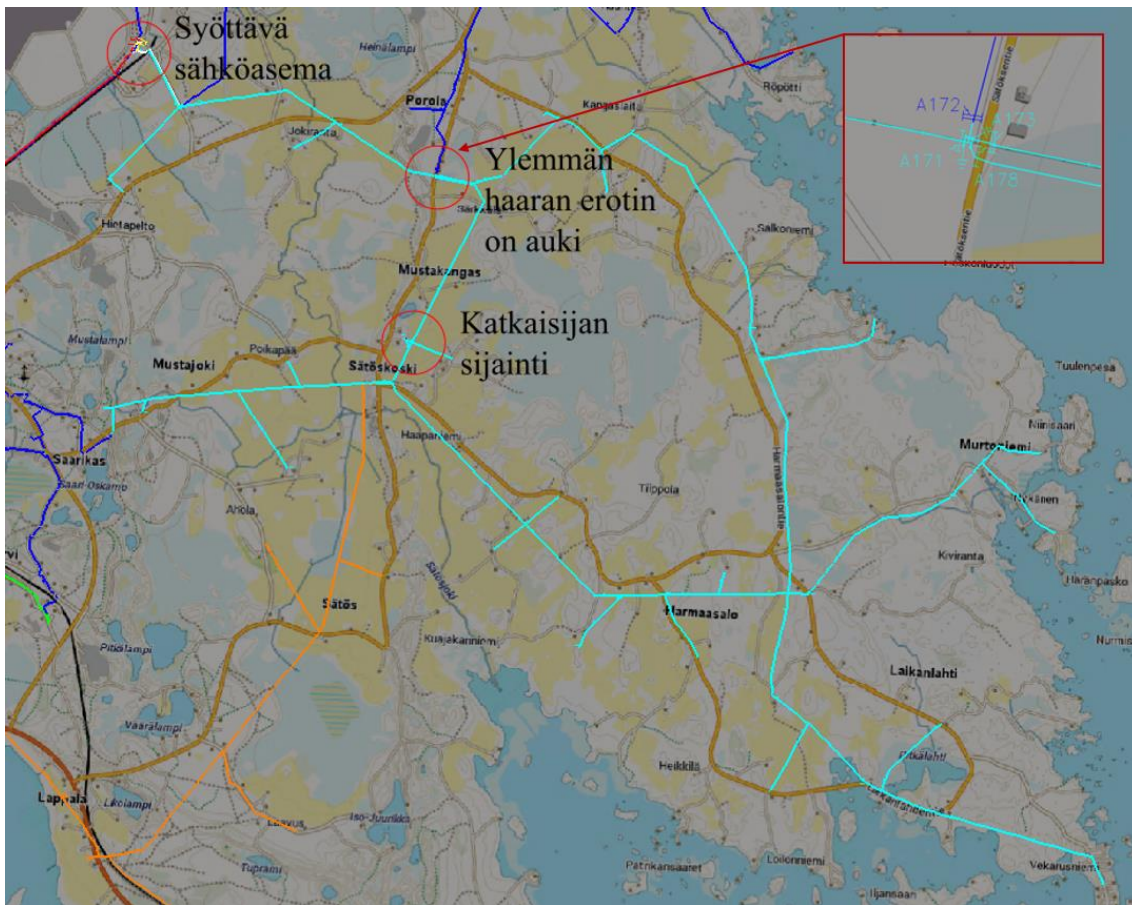
## 4 MAASTOKATKAISIJOIDEN LISÄÄMINEN JOHTOLÄHDÖILLE

Kesällä 2019 Outokummun Energian verkkoon asennettiin ensimmäiset kolme maastokatkaisijaa. Maastokatkaisija kykenee säteittäisessä verkossa katkaisemaan ja erottamaan omasta sijainnistaan katsottuna keskijännitelähdön loppupään, jolloin lähdön alkupää jää maastokatkaisijalle asti jännitteiseksi. Oikein toimiessaan se kykenee havaitsemaan takanaan olevassa verkossa sattuneen vian ja katkaisemaan vioittuneen verkon osan, ennen kuin sähköasemalla sijaitseva koko johtolähtöä suojaava suojarole päättää toimia. Tällöin maastokatkaisijan jälkeiseen verkkoon sattunut vika ei aiheuta keskeytystä johtolähdön alkupään kuluttajille.

Jotta johtolähdön suojaus toimii kokonaisuutena oikein ja suunnitellusti, tulee varmistua maastokatkaisijan ja johtolähdön suojaroleen selektiivisyydestä. Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan Kokonvaaran johtolähdön suojauksen suunnittelua, kun johtolähdölle on asennettu uusi maastokatkaisija. Toisessa alaluvussa arvioidaan Kokonvaaran maastokatkaisijan laskennallista taloudellista hyötyä kokemusperäisen vikahistorian avulla ja verrataan näitä arvioita kirjallisuuslähteiden mukaisiin maastokatkaisijoiden kannattavuuslaskelmiin.

### 4.1 Maastokatkaisijan suojauksen suunnittelu Kokonvaaran lähdölle

Kokonvaaran johtolähtö on käytännössä kokonaan avojohtoverkkoa, jonka poikkipinta-ala vaihtelee välillä  $3 \times 25 - 3 \times 132 \text{ mm}^2$ . Johtolähdön alkupää on hiljattain saneerattua ja melko vahvaa verkkoa ja johtolähdön loppupää alkaa olla jo melko iäkästä ja paikoitelleen poikkipinta-alaltaan ohuehkoa. Maastokatkaisija on asennettu noin seitsemän kilometrin päähän sähköasemalta, suurehkon teollisuusyrityksen jälkeen. Maastokatkaisijan sijainti on esitetty kuvassa 10. Maastokatkaisijan perässä on noin kolmekymmentä kilometriä haja-asutusalueita syöttävää keskijänniteverkkoa. Mitattujen vuosikulutusten perusteella maastokatkaisijan perässä olevaan verkkoon siirretään energiaa arviolta noin 70 prosenttia kaikesta Kokonvaaran johtolähdön siirtämästä energiasta.



Kuva 10. Maastokatkaisijan sijainti Kokonvaaran johtolähdöllä, joka on kuvattu karttaan vaalean sinisellä. Kuvan oikeassa yläkulmassa on tarkennus Porolan erotinasemasta, mistä nähdään, että toisen johtolähdön jakorajaerotin A172 on auki ja samoin Kokonvaaran ylemmän haaran erotin A173 on auki.

Suojauksen suunnittelu aloitetaan johtolähdön suojareleen suojausasetteluilla. Johtolähdön suojareleen on tarkoitus suojata koko johtolähtöä ja näin ollen toimia varasuojana maastokatkaisijan suojausalueelle. Outokummun Energialla on verkkotietojärjestelmään käytössä Trimblen NIS-sovellus, jolla saadaan laskettua muun muassa johtolähdön maksimi oikosulkuvirta, oikosulkuvirta tietyssä pisteessä, minimi oikosulkuvirta ja sähköaseman syöttämän verkon tuottama maasulkuvirta.

Kokonvaaran johtolähdön suojareleen suojausasettelut esitellään taulukossa 3. Suojareleen suojausasettelut pysyvät ennallaan oikosulkusuojauksen I> ja I>> virtaportaiden virta-asetteluiden ja hidastusaikojen osalta, koska johtolähdön ominaisuudet eivät muutu maastokatkaisijan asentamisen yhteydessä. Myös maasulkusuojauksen havahtumisarvot

ja hidastusajat pysyvät muutoin ennallaan, mutta maasulkusuojaukseen on lisätty tämän työn alaluvun 3.2 mukaisesti havahtuminen ja hidastusaika pelkän nollajännitteen nousun perusteella. Oikosulkusuojaukseen lisätään kuitenkin yksi uusi virtaporras  $I_{>>>}$ , joka on virtaselektiivinen maastokatkaisijan kanssa ja tämän vuoksi sen hidastusaika on suojareleelle asetettava pienin mahdollinen hidastusaika 0,04 sekuntia. Virtaselektiivisen ylivirtaportaan tarkoituksena on nopeuttaa johtolähdön alkupäässä tapahtuvan oikosulun laukaisemista niissä tilanteissa, kun vikavirran suuruus on suurempi kuin suurin mahdollinen oikosulkuvirta maastokatkaisijan kohdalla.

Taulukko 3. Kokonvaaran johtolähdön suojareleen suojausasettelut.

Suojarele	VAMP255	
	RYHMÄ 1	RYHMÄ 2
Oikosulkusuojaus		
$I_{>}/A$	450	450
t/s	0,55	0,55
$I_{>>}/A$	600	600
t/s	0,3	0,3
$I_{>>>}/A$	2100	2100
t/s	0,04	0,04
Maasulkusuojaus		
$U_{o>}/%$	15	15
$I_o/A$	1,5	1,5
Peruskulma $\varphi$	90	0
t/s	0,3	0,7
$U_{o>}/%$	55	55
t/s	3,1	3,1
PJK/ s	1	1
AJK/ s	60	60

Taulukosta 3 nähdään, että  $I_{>>>}$  ylivirtaportaan virta-asetteluksi on valittu 2,1 kA. Verkotietojärjestelmän laskennan mukaan maastokatkaisijan kohdalla verkon maksimi oikosulkuvirta on 1,96 kA ja selektiivisyyden varmistamiseksi tämä arvo päätettiin kertoa 1,05:llä ja pyöristää tulos ylöspäin kahden merkitsevän numeron tarkkuudella. Mikäli virtaselektiivisyys ei käyttökokemusten perusteella osoittaudu luotettavaksi, niin  $I_{>>>}$  virtaportaan virta-asettelua voidaan edelleen nostaa. Taulukossa 3 esitellyissä suojareleen asetteluissa on kaksi asetteluryhmää, ryhmä 1 ja ryhmä 2. Ryhmä 2 sisältää maasulkusuojausten asettelut sammutetulle verkolle ja tätä ryhmää käytetään sammutuksen ollessa

käytössä. Ryhmän 1 asetellut vaihtuvat suojareleelle automaattisesti, kun sammutuskela ei ole kytkettynä eli kun sähköaseman maadoitusjärjestelmä on maasta erotettu ja ryhmä 2 vaihtuu automaattisesti takaisin päälle, kun sammutuskela taas kytketään verkkoon. Oikosulkusuojauksen osalta molempien suojausryhmien asetellut ovat samat.

Työssä valitaan johtolähdön suojareleen ja maastokatkaisijan aikaselektiivisyyden aikaportaaksi 0,25 sekuntia, jonka pitäisi riittää luotettavaan selektiivisyyteen käytössä olevien suojareleiden välillä. Mikäli 0,25 sekunnin aikaporras ei käyttökokemusten perusteella osoittaudu riittävän pitkäksi ajaksi aikaselektiivisyyden varmistamiseksi, niin tällöin aikaporrasta pitää kasvattaa ja suojausasetteluja tulee tarkastella uudelleen. Maastokatkaisijan suojausasettelut on esitetty taulukossa 4. Myös maastokatkaisijan suojausasetteluissa on kaksi suojausryhmää, joista niin ikään ryhmä 2 on sammutetun verkon käyttötilanteeseen ja ryhmä 1 on tarkoitettu käyttötilanteeseen, kun sammutus ei ole käytössä ja maadoitusjärjestelmä on maasta erotettu. Maastokatkaisijan suojausryhmät eivät vaihdu automaattisesti sammutuskelan ollessa kytkettynä tai erotettuna, vaan suojausryhmä vaihdetaan ilmoittamalla asiasta verkon käyttökeskukseen, josta maastokatkaisijan suojausryhmä saadaan etänä vaihdettua. Koska suojausryhmän vaihtaminen maastokatkaisijalle voi joissain tapauksissa unohtua, niin on tärkeää, että johtolähdön suojarele suojaaa koko johtolähtöä toimien varasuojana maastokatkaisijalle.

Taulukko 4. Kokonvaaran maastokatkaisijan suojausasettelut.

Suojarele	Easergy P3U30	
	RYHMÄ 1	RYHMÄ 2
Oikosulkusuojaus		
I>/A	250	250
t/s	0,3	0,3
I>>/A	500	500
t/s	0,04	0,04
Maasulkusuojaus		
U <sub>o&gt;</sub> / %	10	10
I <sub>o</sub> /A	1,5	1,5
Peruskulma φ	90	0
t/s	0,04	0,4
PJK/ s	1,5	1,5
AJK/ s	90	90

Maastokatkaisijan oikosulkusuojausten asetellut suunniteltiin tarkastelemalla johtolähdön suojareleen asetteluja. Maastokatkaisijan I> ylivirtaportaan virran havahtumisarvoksi valitaan 250 ampeeria, joka on reilusti pienempi kuin johtolähdön suojareleen alimman virtaportaan havahtumisarvo 450 ampeeria. Maastokatkaisijan I> ylivirtaportaan havahtumisarvo haluttiin laskea mahdollisimman alas, jotta suojausten selektiivisyys paranisi. Kokonvaaran lähdön syöttämä kuormitusvirta ei laajimmassa varasyöttötilanteessakaan ylitä sataa ampeeria, joten valittua 250 ampeeria voidaan pitää luotettavasti vikavirtana. Matalamman I> ylivirtaportaan hidastusajaksi valitaan 0,3 sekuntia, jotta se on aikaselektiivinen taulukossa 3 esitellyn johtolähdön I< ylivirtaportaan kanssa, jonka hidastusaika on 0,55 sekuntia.

Taulukkoja 3 ja 4 vertailemalla huomataan, että maastokatkaisijan I>> virtaportaan virran havahtumisarvo on 500 ampeeria ja johtolähdön suojareleen I>> virtaportaan virran havahtumisarvo on 600 ampeeria. Maastokatkaisijan I>> ylivirtaportaan virran havahtumisarvosta haluttiin hieman pienempi kuin johtolähdön suojareleen I>> virran havahtumisarvosta, ettei ylivirtojen mittauslaitteissa olevat hajonnat pääse vaarantamaan selektiivisyyttä. Maastokatkaisijan I>> ylivirtaportaan hidastusajaksi valittiin 0,04 sekuntia, että aikaselektiivinen 0,25 sekunnin aikaporras johtolähdön suojareleen I>> hidastusajan kanssa täyttyy.

Maastokatkaisijan maasulkusuojaukseen ei ruvettu merkittävästi herkentämään johtolähdön suojarieleen maasulkusuojauksen asetteluista. Maastokatkaisijan nollajännitteen havahtumisarvoksi valittiin 10 prosenttia, kun se johtolähdön suojarieleellä on 15 prosenttia. Tällä pyritään parantamaan suojausten välistä selektiivisyyttä, joka voisi vaarantua nollajännitteen mittauslaitteiden toleransseista. Maasulkusuojauksen nollavirran havahtumisarvo 1,5 ampeeria on sekä maastokatkaisijalla että johtolähdön suojarieleellä sama, koska nollavirran havahtumisarvoa ei haluttu enää pienentää 1,5 ampeerista eikä sitä toisaalta haluttu johtolähdön suojarieleellä nostaa. Maastokatkaisijan maasulkusuojauksen hidastusaika on sammutetussa verkossa 0,4 sekuntia, joka on 0,3 sekuntia pidempi kuin johtolähdön suojarieleen hidastusaika 0,7 sekuntia. Maasta erotetussa verkossa maastokatkaisijan maasulkusuojauksen hidastusajaksi asetellaan 0,04 sekuntia, koska johtolähdön suojarieleen 0,3 sekunnin hidastusaikaa ei voida enää pidentää suurimpien sallittujen kosketusjännitteiden kestoajaksi.

Viimeisenä suojausasetteluna maastokatkaisijalle määritettiin pika- ja aikajälleenkytkentöjen jännitteettömät ajat. Kokonvaaran johtolähdön suojarieleellä on erään metallintyöstöyrityksen pyynnöstä nostettu pikajälleenkytkennän jännitteetöntä aikaa yhteen sekuntiin, koska aiemmin käytössä ollut puolen sekunnin jännitteetön aika aiheutti heidän metallintyöstölaitteistollensa todetun vaurioitumisriskin, joka poistui jännitteetöntä aikaa kasvattamalla. Maastokatkaisijan jännitteettömät ajat valittiin sekä PJK:ssa että AJK:ssa johtolähdön suojarieleen jännitteettömiä aikoja pidemmiksi. Tällä haluttiin varmistaa, että kuormien kytkentä tapahtuu pikajälleenkytkennässä portaittain syöttävästä päästä alkaen, mikäli molemmat suojarieleet toimivat samanaikaisesti ja aloittavat jälleenkytkentäsekvenssinsä yhtä aikaa. Kuten taulukoista 3 ja 4 nähdään, johtolähdön suojarieleellä PJK:n jännitteetön aika on yksi sekunti ja AJK:n jännitteetön aika on 60 sekuntia ja maastokatkaisijalla PJK:n jännitteetön aika on 1,5 sekuntia ja AJK:n jännitteetön aika on 90 sekuntia.

## 4.2 Kokonvaaran maastokatkaisijan taloudellisen kannattavuuden tarkastelu

Jakeluverkossa tapahtuvien vikojen taloudellista vaikutusta voidaan tarkastella esimerkiksi keskeytyksestä aiheutuvan haitan mukaan määritellyllä KAH-arvolla. Outokummun Energialla on käytössään Trimble DMS -käyttötukijärjestelmä. Trimblen DMS-ohjelmalla saadaan laskettua eri keskeytysten KAH-arvoja, joissa huomioidaan irti kytketyn tehon hinta ja sen suuruus sekä toimittamatta jääneen energian hinta ja sen suuruus (Levo, 2015: 47). DMS-ohjelma laskee keskeytykselle sen ajankohdasta ja pituudesta riippuvan KAH-arvon, jonka lisäksi laskenta ilmoittaa myös kyseisen keskeytyksen normalisoidun KAH-arvon. Normalisoidussa KAH-arvossa huomioidaan sähkön käyttäjille aiheutuva keskimääräinen haitta vuoden aikaisen kulutuksen perusteella siten, että keskeytyksen ajankohta on normalisoitu. Koska tulevien vikojen ajankohtaa on mahdoton arvioida, niin tässä työssä käytetään normalisoituja KAH-arvoja.

Kokonvaaran johtolähdölle laskettiin tunnin pituisen keskeytyksen normalisoitu KAH-arvo DMS-ohjelmalla avaamalla johtolähdön katkaisija tunnin ajaksi ja tulokseksi saatiin 2555 euroa. Tämän jälkeen laskettiin tunnin pituisen keskeytyksen normalisoitu KAH-arvo johtolähdön alkupäälle siirtämällä maastokatkaisijan jälkeinen verkon osuus varasyöttöyhteyksien avulla viereiseen johtolähtöön ja avaamalla sekä maastokatkaisijan että Kokonvaaran johtolähdön katkaisija tunnin ajaksi. Maastokatkaisijaa edeltävän verkon osuuden normalisoiduksi KAH-arvoksi saatiin tunnin pituisessa keskeytyksessä 750 euroa.

DMS-ohjelmaan on tallennettu Kokonvaaran johtolähdöllä sattuneita vikoja vuodesta 2014 alkaen. Taulukkoon 5 on poimittu Kokonvaaran johtolähdöllä olleiden keskijänniteverkon vikojen lukumäärät vuosilta 2015 – 2019 ja nämä viat on jaettu ohimenneisiin PJK- ja AJK-vikoihin, ennen nykyisen maastokatkaisijan sijaintia sattuneisiin vikoihin ja asennetun maastokatkaisijan jälkeisen verkon osuuden vikoihin. Taulukosta huomataan, että maastokatkaisijan jälkeisessä verkossa on ollut vuosina 2015 – 2019 yhteensä 13 pysyvää vikaa, kun johtolähdön alkupäässä pysyviä vikoja on ollut viisi. PJK- ja AJK-vikojen sijainneista saadaan harvoin varmuutta, mutta niiden voidaan olettaa noudattavan pysyvien vikojen jakaumaa.

Taulukko 5. Kokonvaaran PJK:t, AJK:t ja pysyvät viat keskijänniteverkossa jaoteltuna maastokatkaisijan sijainnin mukaan vuosilta 2015 – 2019.

	PJK	AJK	Ennen maasto- katkaisijaa	Maastokatkaisijan jälkeen
2015	7	0	3	3
2016	6	1	0	1
2017	7	4	0	2
2018	3	1	1	4
2019	10	5	1	3
YHTEENSÄ	33	11	5	13
KESKIARVO	6,6	2,2	1	2,6

DMS-ohjelmaan tallennettuja vikoja tarkastelemalla huomattiin, että maastokatkaisijan jälkeisissä vioissa johtolähdön alkupää saatiin kauko-ohjattavien erotinasemien avulla ta-  
kaisin jännitteiseksi useimmiten noin 10 – 20 minuutissa. Maastokatkaisijan avulla saa-  
daan taulukon 5 mukaan vähennettyä keskimäärin noin 2,6 pysyvää vikaa johtolähdön  
alkupäässä vuosittain, joiden kesto olisi noin 15 minuuttia. DMS-ohjelmalla laskettiin  
maastokatkaisijaa edeltävälle verkon osuudelle 15 minuutin pituisen keskeytyksen nor-  
malisoitu KAH-arvo, joka on 239 euroa. Näin ollen KAH-arvojen perusteella maastokat-  
kaisijan vuosittainen taloudellinen hyöty pysyvissä keskeytyksissä on noin 620 euroa.  
PJK- ja AJK-vikojen normalisoidut KAH-arvot maastokatkaisijaa edeltävällä johto-osuu-  
della ovat noin 30 euroa ja 150 euroa. Jos PJK- ja AJK-viat jakautuvat sijainniltaan sa-  
massa suhteessa kuin pysyvät viat, niin PJK-vikoja on maastokatkaisijaa edeltävässä ver-  
kossa vuosittain keskimäärin noin 2,5 kappaletta ja AJK-vikoja noin 0,85 kappaletta.  
KAH-arvojen perusteella maastokatkaisijan taloudellinen hyöty PJK-vikojen osalta on  
noin 75 euroa ja AJK-vikojen osalta noin 125 euroa vuodessa.

Yhteensä Kokonvaaran johtolähdölle asennettavan maastokatkaisijan taloudellinen hyöty  
vikojen aiheuttamiin KAH-arvoihin on vuodessa noin 820 euroa. Kokonvaaran maasto-  
katkaisija asennettiin muiden verkonrakennustöiden yhteydessä ja sen kokonaiskustannus  
oli noin 15000 euroa. Jos tälle maastokatkaisijalle lasketaan takaisinmaksuaika pelkkien  
vuosittaisten KAH-arvojen vähenemisen perusteella, niin takaisinmaksuajaksi saadaan  
 $15000 \text{ €} / (820 \text{ €/vuosi}) \approx 18$  vuotta.

Maastokatkaisijoiden taloudellisessa kannattavuudessa tulee kuitenkin huomioida useita muitakin tekijöitä kuin pelkät KAH-arvot. Suomessa sähköverkkoyhtiöiden toimintaa valvoo Energiavirasto, jonka tehtävänä on muun muassa valvoa, että jakeluverkkoyhtiöiden hinnoittelu on kohtuullista (Energiavirasto, 2018: 5). Hinnoittelun kohtuullisuuden perusteena käytetään niin kutsuttua kohtuullista tuottoa, missä sähköverkkotoimintaan sitoutunut oikaistu oma pääoma ja korollinen vieras pääoma kerrotaan erikseen määritellyllä kohtuullisella tuottoasteella (Energiavirasto, 2018: 6). Tämän jälkeen kohtuullista tuottoa verrataan liiketoiminnan toteutuneeseen tulokseen, jota on oikaistu erilaisilla valvontajaksolle määrätyillä kannustimilla (Energiavirasto, 2018: 6). Näin ollen sähköverkkoyhtiön sallittua liiketoiminnan tulosta saadaan kasvatettua, kun sähköverkkotoimintaan sitoutunutta omaa pääomaa saadaan kasvatettua. Esimerkiksi maastokatkaisijaan tehty investointi kasvattaa verkon nykykäyttöarvoa Energiaviraston määrittämän yksikköhinnan mukaisesti, mikä nostaa sähköverkkotoimintaan sitoutunutta omaa pääomaa, mikä puolestaan nostaa kohtuullista tuottoa.

Yksi sähköverkkoyhtiön toteutuneen tuloksen oikaisuista viidennellä valvontajaksolla 1.1.2020 – 31.12.2023 on laatukannustin (Energiavirasto, 2018: 6). Laatukannustimen tarkoituksena on ohjata jakeluverkkoyhtiöitä tekemään sellaisia investointeja, jotka kehittävät sähkön siirron ja jakelun laatua (Energiavirasto, 2018: 66). Laatukannustimessa sähköverkkoyhtiön toteutuneiden keskeytyksistä aiheutuneiden kustannusten vertailutasona käytetään viidennellä valvontajaksolla keskijännitejakeluverkon vuosina 2012 – 2019 ja suurjännitejakeluverkon vuosina 2013 – 2019 toteutuneiden keskeytyskustannusten keskiarvojen summaa (Energiavirasto, 2018: 72 – 73). Laatukannustin lasketaan vähentämällä keskeytyskustannusten vertailutasosta sähköverkkoyhtiön toteutuneet keskeytyskustannukset (Energiavirasto, 2018: 75). Tämän jälkeen saatu laatukannustimen vaikutus vähennetään toteutuneesta tuloksesta, kun lasketaan kannustimilla oikaistua toteutunutta tulosta (Energiavirasto, 2018: 75). Yksinkertaistettuna liiketoiminnan oikaistu tulos pienenee, kun asiakkaiden kokemat keskeytysten määrät vähenevät ja kestot lyhenevät ja vastaavasti oikaistu tulos kasvaa, kun keskeytysten määrät kasvavat ja kestot pitenevät. Kokonvaaran maastokatkaisijalla saadaan vähennettyä maastokatkaisijan jälkeisessä verkossa tapahtuvien vikojen vaikutuksia johtolähdön alkupään asiakkaille, sekä lyhennettyä keskeytysten kestoa vianrajauksen nopeutuessa.

Tässä työssä ei tarkastella tämän tarkemmin Kokonvaaran maastokatkaisijan vaikutuksia verkon nykykäyttöarvoon tai valvontajakson mukaiseen laatukannustimeen. Johtokatkaisijoiden taloudellisista vaikutuksista on julkaistu useita tutkimuksia, joissa on arvioitu johtokatkaisijoiden taloudellisia hyötyjä esimerkkiverkoissa. Luonnollisesti näiden tutkimusten tuloksia ei voi suoraan verrata Outokummun Energian verkkoon, johtuen eri johtolähtöjen tapauskohtaisista eroavaisuuksista esimerkiksi johtolähdön pituuden, asiakasmäärän, siirretyn energian, johtokatkaisijan sijainnin ja johtolähdön vikataajuuden suhteen. Kuitenkin näistä eri olosuhteissa tehdyistä tutkimuksista voi saada viitteitä siitä, millaisia johtokatkaisijoiden taloudelliset vaikutukset voivat olla.

Esimerkiksi Vaasan Sähköverkon jakeluverkossa tehdyssä tutkimuksessa ”Sähkönsyötön varmuuden parantamisen vaihtoehtoja” Henry Lågland (2018) vertailee sähkövarastojen, 1 kV jakelujärjestelmän, varavoiman, verkostoautomaation ja 20 kV maakaapeloinnin taloudellisia vaikutuksia kahdella eri johtolähdöllä. Tutkimuksessa tarkastellaan Häggvikin johtolähtöä, jonka pituus on 74 kilometriä, keskiteho 0,976 MW ja kuluttajatiheys 14,3 kuluttajaa per kilometri, sekä Nybyn johtolähtöä, jonka pituus on 66 kilometriä, keskiteho 0,449 MW ja kuluttajatiheys 6,5 kuluttajaa per kilometri (Lågland, 2018: 13 – 14). Lågland (2018) toteaa sivuilla 26 – 28, että johtokatkaisijat pienentävät erityisesti molempien tutkittujen johtolähtöjen SAIFI-indeksiä, joka kuvaa johtolähdön pitkien keskeytysten keskimääräistä taajuutta. Tutkimuksessa johtokatkaisijoiden takaisinmaksuajat ovat Häggvikin johtolähdöllä 3,8 vuotta ja Nybyn johtolähdöllä 7,1 vuotta (Lågland, 2018: 51).

Henry Lågland on tutkinut johtokatkaisijoiden taloudellisia hyötyjä esimerkijohtolähdöissä myös väitöskirjassaan ”Comparison of Different Reliability Improving Investment Strategies of Finnish Medium-Voltage Distribution Systems” (2012). Väitöskirjassa tarkastellaan johtokatkaisijoiden taloudellisia vaikutuksia eri tilanteissa kahdella johtolähdöllä, joiden pituudet ovat 54,5 ja 68,6 kilometriä ja niiden keskitehot ovat 1,4 ja 1,1 MW (Lågland, 2012: 113). Molemmilla johtolähdöillä ensimmäisen johtokatkaisijan takaisinmaksuaika on 1,2 – 4,4 vuotta, kun kustannustehokkuutta verrataan johtolähtöjen alkutilanteeseen, jossa käytössä on kauko-ohjattavia erottimia (Lågland, 2012: 122 – 124).

Låglandin tutkimuksissa (2012; 2018) johtokatkaisijoiden takaisinmaksuajat ovat merkittävästi lyhyempiä kuin tässä alaluvussa esitetyt laskelmat Kokonvaaran maastokatkaisijalle. Tästä voidaan olettaa, että pelkkien KAH-arvojen perusteella tehtyjä laskelmia ei voida pitää riittävän kattavina, kun arvioidaan maastokatkaisijan taloudellista kannattavuutta, vaan laskuissa tulisi huomioida myös esimerkiksi laatukannustimen ja investointikannustimen vaikutukset, kuten Lågland tekee tutkimuksessaan (2018: 43 – 48).

Osaltaan Låglandin tutkimusten (2012; 2018) nopeammat takaisinmaksuajat, verrattuna tämän alaluvun KAH-arvojen perusteella laskettuun Kokonvaaran maastokatkaisijan takaisinmaksuaikaan, selittyvät tarkasteltujen esimerkkiverkkojen eroavaisuuksilla. Kokonvaaran johtolähtö on yhteensä noin 37 kilometriä pitkä, sen keskiteho on DMS-ohjelman mukaan 0,3 MW ja kuluttajia on 5,4 per kilometri. Låglandin molemmissa tutkimuksissa johtolähdöt olivat pidempiä, niiden keskiteho oli suurempi ja niillä oli enemmän kuluttajia per kilometri kuin tässä alaluvussa tarkastellulla Kokonvaaran johtolähdöllä. Lähimpänä Kokonvaaran johtolähdön ominaisuuksia on Låglandin tutkima Nybyn johtolähtö, jonka pituus on 66 kilometriä, keskiteho 0,449 MW ja jolla on kuluttajia 6,5 per kilometri (2018: 13 – 14). Tällä johtolähdöllä Lågland (2018: 51) sai johtokatkaisijan takaisinmaksuajaksi 7,1 vuotta, minkä voi olettaa olevan lähimpänä Kokonvaaran maastokatkaisijan taloudellista kannattavuutta. Täytyy kuitenkin muistaa, ettei johtolähdön pituus, keskiteho eikä kuluttajitiheys riitä vertailtaessa eri johtolähtöjä ja niiden johtokatkaisijoita, vaan huomioon tulee ottaa myös johtolähdön vikatiheys ja johtokatkaisijan sijainti johtolähdöllä.

Låglandin laajemmat tutkimukset johtokatkaisijoiden taloudellisista kannattavuuksista antavat rohkaisevia tuloksia maastokatkaisijoiden hyödyistä. Hänen tuloksensa osoittavat, että otollisilla johtolähdöillä johtokatkaisijoiden takaisinmaksuajat voivat olla hyvin lyhyet. Låglandin tutkimusten perusteella maastokatkaisijoihin investoiminen vaikuttaa houkuttevalta ja maastokatkaisijoille suotuisia kohteita kannattaa jakeluverkosta etsiä verkoston suunnittelun yhteydessä.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli kehittää Outokummun Energian keskijänniteverkon suojausta. Työssä keskityttiin pääasiassa kahteen esimerkkitapaukseen, joista saatujen havaintojen ja tulosten perusteella suojausta voidaan kehittää yhtiössä laajemminkin.

Työssä tarkasteltiin Apteekin johtolähdöllä 30.12.2018 sattunutta maakaapelivikaa, joka aiheutti maasulkusuojauksen epäselektiivisen toiminnan. Apteekin johtolähdön suojareleen suunnattu maasulkusuojaus havahtui vikalokin perusteella maasulkuun useita kertoja, mutta havahtumisten kestot olivat jääneet 0,056 – 0,098 sekuntiin, jolloin suojareleelle aseteltu hidastusaika 0,7 sekuntia ei ollut täyttynyt eikä suojarele näin ollen ohjannut katkaisijaansa auki. Kun nolajännite oli ollut sähköaseman varasuojalle asetellun 55 prosentin yläpuolella neljä sekuntia, täyttyi varasuojalle aseteltu hidastusaika ja varasuoja ohjasi sähköaseman syöttökentän katkaisijan auki. Kun sähköaseman syöttökentän katkaisija ohjattiin takaisin kiinni, niin Apteekin johtolähdön suojareleen suunnattu maasulkusuojaus havahtui ja tällä kertaa havahtuminen kesti yhtäjaksoisesti vaaditun 0,7 sekuntia, jolloin Apteekin johtolähdön suojarele ohjasi katkaisijansa auki ja sähköjakelu jatkui sähköaseman muilla johtolähdöillä.

Työssä todettiin, että Apteekin johtolähdöllä sattunut maasulkuvika oli todennäköisesti katkeileva maasulku. Katkeilevissa maasuluissa nolavirta on epäsäännöllistä ja nolavirran voimakkaat piikit ovat lyhytkestoisia, jolloin nolavirran tunnistaminen voi olla perinteiselle suojareleelle haastavaa (Altonen, ym., 2003: 4). Kuitenkin nolajännite jää katkeilevassa maasulussa pidemmäksi aikaa koholle, koska vioittuneeseen vaiheeseen palaava jännite palautuu hitaasti jatkuvan tilan muotoonsa, minkä vuoksi katkeileva maasulku voi aiheuttaa sähköaseman varasuojan epäselektiivisen toiminnan (Altonen, ym., 2003: 4).

Työn alaluvussa 3.2 Ruuttu 1 sähköasemalle suunniteltiin kaikkien johtolähtöjen suojarieleille uusi maasulkusuojauksen suojausporras, joka havahtuu pelkkään nolajännitteeseen kuten sähköaseman varasuojakin, jolloin katkeilevien maasulkujen aiheuttamat epäselektiiviset toiminnat saadaan tulevaisuudessa vältettyä. Tämä suojausporras

suunniteltiin toimimaan johtolähtöjen suunnatun maasulkusuojauksen ja varasuojan välissä, joten uuden suojausportaan hidastusajat ovat suunnatun maasulkusuojausten hidastusaikojana pidempiä, mutta varasuojan hidastusaikaa lyhyempiä. Nollajännitteen havahtumisarvoksi valittiin uudessa suojausportaassa sama 55 prosenttia, joka on myös varasuojan havahtumisarvo. Lisäksi jokaiselle johtolähdölle valittiin oma hidastusaikansa 0,3 sekunnin aikaportaan välein, jolloin sähköaseman johtolähdöt putoavat yksi kerrallaan mahdollisen katkeilevan maasulun aikana, mikä auttaa tunnistamaan vioittuneen johtolähdön, kun nollajännite lopulta laskee vioittuneen johtolähdön auetessa.

Seuraavaksi työssä tarkasteltiin maastokatkaisijan lisäämistä Kokonvaaran johtolähdölle. Maastokatkaisijan suojausasetteluissa kiinnitettiin erityisesti huomiota johtolähdön suojausalueen ja maastokatkaisijan välisen selektiivisyyden varmistamiseen. Maastokatkaisijan myötä Kokonvaaran johtolähdön suojausalueelle otettiin käyttöön virtaselektiivinen ylivirtasuojaus, jonka on tarkoitus toimia lähes välittömästi sellaisilla ylivirroilla, jotka eivät voi suuruutensa perusteella olla maastokatkaisijan suojausalueella. Virtaselektiivisen ylivirtaportaan havahtumisarvoksi valittiin 2,1 kA, kun verkkotietojärjestelmän laskema suurin mahdollinen oikosulkuvirta maastokatkaisijan kohdalla on 1,96 kA.

Lopuksi työssä arvioitiin Kokonvaaran maastokatkaisijan taloudellista kannattavuutta käytöntukijärjestelmällä laskettujen KAH-arvojen ja tallennetun vikahistorian perusteella. Taloudellisen kannattavuuden arvioinnissa ei tarkasteltu maastokatkaisijan vaikutuksia Energiaviraston viidennen valvontajakson mukaisiin kohtuullisen tuoton valvontamenetelmiin. Pelkkien KAH-arvojen perusteella maastokatkaisijan takaisinmaksuajaksi saatiin 18 vuotta. Tämän jälkeen työssä esiteltiin kahden Henry Låglandin tekemän laajemman tutkimuksen (2012; 2018) tuloksia, joissa johtokatkaisijoiden takaisinmaksuajoiksi on saatu 1,2 – 7,1 vuotta. Henry Låglandin tutkimusten tulokset antavat viitteitä siitä, että maastokatkaisijan taloudellista kannattavuutta ei voida riittävän tarkasti arvioida pelkkien KAH-arvojen perusteella. Låglandin (2012; 2018) tutkimukset kuitenkin osoittavat, että otollisissa kohteissa maastokatkaisijoiden takaisinmaksuajat voivat olla hyvin lyhyitä ja ne ovat kustannustehokas tapa parantaa jakeluverkon toimitusvarmuutta. Maastokatkaisijoita kannattaa jatkossakin suunnitella sopiville johtolähdöille verkon saneerauksen yhteydessä.

## LÄHDELUETTELO

- ABB Oy, Suomalaiset ABB-yhtiöt (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita – TTT*. Kymmenes painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy. ISBN 951-99366-0-2.
- Altonen, J., O. Mäkinen, K. Kauhaniemi, K. Persson (2003). *Intermittent earth faults – need to improve the existing feeder earth fault protection schemes?* CIRED 17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona, 2003.
- Elovaara, Jarmo & Leena Haarla (2011a). *Sähköverkot I – Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. ISBN 978-951-672-360-3.
- Elovaara, Jarmo & Leena Haarla (2011b). *Sähköverkot II – Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. ISBN 978-951-672-363-4.
- Energiavirasto (2018). *Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla*. [Verkkodokumentti] Energiavirasto [8.11.2018]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/hinnoittelun-valvonta>
- Hänninen, Seppo (2001). *Single phase earth faults in high impedance grounded networks – Characteristics, indication and location*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT publications 453. Espoo: Otamedia Oy. ISBN 951-38-5960-6 (painettu versio) tai ISBN 951-38-5961-4 (verkkodokumentti). Väitöskirja.
- Järviluoma, Rauno (2020). SFS6001-standardin tulkitseminen vaarajännitteisiin liittyvän maavirran laskemisessa sammutetussa 20 kV verkossa. Sähköpostiviestiin vastaaminen Riku Kakkoselle 5.3.2020.
- Kuisti, H., J. Altonen, H. Svensson, M. Isaksson (1999). *Intermittent earth faults challenge conventional protection schemes*. CIRED 15th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution. Nizza, 1999.

Lakervi, Erkki & Jarmo Partanen (2008). *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatiето. ISBN 978-951-672-357-3.

Lågland, Henry (2012). *Comparison of Different Reliability Improving Investment Strategies of Finnish Medium-Voltage Distribution Systems*. Väitöskirja, Vaasan yliopisto, maaliskuussa 2012. Acta Wasaensia, 256. ISBN 978-952-476-384-4.

Lågland, Henry (2018). *Sähkönkäytön varmuuden parantamisen vaihtoehtoja*. [Verkkodokumentti] Vaasan yliopisto [12.10.2018]. Saatavissa: <https://www.univaasa.fi/fi/sites/vinpowertyopajat/tulosaineisto/tulosraportit/>

Levo, Mikaela (2015). *Käyttötoiminnan raportoinnin kehittäminen*. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu.

Mörsky, Jorma (1992). *Relesuojaustekniikka*. Toinen korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy. ISBN 951-672-175-3.

SFS6001:2018. *Suurjännitesähköasennukset*. 5. painos. Vahvistettu 15.6.2018. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki.

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Helsingissä 9.8.2013.

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Helsingissä 16.12.2016.