

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2021

Kaarle Lehto

TURKU ENERGIA SÄHKÖVERKOT OY:N KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUSSELVITYS

Kaarle Lehto

TURKU ENERGIA SÄHKÖVERKOT OY:N KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUSSELVITYS

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä toimeksiantaja Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon suojausselvitys ja laatia kehitysehdotukset verkon suojauksen parantamiseen. Suojausselvitys tehtiin suojauskohteittain, jotka olivat päämuuntaja, kiskosto ja johtolähtö. Nämä suojauskohteet käytiin läpi kaikilla Turku Energia Sähköverkot Oy:n sähköasemilla.

Työssä selvitettiin Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon rakenne ja verkon suojaukseen liittyvät komponentit, joita ovat muun muassa mittamuuntajat, katkaisijat ja suojareleet. Työssä tarkasteltiin keskijänniteverkkoon liittyviä yleisimpiä vikatilanteita, joita ovat oikosulku ja maasulku. Päämuuntajien, kiskostojen ja johtolähtöjen osalta selvitettiin, miten niiden suojaus on toteutettu Turku Energian sähköasemilla. Päämuuntajien suojaus on toteutettu sähköisillä ja ei-sähköisillä suojailla. Kiskostojen suojaus on toteutettu lähtökennojen avulla, eli niin sanotulla lukitussuojauksella. Suurella osalla sähköasemista on myös valokaarisuojaus. Johtolähtöjen suojaus on toteutettu monitoimisuojuilla, jossa on muun muassa ylivirta-, oikosulku- ja maasulkusuojaus.

Suojausselvityksen perusteella voidaan todeta Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon suojauksen olevan kunnossa ja hyvin toteutettu. Suojauksen parantamiseksi laadittiin selvityksen pohjalta joitakin kehittämissuosituksia. Katkaisijavikasuojaan käyttöönottamista tulisi harkita niillä asemilla, joilla ei ole valokaarisuojausta käytössä. Korvausasetteluista olisi hyvä laatia valmiit tausta-asettelut suojareleiden toisille asetteluryhmille. Verkon suojauksesta otettava hälytykset tulisi yhdenmukaistaa sähköasemien kesken. Jatkotutkimusehdotus on syventyä tarkemmin eri reletyyppeihin ja niiden suojausfunktioihin tai tarkastella eri suojarelevalmistajien releitä ja selvittää niiden hyvät ja huonot ominaisuudet Turku Energia Sähköverkot Oy:n näkökulmasta.

ASIASANAT:

keskijänniteverkko, sähköasema, suojarele

BACHELOR'S | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering

June 2021 | 50 pages

Kaarle Lehto

TURKU ENERGIA SÄHKÖVERKOT OY PROTECTION ASSESSMENT CONCERNING MEDIUM-VOLTAGE NETWORK PROTECTION

This thesis's aim was to do a protection assessment concerning Turku Energia Sähköverkot Oy's medium-voltage network protection as well as to prepare proposals for improving the security of the medium-voltage network. The protection assessment was carried out by comparing the different protection areas, which were a main transformer, a busbar and a line feeder. These protection sites were assessed at all of Turku Energia Sähköverkot Oy substations.

The structure of Turku Energia Sähköverkot Oy medium-voltage network and the components related to the network's protection, which include instrument transformers, circuit breakers and protection relays, were examined. The most common fault situations related to the medium-voltage network, which are short circuits and earth faults, were examined. The study investigated how the protection of main transformers, busbars and line feeders has been implemented at Turku Energia Sähköverkot Oy substations. The main transformers are equipped with electrical and non-electrical protections. The protection of the busbars is handled by a feeder terminal. Many substations also have arc protection. The line feeders are protected by multifunction protective relays, which include overcurrent, short-circuit and earth-fault protection.

Based on the protection assessment, the protection of Turku Energia Sähköverkot Oy medium-voltage network is in good condition and well implemented. In order to further improve security, some proposals were made to develop the protection system. The introduction of circuit breaker fault protection should be considered for stations that do not use arc protection. For replacement layouts, it is recommended.

KEYWORDS:

medium-voltage network, substation, protection relay

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 TURKU ENERGIA	8
3 SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ	9
3.1 Sähköverkko	10
3.2 Kokoojakiskojärjestelmät	13
4 VIKATYYPIT	15
4.1 Oikosulku	15
4.1.1 Oikosulkuvirran arviointi	16
4.2 Maasulku	18
4.2.1 Maasta erotettu verkko	19
4.2.2 Sammutettu verkko	21
4.2.3 Kaksoismaasulku	23
4.2.4 Katkeileva maasulku	23
5 SÄHKÖVERKON SUOJAUS	25
5.1 Suojareleet	26
5.2 Suojareleasettelut	27
6 SUOJAUSALUEET	30
6.1 Päämuuntajan suojaus	30
6.1.1 Sähköiset suojareleet	30
6.1.2 Ei-sähköiset suojareleet	32
6.2 Kiskosuojaus	33
6.2.1 Jännitesuojaus	34
6.2.2 Taajuussuojaus	35
6.3 Valokaarisuojaus	36
6.4 Johtolähdön suojaus	37
6.4.1 Ylivirta- ja oikosulkusuojaus	37
6.4.2 Maasulkusuojaus	38
6.4.3 Jälleenkytkennät	40
6.4.4 Taajuussuojaus	41
6.5 Relekoestus	41

7 KEHITTÄMISKOHTEET	43
7.1 Releasettelut	43
7.2 Korvausasettelut	44
7.3 Katkaisijanvikasuoja	45
7.4 Relekoestus ja koestussyklit	46
7.5 Suojareleiden hälytykset	46
8 YHTEENVETO	48
LÄHTEET	49

KAAVAT

Kaava 1. Sysäysoikosulkuvirta.	17
Kaava 2. Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta.	17
Kaava 3. Sysäyskerroin.	17
Kaava 4. Terminen oikosulkuvirta.	18
Kaava 5. Maasulkuvirta maasta erotettu verkko.	20
Kaava 6. Maasulkuvirta vikaresistanssin kautta.	20
Kaava 7. Nollajännite maasta erotetussa verkossa.	20
Kaava 8. Sammutetun verkon maasulkuvirta.	22
Kaava 9. Sammutetun verkon nollajännite.	22
Kaava 10. Erovirta (ABB 1997, 5).	32
Kaava 11. Vakavointivirta (ABB 1997, 5).	32

KUVAT

Kuva 1. Siirto- ja jakeluverkoston periaatekaavio (Aura & Tonteri 1993, 71).	9
Kuva 2. TESV Oy:n verkkoalue (Turku Energia 2021).	11
Kuva 3. Säteilittäinen verkko (Arcteq 2018).	12
Kuva 4. Rengasverkko (Arcteq 2017).	12
Kuva 5. Yksikiskojärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 341).	13
Kuva 6. Kaksoiskiskojärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 342).	14
Kuva 7. Kaskoiskatkaisijajärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 344).	14
Kuva 8. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (ABB TTT-käsikirja, 252).	21
Kuva 9. Sammutuskelan U0-jännitteen mittaus (A Eberle 2007, 55).	22
Kuva 10. Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa (ABB TTT-käsikirja 2000, 255).	23
Kuva 11. Jälleenkytkentälogiikka TESV Oy:n Huhkolan sähköaseman lähtökennon konfiguraatiosta.	29
Kuva 12. Maasta erotettu verkko, L1-vaihe maasulussa $R_f = 0$ (Inspecta 2014).	35
Kuva 13. Lähtökoskettimien merkintä. (TESV Oy:n Maarian sähköasema)	44

KUVIOT

Kuvio 1. Oikosulkuvirta epäsymmetrinen (a) ja symmetrinen (b) (Elovaara & Haarla 2011a, 171).	16
Kuvio 2. Suurimmat sallitut kosketusjännitteen arvot vian kestoajan funktiona (SFS6001 2018, 93).	19
Kuvio 3. Katkeileva maasulku, katsottuna vikapaikkaa syöttävältä releeltä (Arcteq 2018, 91).	24
Kuvio 4. Differentiaalireleen toimintakäyrä (ABB 1997, 5).	31
Kuvio 5. Ylivirtareleen toiminta-aika virran funktiona, 1 vakioaika, 2 käänteisaika, 3 hetkellisaika.	37
Kuvio 6. I0Sin karakteristika maasta erotettu verkko (ABB 2018, 456).	38
Kuvio 7. I0Cos karakteristika sammutettu verkko (ABB 2018, 456)	39
Kuvio 8. Jälleenkytkentäohjelma (ABB 2018, 456).	41

TAULUKOT

Taulukko 1. Releasettelut.	28
Taulukko 2. Alitaajuussuojauksen asettelu.	36

1 JOHDANTO

Työn aiheena on tehdä keskijänniteverkon suojaus selvitys Turku Energia Sähköverkot Oy:lle. Suojaus selvitykseen kuuluu keskijänniteverkon suojauksen nykytilan kartoitus sekä suojaukseen liittyvät kehitysehdotukset. Työssä keskijänniteverkon suojaus käydään läpi suojausaluekohtaisesti. Työhön on sisällytetty myös päämuuntajien suojaus, vaikka se kuuluu osittain myös 110 kV suojauksen piiriin. Kokonaisuuden kannalta se on kuitenkin tärkeää käsitellä tässä työssä, koska se olennaisesti liittyy keskijänniteverkon suojaukseen. Työn tavoitteena on saada selkeä kokonaiskuva suojauksen nykytilasta ja löytää mahdolliset ongelma- ja kehittämiskohteet verkon suojaukseen liittyen.

Työn alussa käsitellään Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon rakennetta ja käyttöä. Tämän jälkeen käydään läpi verkon yleisimmät vikatilanteet ja suojauksen perusteet. Työn pääpaino on eri suojauskohteissa, jotka käsitellään seuraavaksi. Lopuksi tuodaan esille suojauksessa havaitut ongelmakohdat ja kehittämisehdotukset niiden ratkaisemiseksi.

Työn aiheeksi valittiin keskijänniteverkon suojaus, koska viime aikoina Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon suojauksia on uusittu ja niitä tullaan myös jatkossa uusimaan. Siksi on tarpeellista luoda selkeä kokonaiskuva suojauksen nykytilasta. Aloittuani uudessa suojaus asiantuntijan tehtävässä Turku Energialla, nämä asiat lisäksi kuuluvat nykyiseen työnkuvaani.

2 TURKU ENERGIA

Turku Energia on Varsinais-Suomen johtava energiayhtiö. Turku Energian toimintaan kuuluu sähkön, kaukolämmön ja jäähdytyksen tuottaminen ja jakelu. Turku Energian vastuulla on myös energiantuotantolaitosten ja energiaverkkojen kehittäminen, rakentaminen ja ylläpito. Turku Energian emoyhtiö on Oy Turku Energia - Åbo Energia Ab. Emoyhtiön omistaa Turun kaupunki. Emoyhtiöön kuuluu kaksi tytäryhtiötä, jotka ovat Turku Energia Sähköverkot Oy (100 %) ja Turun seudun kaukolämpö Oy (60,75 %). (Turku Energia 2021.) Tämä työ on tehty Turku Energia Sähköverkot Oy:lle, myöhemmin yhtiöstä käytetään tässä tekstissä lyhennettä TESV Oy.

Turku Energialla on kunnianhimoinen ympäristöohjelma, jonka tavoitteet on asetettu vuosille 2021-2023. Tavoitteet on jaettu neljään päämäärään. Ensimmäinen päämäärä on tehdä töitä ilmastonmuutoksen hillinnäksi sekä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi Turussa. Yksi keino tähän pääsemiseksi on uusiutuvan energian lisääminen sähkön ja lämmön hankinnassa. Uusiutuvien energialähteiden osuus kaikista energialähteistä pitäisi olla 85 % vuoden 2023 loppuun mennessä. Muina tavoitteina on tarjota älykkäitä energiaratkaisuja, rakentaa kestävää energiatulevaisuutta ja tukea vastuullista sidosryhmätoimintaa. (Turku Energia 2021.)

TESV Oy:n sähköverkko koostuu 110 kV suurjännitteisestä jakeluverkosta, 10 kV ja 20 kV keskijänniteverkosta ja 400 V pienjänniteverkosta. Suurjännitejakeluverkkoa ei ole maadoitettu TESV Oy:n sähköasemilla. Fingrid Oyj:n omistamalla Liedon sähköasemalla muuntajien tähtipisteet ovat maadoitettu. 10 kV keskijänniteverkko on maasta erotettu. Kahdella sähköasemalla on 20 kV verkko. TESV Oy:llä 20 kV verkko on sammutettu, näillä sähköasemilla muuntajien tähtipisteisiin on asennettu maasulun sammutuskuristin.

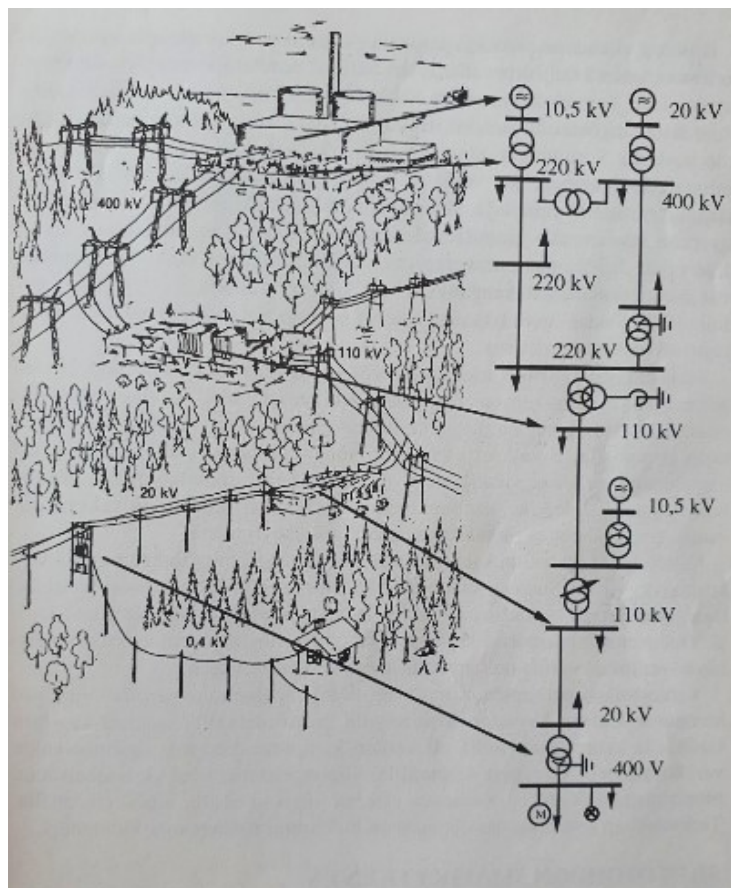
Yhteiskunnan asettamat vaatimukset sähköverkon toimintavarmuudelle ja laadulle ovat lisääntyneet. Lisääntyneet vaatimukset aiheuttavat myös sähköverkon suojaus- ja häiriönvalvonnalle haasteita. Lyhyetkin sähkökatkot aiheuttavat haittaa sähkön käyttäjille, myös sähkön toimituksen laatu kärsii katkoista. Viranomaisten käyttämä malli, jolla arvioidaan verkkoyhtiöiden tehokkuutta, huomio myös katkot sähköntoimituksessa. Tämän takia keskeytyksillä on verkkoyhtiöille myös taloudellinen merkitys.

3 SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ

Sähköjakelujärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisestä jakeluverkosta, keskijännitejakeluverkosta ja sähkön kuluttajista. Suomen sähköjakeluverkko kuuluu osaksi yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa. Venäjältä ja Virossa on tasasähköyhteydet Suomeen.

Fingrid Oyj hallinnoi kantaverkkoa. Kantaverkossa siirretään suuria tehoja pitkiä matkoja. Kantaverkon jännite on 400 kV, 220 kV tai 110 kV. Siirtojännite on korkea, koska sillä saadaan siirtohäviöt pienemmäksi. Yhtiön omistavat Suomen valtio ja suomalaiset eläkeyhtiöt. Fingrid Oyj:n vastuulla on mm. kantaverkon valvonta, käytön suunnittelu, verkon rakentaminen ja kehittäminen. (Fingrid 2021.)

Kuvassa 1 on esitetty sähköjakelujärjestelmän periaatekaavio.



Kuva 1. Siirto- ja jakeluverkoston periaatekaavio (Aura & Tonteri 1993, 71).

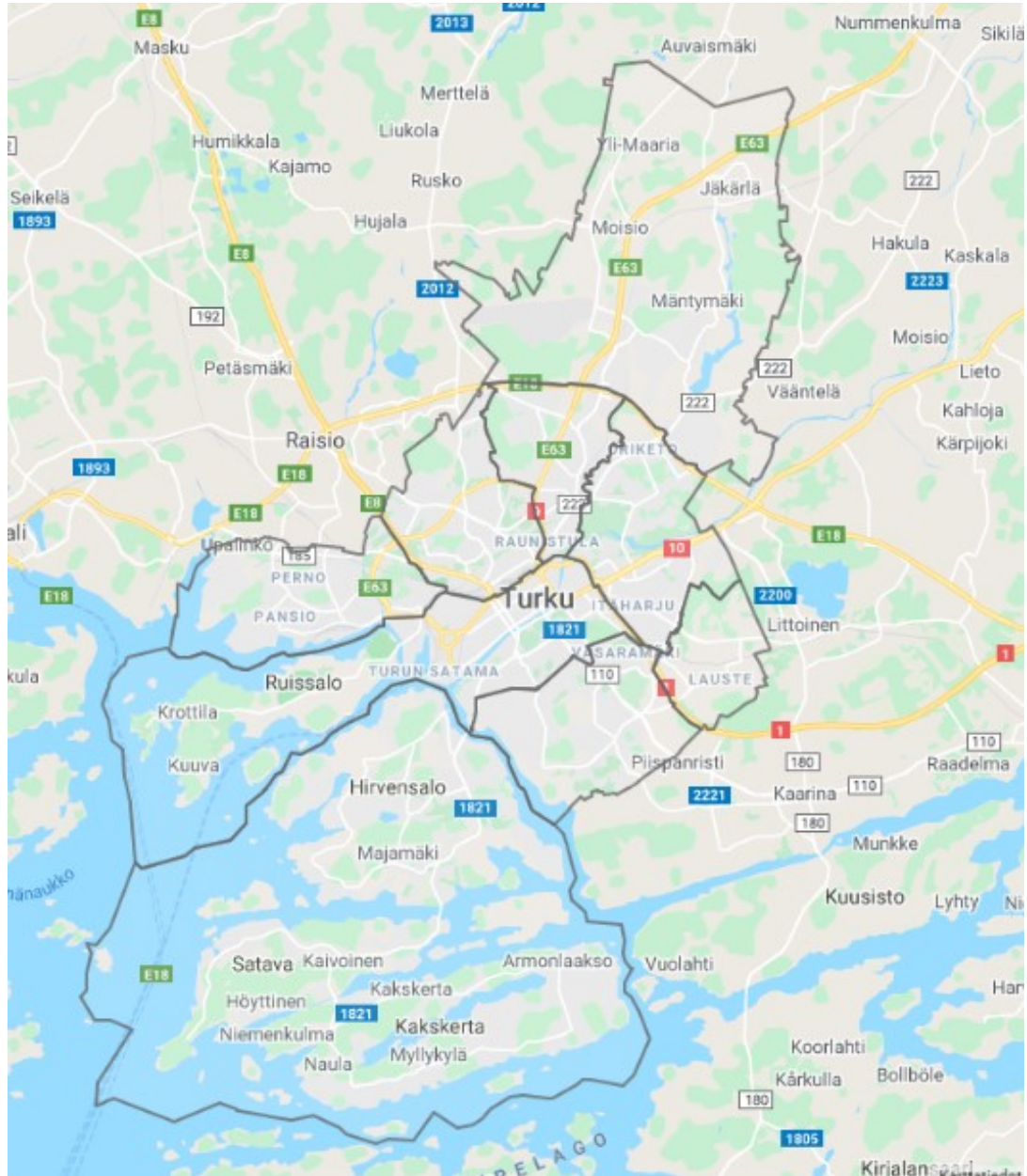
Sähköverkonhaltija harjoittaa luvanvaraista sähköverkkotoimintaa hallinnoimallaan sähköverkolla. Luvanvaraisen toiminnan piiriin ei kuitenkaan kuulu yksittäinen liittymisjohto, jolla yksittäinen tai useampi voimalaitos liitetään verkkoon. (Energiavirasto 2021.)

Verkkopalveluita tarjoavia yhtiöitä nimitetään niiden hallitseman verkon perusteella suurjännitejakeluverkkoyhtiöiksi, jakeluverkkoyhtiöiksi tai suljetun jakeluverkon haltijoiksi. Jakeluverkolla tarkoitetaan alle 110 kV verkkoa. Jakeluverkkoyhtiön verkkolupaan kuuluu maantieteellinen vastuualue. Jakeluverkkoyhtiöitä on Suomessa 77 kpl. (Energiavirasto 2021.)

3.1 Sähköverkko

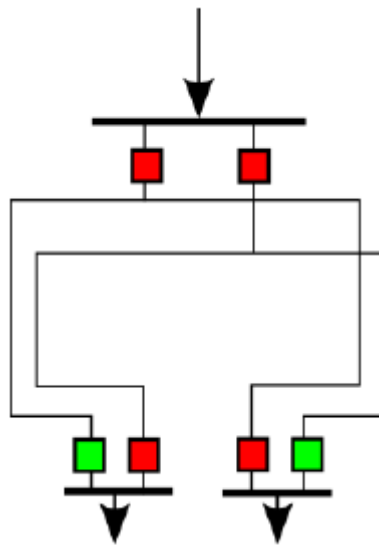
TESV Oy:llä on 16 sähköasemaa. Sähköasema on sähköverkon solmukohta, jossa voidaan suorittaa kytkentöjä, muuntaa jännitettä tai ryhmitellä kuormituksia eri johdoille. Sähköaseman rakenne vaihtelee sen tehtävän mukaan. Asema voi olla vain sähköenergian jakeluun suunniteltu tai siihen voi liittyä voimalaitos tai muuntaja. Sähköaseman käytettävyyteen vaikuttaa paljon se, minkälainen on aseman kokoojakiskon rakenne.

Kuvassa 2 esitetään TESV Oy:n verkkoalue. Alueeseen kuuluu tiheän keskusta-alueen lisäksi saaristoalueita ja kauempana keskustasta sijaitsevia haja-asutusalueita. Keski-jänniteverkossa jännite on pääsääntöisesti 10 kV. Ainoastaan Ilpoisten ja Hirvensalon sähköasemilla on 20 kV verkkoa. Verkon komponentit ovat vuoden 1988 jälkeen muualakin kuitenkin mitoitettu 20 kV jännitteen mukaan. Tulevaisuudessa on tarkoitus siirtyä käyttämään laajemmin 20 kV jännitetasoa. Verkon maakaapelointiaste on noin 70 %. Saariston verkko on pääosin ilmajohtoverkkoa.



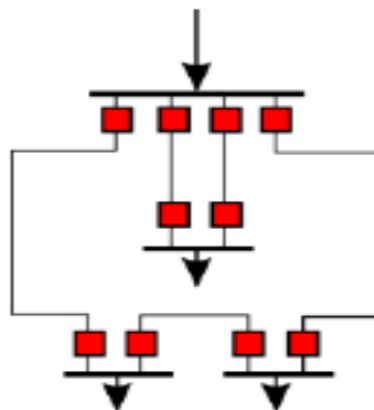
Kuva 2. TESV Oy:n verkkoalue (Turku Energia 2021).

TESV Oy:n keskijänniteverkko on rakennettu tiheästi asutuilla alueilla rengasverkoksi, mutta sitä käytetään säteittäisesti, jolloin mm. suojausten toteutus on yksinkertaisempaa. Haittapuolena säteittäisessä verkossa on kuitenkin se, että vian sattuessa kaikki säteittäisen johdon perään kytketyt asiakkaat kokevat sähkökatkon. Myös jakelun päässä olevat asiakkaat kokevat jänniteheilahteluita verkon kuormituksen vaihdella. Kuvassa 3 on esitetty säteittäinen verkko. Punaiset laatikot kuvaavat kiinni olevia katkaisijoita.



Kuva 3. Säteittäinen verkko (Arcteq 2018).

Keskijänniteverkkoa voidaan myös käyttää rengasverkkona, joka on luotettavuudeltaan huomattavasti säteittäistä verkkoa parempi. Verkon suojaus on kuitenkin haastavampi toteuttaa, koska vikavirran suunta voi vaihdella. Selektiivisen ylivirtasuojauksen aikaansaamiseksi tulisi käyttää suunnattuja ylivirtareleitä. Tällöin jokainen kenno on varustettava virtamuuntajien lisäksi jännitemuuntajilla. (Arcteq 2017.) Kuvassa 4 on esitetty rengasverkko.



Kuva 4. Rengasverkko (Arcteq 2017).

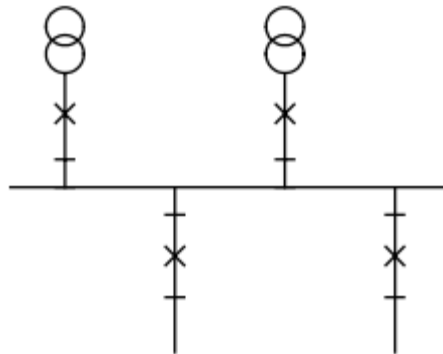
Kaukokäyttöisiä erottimia on käytössä keskijänniteverkon tärkeimmillä solmukohtilla ja niitä tullaan tulevaisuudessa lisäämään. Kaukokäyttöisten erottimien tuomat hyödyt verkon käytössä ja häiriöiden selvityksissä ovat kiistattomia.

3.2 Kokoojakiskojärjestelmät

Seuraavaksi käsitellään ne kokoojakiskojärjestelmät, joita TESV Oy:llä on käytössä. Käytössä olevat kiskojärjestelmät ovat yksikiskojärjestelmä, kaksoiskiskojärjestelmä ja kaksoiskatkaisijajärjestelmä.

Yksikiskojärjestelmä

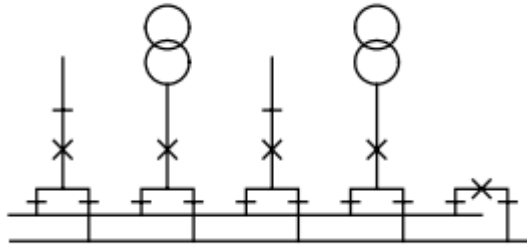
Yksinkertaisin kiskojärjestelmä on yksikiskojärjestelmä (Kuva 5). Se on myös käyttövarmuudeltaan heikoin. Kojeistossa tapahtuva laitevaurio aiheuttaa aina sähkönjakelun keskeytyksen. Kiskosto saadaan jännitteettömäksi vain, jos koko asema on kytkettynä irti verkosta. (Aura & Tonteri 1993, 332.)



Kuva 5. Yksikiskojärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 341).

Kaksoiskiskojärjestelmä

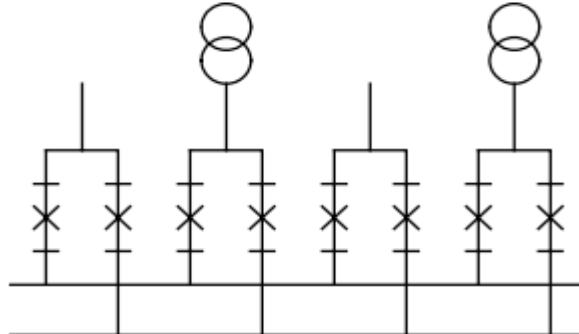
Kaksoiskiskojärjestelmässä on mahdollista ryhmitellä kuormia käytön aikana (Kuva 6). Huoltoa ja kunnossapitoa varten toinen kiskoista saadaan kylmäksi. Käyttö voidaan jakaa kahteen ryhmään. Haittana on se, että katkaisija vika aiheuttaa aina pitkän keskeytyksen. (Aura & Tonteri 1993, 334.)



Kuva 6. Kaksoiskiskojärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 342).

Kaksoiskatkaisijajärjestelmä

Kaksoiskatkaisijajärjestelmä (duplex) on erityisen käyttövarma (Kuva 7). Siinä haluttu kisko tai katkaisija saadaan jännitteettömäksi käytön aikana. Hankintakustannuksiltaan se on kuitenkin kallein kiskojärjestelmästä. Täydellinen järjestelmä vaatii kaksinkertaisen määrän katkaisijoita. Suojauksen toteutus- ja ohjauslogiikat ovat hieman monimutkaisempia kuin muissa kiskojärjestelmissä. (Aura & Tonteri 1993, 334.)



Kuva 7. Kaskoiskatkaisijajärjestelmä (ABB TTT-käsikirja 2000, 344).

4 VIKATYYPIT

Sähköverkon vikatapaukset eivät saa aiheuttaa vaaraa laitteille eivätkä ympäristölle. Turvallisuuden lisäksi sähköverkko on suunniteltava niin, etteivät vikatilanteet aiheuta tarpeettomia keskeytyksiä. Sähkötyöturvallisuusmääräyksissä annetaan määräyksiä vikatapauksen varalta, jotka voivat aiheuttaa hengen- tai omaisuuden vaaraa. (Aura & Tonteri 1993, 159.)

Vikatapaukset voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Kolmivaihejärjestelmässä symmetrinen vika tarkoittaa sitä, että vika kohdistuu kaikkiin vaiheisiin samanlaisena. Tällaisia vikoja voivat olla esimerkiksi kolmivaiheinen oikosulku, johdon tai muuntajan laukeaminen tai ison tuotantolaitoksen yhtäkkinen irtoaminen verkosta. Epäsymmetrisessä viassa vika kohdistuu eri vaiheisiin eri tavalla. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi yksi- ja kaksivaiheiset maasulut. Toisinaan voi muodostua epäsymmetrisiä yhdistelmävikoja. Tällöin verkossa on kaksi eri puolella verkkoa olevaa vikaa. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi kaksoismaasulut ja johdinkatkos, jossa katkennut johdin putoaa maahan. (Elovaara & Haarla 2011a, 166–167.)

Seuraavaksi käsitellään sähköverkon vikatapauksista oikosulku ja maasulku.

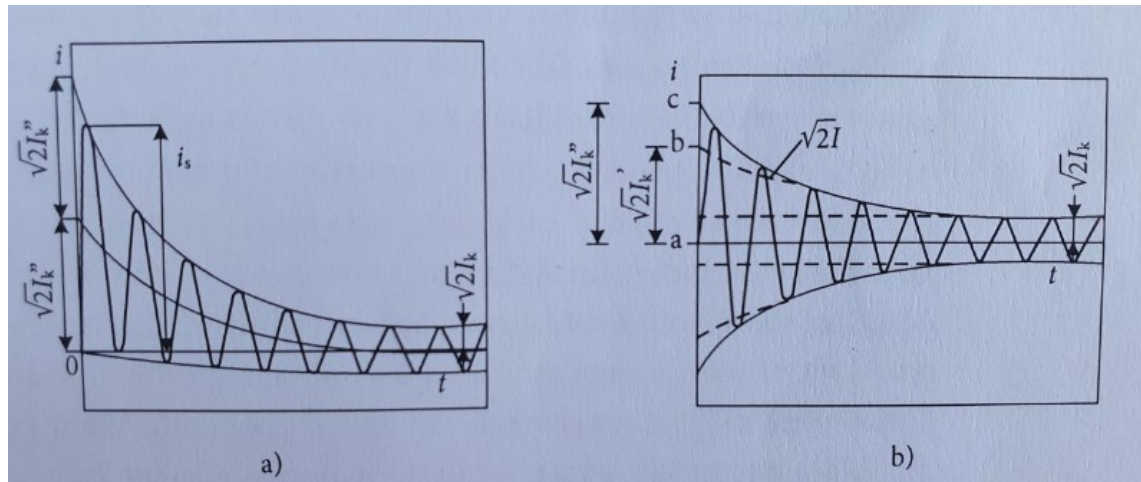
4.1 Oikosulku

Sähköverkkoa eniten rasittava vika on kolmivaiheinen oikosulku. Vikavirrat voivat nousta jopa 30-40-kertaisiksi nimellisvirtoihin nähden. (Aura & Tonteri 1993, 159.) Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihetta yhdistyvät keskenään. Tällöin vikapaikan jännite putoaa nolnaan. Symmetriasta johtuen vaiheiden välillä säilyy kuitenkin 120 °:en vaiheero. Symmetrian ansiosta kolmivaiheisessa oikosulussa esiintyy vain myötäimpedansseja, eli kolmivaiheverkon komponenttien tavallisia impedansseja. (Paavola & Halme 1979, 7.)

Kaksivaiheinen oikosulku muodostuu, jos kaksi vaihetta kytkeytyy yhteen. Vikavirta on lähes aina pienempi kuin kolmivaiheisessa viassa. Mikäli kaksivaiheiseen oikosulkuun kytkeytyy maasulku, pienentää se usein vielä oikosulkuvirtaa. (Eronen 2014, 13.)

Kuviossa 1 (a) on esitetty epäsymmetrinen oikosulkuvirta. Se sisältää vaihtovirtakomponentin ohella myös tasavirtaosan I_t . Tasavirtaosa vaimenee verkon ominaisuuksista

johtuvan aikavakion mukaan ja komponentin suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta oikosulun syntymishetkellä. Mikäli tasavirtakomponentti $I_t = 0$, on oikosulkuvirta symmetrinen. Symmetrinen oikosulkuvirta on esitetty kuviossa 1 (b). Kolmivaiheisesta järjestelmästä on huomattava kuitenkin, että oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan (Elovaara & Haarla 2011a, 171).



Kuvio 1. Oikosulkuvirta epäsymmetrinen (a) ja symmetrinen (b) (Elovaara & Haarla 2011a, 171).

Vaihtovirtaverkoissa myös vaihtovirtaosa muuttuu ajan mukana. Vaihtovirtaosan amplitudista voidaan erottaa alkuoikosulkuvirta I_k'' ja muutosoikosulkuvirta I_k' . Nämä vaimenevat omien aikavakoidensa T_k'' ja T_k' mukaisesti. Oikosulkuvirta vaimenee jatkuvan tilan arvoonsa I_k , kun alku-, muutosoikosulkuvirrat ja tasavirtakomponentti ovat vaimentuneet pois. Käytännössä suojareet ovat katkaisseet piirin ennen kuin oikosulkuvirta ehtii kehittyä jatkuvan tilan arvoonsa. Oikosulkuvirran muutosilmiöt johtuvat verkon pyörivistä kooneista. Mitä kauempana vikapaikka sijaitsee syöttävistä lähteistä, sitä vähemmän muutos- ja jatkuvan tilan oikosulkuvirrat eroavat toisistaan. (Elovaara & Haarla 2011a, 171–172.)

4.1.1 Oikosulkuvirran arviointi

Verkko on rakennettava siten, että se kestää oikosulkuvirtojen mekaaniset ja termiset rasitukset eri tilanteissa. Tavoitteena on määrittää suurin oikosulkuvirta eri vikatyypeille. Tähän tarkasteluun on otettava seuraavat vikatyypit mukaan: kolmivaiheinen oikosulku

maakosketuksella ja ilman, kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella ja ilman, yksivaiheine maasulku sekä kaksoismaasulku. (SFS 6001 2018, 29.)

Oikosulkuvirta on lähes puhdasta induktiivista loisvirtaa, koska oikosulkupiirin impedanssi on pääasiassa induktiivista reaktanssia (Paavola & Halme 1979, 3). Oikosulkuvirta saavuttaa suurimman hetkellisen huippuarvon noin 10 ms kuluttua vian alkamisesta. Tätä nimitetään sysäysoikosulkuvirraksi I_s . Tätä arvoa käytetään laitteiden mekaanisessa mitoituksessa. Sysäysoikosulkuvirrasta käytetään usein nimitystä dynaaminen oikosulkuvirta ja sen voi laskea kaavalla 1. (Huotari & Partanen 1998, 23.)

$$i_s = k\sqrt{2}I_k''$$

, jossa I_k'' = alkuoikosulkuvirran tehollisarvo
 k = sysäyskerroin, riippuu oikosulkupiirin resistanssista R ja reaktanssin X suhteesta

Kaava 1. Sysäysoikosulkuvirta.

Alkuoikosulkuvirta I_k'' tarkoittaa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa oikosulun syntyhetkellä. Sitä ei käytetä mitoituksen perusteena, vaan sen avulla määritellään muita oikosulkusuureita. Arvo saadaan laskettua Thevenin-menetelmän avulla Kaavasta 2. (Huotari & Partanen 1998, 23.)

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

, jossa c = jännitekerroin, joka huomioi sähkömotoristen voimien ja verkon nimellijännitteen eron. Keskijännitteellä suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään arvoa 1,1.
 U_n = verkon nimellijännite
 Z_k = vikapaikasta katsottu impedanssi

Kaava 2. Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta.

Sysäyskerroin voidaan laskea kaavasta 3.

$$K = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}}$$

Kaava 3. Sysäyskerroin.

Oikosulkuvirran aiheuttama lämpenemä otetaan huomioon verkon komponenttien mitoituksessa laskemalla alkuoikosulkuvirran tehollisarvosta I_k yhden sekunnin mittaista oikosulkua vastaava keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta, eli ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} . Arvo kehittää johtimissa saman lämpenemän kuin todellinen oikosulkuvirta. Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 4. Tasavirtatekijä m ottaa huomioon oikosulkuvirran tasakomponentin vaimenemisen ja vaihtovirtatekijä n ottaa huomioon vaihtovirtakomponentin vaimenemisen. (Huotari & Partanen 1998, 29).

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + nt_k}$$

, jossa

- m = tasavirtatekijä
- n = vaihtovirtatekijä
- t_n = vian kestoaika

Kaava 4. Terminen oikosulkuvirta.

4.2 Maasulku

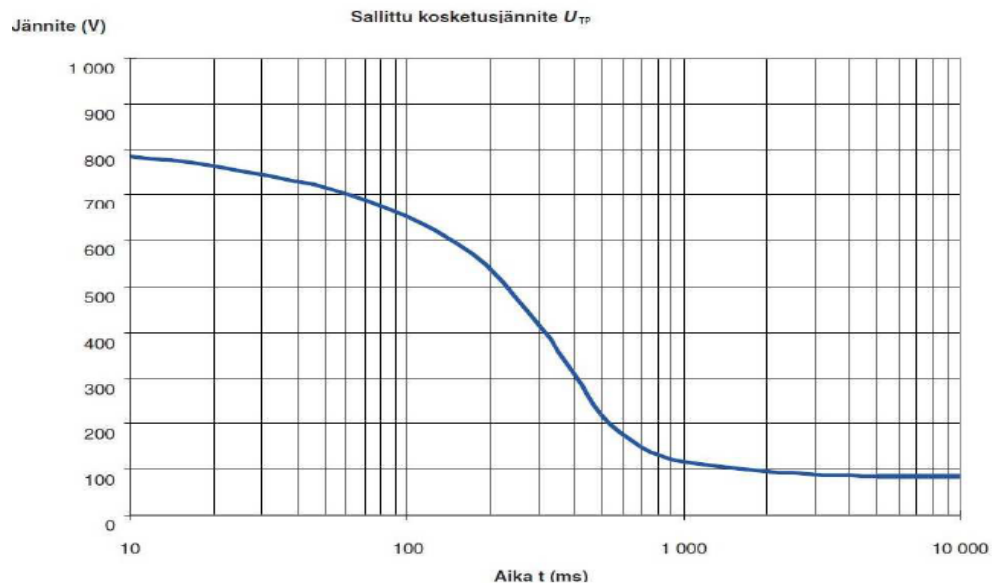
Maasulku on määritelty jännitteisen vaihejohtimen ja maan tai maahan yhteydessä olevan osan eristysviaksi (SFS 6001 2018, 21). Maasulkuvirran suuruus riippuu verkon tähtipisteen maadoitustavasta, galvaanisesti yhteen kytketyn verkon johtopituudesta ja johtolajin maakapasitanssista. Maakaapeli tuottama maasulkuvirta on noin 40 kertaa suurempi kuin avojohdon. (ABB TTT-käsikirja 2000, 248). Verkon kaapelointiasteen kasvassa kosketusjännitteiden hallinta voi edellyttää maasulkuvirran kompensointia. Haasteita tuo myös kaapeliverkon tuoma loistehon kasvu.

Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen tavoitteena on vikapaikkaan muodostuvan, ihmisille vaarallisen kosketusjännitteen rajoittaminen. Kosketusjännitettä voidaan rajoittaa pienentämällä maasulkuvirtaa tai parantamalla maadoitusta. Releen toiminta-aikaa lyhentämällä sallitaan suurempi hetkellinen kosketusjännitteen arvo vikapaikassa.

Kuviossa 2 on esitetty sallittujen kosketusjännitteiden U_{tp} arvot. Sallittujen arvojen katsotaan toteutuvan, jos jompikumpi seuraavista ehdoista toteutuu:

- C1: Kyseinen verkon osa kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään.

- C2: Kaaviossa 2 määritelty sallittu kosketusjännite kaksinkertaisena ei ole mitattua tai laskennallisesti määriteltyä maadoitusjännitettä pienempi. (SFS 6001 2018, 91.)



Kuvio 2. Suurimmat sallitut kosketusjännitteiden arvot vian kestoajan funktiona (SFS6001 2018, 93).

Ehdossa C1 mainittuja laajan maadoitusjärjestelmän alueita Suomessa ovat kaupunkien tiheästi asutetut keskustat tai vastaavat alueet sekä teollisuusalueet, joissa jakeluverkko muodostaa galvaanisesti yhtenäisen maadoitusjärjestelmän. Laajan maadoitusjärjestelmän rakenne on tyypillisesti verkkomaisesti silmukoituva ja muuntamoiden väliset yhteydet ovat lyhyet. Muuntamopiirien on oltava vähintään kahden muun muuntamopiirin maadoitukseen yhdistettynä. Muuntamoiden välisien etäisyydet ovat tyypillisesti lyhyet. (SFS6001 2018, 91.)

4.2.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotettu verkko tarkoittaa sitä, että yhtään verkon tähtipistettä ei ole yhdistetty suoraan tai impedanssin kautta maahan (Elovaara & Haarla 2011a, 210). Maasta erotetun verkon ollessa terveessä tilassa ovat vaihejännitteet maahan nähden symmetrisiä. Verkon maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat myös symmetrisiä. Näiden molempien summat ovat nolla. Jos vaihe joutuu maakosketukseen resistanssin kautta, pienentyy vikaantuneen vaiheen jännite maahan nähden ja terveiden vaiheiden jännitteet

nousevat. Mikäli vikaresistanssi on nolla, viallisen vaiheen jännite maahan nähden pu-
toaa nolnaan ja muiden vaiheiden vaihejännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi.
(Aura & Tonteri 1993, 163.)

Maasulkuvirran suuruus vikaresistanssittomassa maasulussa voidaan laskea kaavalla
5.

$$I_E = \sqrt{3} * 2\pi f * C_0 * U$$

, jossa C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
 U = verkon pääjännite

Kaava 5. Maasulkuvirta maasta erotettu verkko.

Vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee. Pienentynyt arvo saadaan kaa-
valla 6.

$$l_{ef} = \frac{l_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * l_e R_f}{U}\right)^2}}$$

, jossa l_{ef} = maasulkuvirta vikaresistanssin vaikutuksesta
 R_f = vikaresistanssi

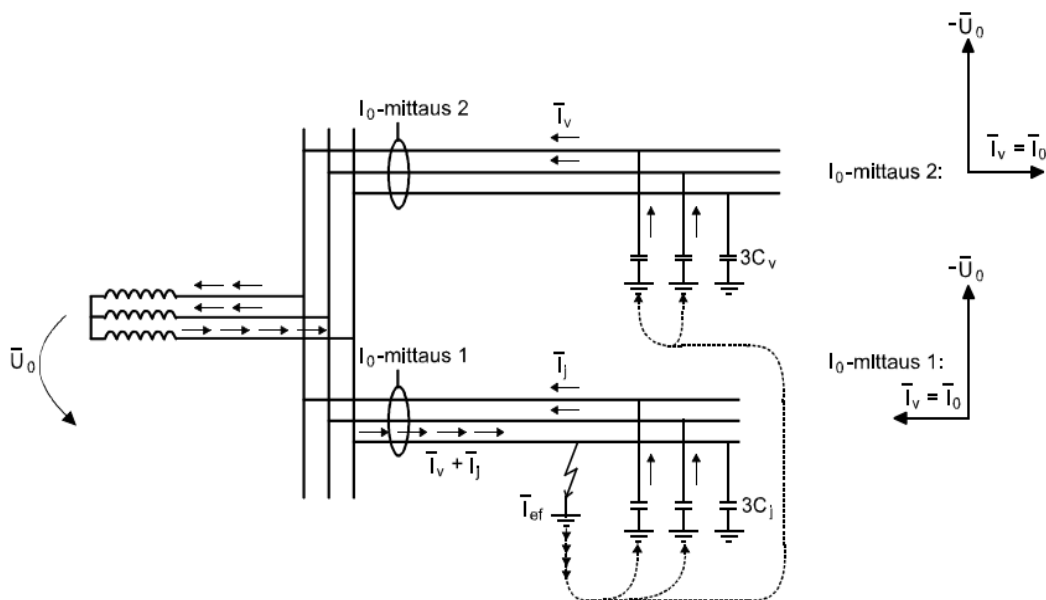
Kaava 6. Maasulkuvirta vikaresistanssin kautta.

Maasulkuvirran aiheuttaman jännite-epäsymmetrian seurauksena syntyy verkon nol-
lajännite ja maan väliin jännite-ero eli nolajännite U_0 . Jännite on sama kuin se jännite,
jonka maasulkuvirta aiheuttaa kulkiessaan maakapasitanssien kautta. Nollajännite voi-
daan laskea kaavalla 7.

$$U_0 = \frac{1}{3C2\pi f} I_e$$

Kaava 7. Nollajännite maasta erotetussa verkossa.

Kuvasta 8 nähdään, miten maasulkuvirta muodostuu maasta erotetussa verkossa. Vikaantuneen lähdön rele näkee maasulkuvirran vastakkaiseen suuntaa kuin terveiden lähdön rele. Vikaantuneen lähdön tuottama maasulkuvirta summautuu pois releen mittauksesta.

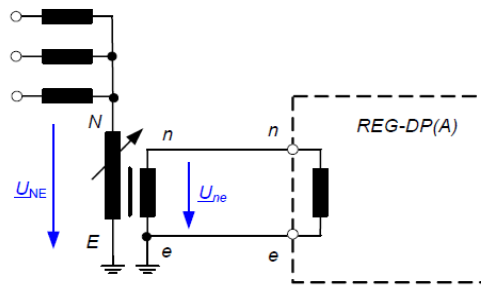


Kuva 8. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (ABB TTT-käsi-
kirja, 252).

4.2.2 Sammutettu verkko

Verkko on sammutettu, jos muuntajan tähtipisteeseen on asennettu kuristin. Kuristimen induktiivinen reaktanssi asetellaan verkon maakapasitanssien reaktanssin suuruiseksi. Maasulun aikana suurin osa virrasta kulkee kuristimen kautta, jolloin maasulkukohtaan kautta kulkee vain kuristimen epäviireisyydestä johtuva virta. (Mörsky 1992, 314.)

Verkon kytkentätilanteiden vaihdellessa on sammutuskuristimen induktanssia säädettävä. Sääto on toteutettu erillisen säätäjän avulla, joka mittaa kelan läpi menevän nolajännitteen. Nollajännitteen mittaukseen käytetään kelan omaa jännitemuuntajaa, jolla saadaan tarkempi mittaus kuin käyttämällä keskijännitekojeiston avokolmiokäämitystä. Kuvassa 9 nähdään REG-DP säätäjän nolajännite mittauspiirin kytkentä. (A Eberle 2007, 55.)



Kuva 9. Sammutuskelan U₀-jännitteen mittausta (A Eberle 2007, 55).

Maasulkuvirran arvo sammutetussa verkossa saadaan kaavalla 8.

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + (R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_t + R_e) + (R_f R_e 3\omega C_0)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}}$$

, jossa R_e = maadoitusresistanssi

R_f = vikaresistanssi

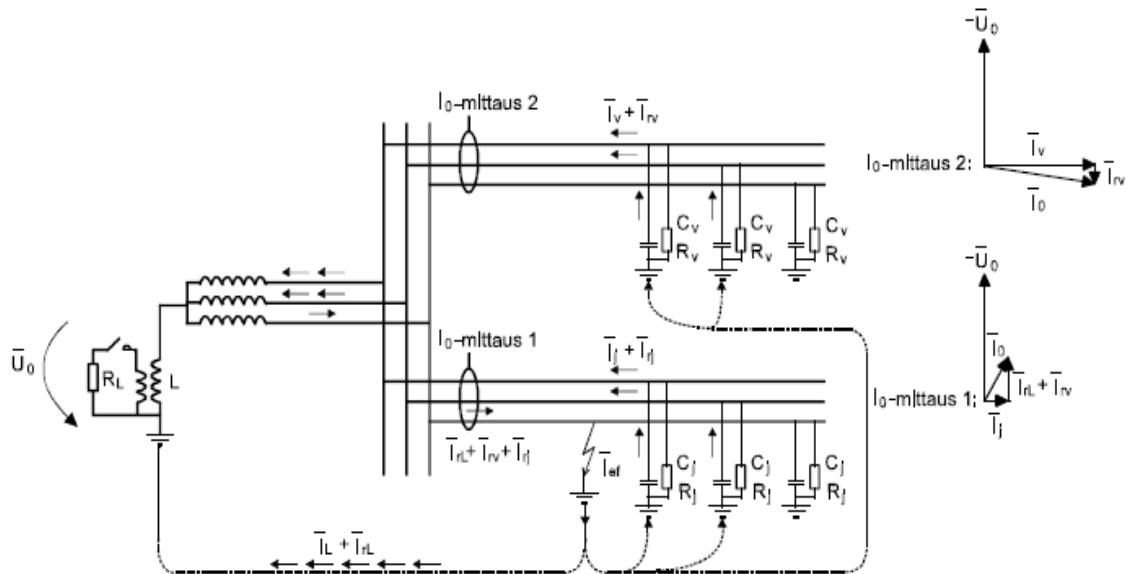
Kaava 8. Sammutetun verkon maasulkuvirta.

Nollajännite saadaan laskettua kaavasta 9.

$$U_o = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_f}\right) + (3\omega C_0)^2}} I_{ef}$$

Kaava 9. Sammutetun verkon nollajännite.

Kuvasta 10 nähdään, miten maasulkuvirta muodostuu sammutetussa verkossa. Kuristimen läpi kulkee nollajännitteen vaikutuksesta induktiivinen virta, joka kompensoi johtimien maakapasitanssien kautta kulkevaa kapasitiivista virtaa. Tästä johtuen maasulkuvirta jää hyvin pieneksi. Relesuojauksen toiminnan varmistamiseksi kuristimen rinnalle on liitetty vastus, joka kytketään virtapiiriin maasulun aikana. Vastus kasvattaa maasulkuvirran pätökomponenttia. (Mörsky 1992, 315–317.)



Kuva 10. Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa (ABB TTT-käsikirja 2000, 255).

4.2.3 Kaksoismaasulku

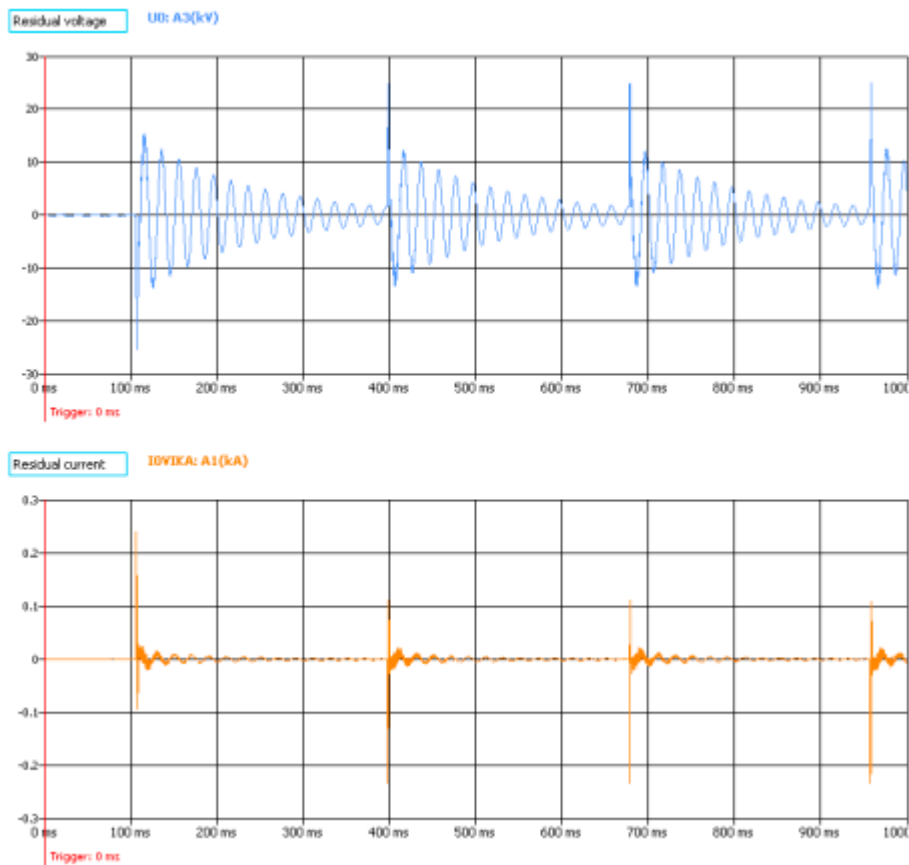
Kaksoismaasulku on tilanne, jossa kaksi vaihejohtinta joutuu suoraan tai vikaresistanssin kautta yhteyteen maan kanssa. Usein kaksoismaasulun syynä on yksivaiheisen maasulun kehittyminen kaksoismaasuluksi. Pieniresistanssin kaksoismaasulku aiheuttaa niin suuren virran, että se saa ylivirtasuojan havahtumaan. Vikapaikkojen ollessa eri johdoilla saattaa maasulkusuoja havahtua ylivirtasuojaa herkemmin. Releen näkemällä summavirralla ja nollajännitteellä on kuitenkin erilaiset vaihesiirrot. Tämän aiheuttaa haittaa suunnatulle maasulkusuojalle. Toisen johdon lauetessa haitta kuitenkin poistuu. (Mörsky 1992, 306–311.)

4.2.4 Katkeileva maasulku

Katkeileva maasulku on erityisesti sammutetun verkon vika. Maakaapeliverkossa tapahtuvat yksivaiheiset maasulut alkavat käytännössä aina katkeilevana maasulkuna. Katkeileva maasulku syntyy, kun kaapelin eriste vaurioituu, jolloin tapahtuu sarja läpilyöntejä vaihejohtimesta maapotentiaaliin. Vaihejännitteen osuessa maapotentiaaliin purkaantuu

vikaantuneen vaiheen kapasitiivinen varaus nopeasti vikapaikkaan. Vikavirta ja nollajännite kasvavat, kunnes valokaari sammuu. Valokaaren sammuttua kaapeli alkaa varautua uudelleen, jolloin nollajännite palautuu lähelle nollaa. Kaapelin varautuessa vikaantuneen vaiheen jännite alkaa nousta pääjännitteen suuruiseksi, jolloin tapahtuu uusi läpilyönti ja sama sykli toistuu uudelleen. (Mikander 2020, 55.)

Sellaiset lähdöt, joissa on sekä ilmajohtoa että maakaapelia, ovat alttiita katkeilevalle maasululle. Tämä johtuu siitä, että ilmajohto-osuuksilla maasulun ilmenemistiheys on suurempi kuin lähdöillä, joissa on vain kaapelia. Maasulkutilanne aiheuttaa jännitteen nousua kunnossa olevissa vaiheissa, joka taas rasittaa kaapeleita ja voi aiheuttaa kaapelivaurioiden syntymisen (Kuisti ym. 1999). Kuviossa 3 nähdään katkeilevan maasulun häiriötallenne, josta vikasyklit ovat selkeästi tunnistettavissa.



Kuvio 3. Katkeileva maasulku, katsottuna vikapaikkaa syöttävältä releeltä (Arcteq 2018, 91).

5 SÄHKÖVERKON SUOJAUS

Suojauksen ja häiriönvalvonnan tarkoitus on taata luotettava ja turvallinen sähkö sen loppukäyttäjälle. Hyvä relesuojaus on selektiivinen ja se kattaa koko järjestelmän. To-teutukseltaan suojauksen on oltava yksinkertainen ja käyttövarma. Suojauksen käytet-tävyyden on oltava hyvä, mikä ilmenee esimerkiksi siten, että verkon topologian muutok-set eivät vaikuta suojauksen toimintaan. Lisäksi suojareleet on voitava koestaa käytön aikana ilman keskeytyksiä.

Suojattava järjestelmä on jaettu virtamuuntajien rajaamiin suoja-alueisiin, jotka voidaan katkaisijoilla erottaa jännitteettömiksi. Suojauksen luotettavuuden lisäämiseksi jokainen verkon kohta kuuluu vähintään kahden eri suojareleen alueeseen. Kahdennus voidaan toteuttaa kahdelle eri releellä pääsuojalla ja varasuojalla, tai siten, että käytetään vierei-sen suojausalueen releen hidastettu porrasta. Suojausalueita ovat muun muassa muun-taja, kiskosto ja johdot. (Elovaara & Haarla 2011a, 344.)

Jotkin suojista ovat absoluuttisen selektiivisiä. Tämä tarkoittaa sitä, että suojarele toimii vain oman alueensa vioissa. Niin kutsutut differentiaalireleet ovat tämän kaltaisia. Selektiivisyys voi perustua myös aikaan, jolloin puhutaan aikaselektiivisestä suojauksesta, tai virtaan eli virtaselektiivisyyteen. (Mörsky 1992, 17.) Virtaan perustuvaa selektiivisyyttä voidaan käyttää, kun johtojen pituus on riittävän pitkä, jolloin vikavirran suuruus riippuu oikosulun paikasta. Lyhyillä etäisyyksillä pitää käyttää aikaan perustuvaa selektiivisyyttä, koska virta on lähes sama joka paikassa. (Huotari & Partanen 1998, 31.)

Suojausjärjestelmä on laaja kokonaisuus, johon kuuluu mittamuuntajat, apuenergiäläh-teet, suojareleet, tiedonsiirtoyhteydet, katkaisijat ja näihin liittyvät kaapeloinnit. Koko jär-jestelmän on toimittava, jotta suojaus toimii oikein ja suunnitellusti. (Mörsky 1992, 16.)

Mittamuuntajat ovat virta- tai jännitemuuntajia, jotka muuntavat sähköverkon ensiösuu-reet releille sopivaan muotoon. Mittamuuntajan ominaisuudet riippuvat siitä, käytetäänkö sitä mittaustarkoituksiin vai suojaustarkoituksiin. Mittaustarkoituksiin käytettävän muun-tajan on kyettävä toistamaan mittaamansa suure mahdollisimman tarkasti normaalilla kuormitusalueella. Suojaustarkoitukseen suunnitellun mittamuuntajan mittatarkkuus ei ole niin merkittävä kuin sen kyky toistaa nimellisarvoihin nähden moninkertaiset ensiö-suureet. (Mörsky 1992, 16.)

Apuenergianlähde on yleensä akusto, jota ladataan tasasuuntaajalla. Releet vaativat toimiakseen jatkuvan apusähköjännitteen. Jännitettä vaativat myös ohjaus- ja laukaisupiirit. Apuenergiajärjestelmät ovat usein kahdennettuja; jos toinen akustoista hajoaa, voidaan se korvata toisen akuston avulla. (Mörsky 1992, 16.)

Katkaisijoiden avulla ohjataan verkon kuormia. Katkaisijan on kyettävä sulkemaan ja katkaisemaan suurin verkossa mahdollisesti esiintyvä virta. Suojareleet ohjaavat mittamiensa suureiden ja asetteluarvojen perustella katkaisijaa. Rele välittää omien koskettimiensa kautta akustolta saatavan apuenergian katkaisijan ohjauskeloille. (Mörsky 1992, 16.) Kokonaisuutta hallinnoidaan ja valvotaan käyttökeskuksessa, jonne mittaus- ja tilatiedot sekä hälytykset välitetään tiedonsiirtoyhteyksien välityksellä.

5.1 Suojareleet

Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (IEC) määrittelee suojaussanastossa releen seuraavasti: ”Rele on sähkövirtapiirin muutoksille herkkä laite, jonka tehtävä on haluttujen seurausmuutosten aiheuttaminen omassa tai vieraassa virtapiirissä” (Paavola & Halme 1979, 40).

Ensimmäiset suojareleet olivat sähkömekaanisia. Nimitys johtuu siitä, että releet sisältävät liikkuvia osia. Näiden releiden toiminta perustuu esimerkiksi magneettikentän kasvuun tai virran lämpövaikutukseen. Sähkömekaaniset releet ovat yksinkertaisia ja oikein huollettuna myös toimintavarmoja. (Paavola & Halme 1979, 46.) Kyseisiä releitä on edelleen käytössä.

Seuraavaksi tulivat staattiset eli elektroniset suojareleet. Staattiset releet tulivat käyttöön 1960-luvulla. Näissä suojareleissä ei ole enää liikkuvia osia. Staattisilla suojareleillä pystytään toteuttamaan vaativampia ja tarkempia suojaustoimintoja kuin sähkömekaanisilla suojareleillä. Lisäksi releiden palautumisaika on mekaanisia releitä lyhyempi. Haittapuolena kyseisillä releillä on puolijohdekomponenttien vikaantuminen ja jatkuva apusähkötehon tarve. (Elovaara & Haarla 2011b, 344–345.)

Nykyaikaiset releet ovat mikroprosessoripohjaisia eli digitaalisia releitä. Digitaaliset releet otettiin käyttöön 1980-luvun lopulla. Näiden releiden suojaustoiminnot ovat huomattavasti monipuolisempia kuin edellisten reletyyppien suojaustoiminnot. Digitaalisissa releissä on myös varsinaisten suojaustoimintojen lisäksi muita ominaisuuksia, kuten katta-

vat vianpaikannus- ja häiriötallenninominaisuudet ja monipuolinen itsevalvonta. Nykyaikaisten releiden käytettävyys on myös informatiivisempaa kuin niitä edeltäneiden releiden.

Digitaalisten releiden uudet ominaisuudet tuovat lisämahdollisuuksia suojauksen toteuttamiseen. Samalla kuitenkin releiden asetteluiden lukumäärän lisääntyminen näkyy muun muassa siinä, että digitaalisilla releillä virhelaukaisuiden määrä on suurempi kuin muilla releillä. Digitaalitekniikan nopea kehitys voi johtaa siihen, että tietyn reletyyppin elinikä jää varsin lyhyeksi, eikä releen vaihtaminen aina toiseen ole yksinkertaista. Digitaalisten releiden muiden kuin suojausominaisuuksiin suoraan liittyvien toimintojen lisääntyessä on kuitenkin muistettava, että releen tärkein tehtävä on havaita vika ja lähettää laukaisukäsky katkaisijoille. (Elovaara & Haarla 2011b, 344–345.)

TESV Oy:n keskijänniteverkossa suojareleet ovat pääsääntöisesti digitaalisia releitä, mutta käytössä on vielä staattisiakin suojareleitä. Ruohonpään sähköasemalla on käytössä SPAC531C3 staattiset kennotermiinaalit. Kennotermiinaalilla tarkoitetaan suojauskokonaisuutta, johon on yhdistetty ylivirta-, maasulkusuojat, jälleenkytkennät ja katkaisijan ohjaustoiminnot. Vanhimpia suojareleitä on alettu uusia. Nyt uusintaprojektit kohdistuvat jo vanhimpiin digitaalisiin releisiin.

5.2 Suojareleasettelut

Nykyaikainen suojarele sisältää ison määrän aseteltavia parametreja. Aseteltavien parametrien määrä riippuu reletyyppistä ja suojauksen toteutustavasta. Suojareleiden asetteluiden hallinta on toteutettu TESV Oy:llä Excel-taulukon avulla (Taulukko 1). Taulukoon on kirjattu suojausfunktioihin liittyvät oleellisimmat arvot. Taulukosta käy myös selville käytetäänkö lähtökennoissa hälyttävää vai laukaisevaa maasulkusuojausta ja se onko lähdöllä käytössä jälleenkytkennät.

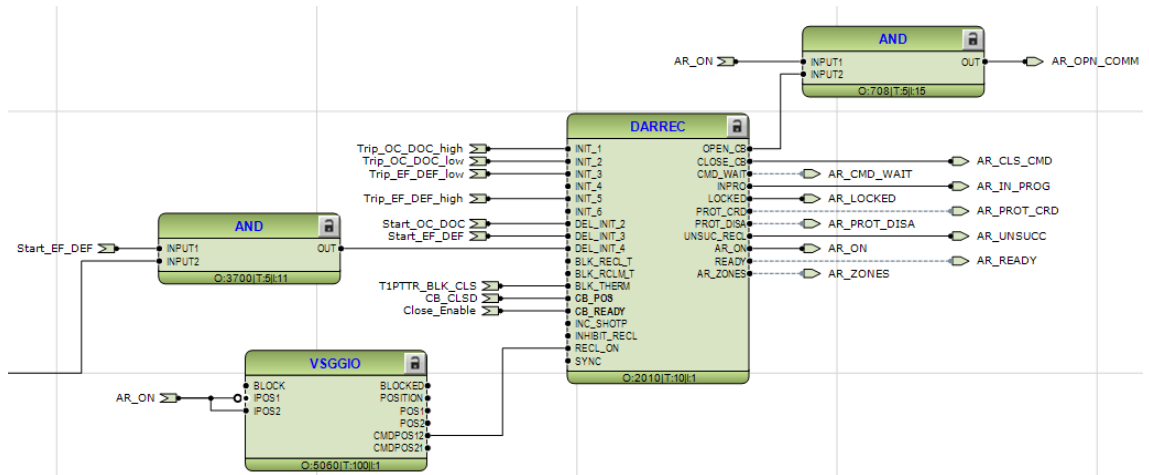
Taulukko 1. Releasettelut.

KENNO		MITTAMUUNTAJAT			YLIVIRTA					MAASULKU							JK		TAAJUUS						
tunnus	osoite	virta	kaap.	jänn.	In/A	I>xIn	t>/s	I>>xIn	t>>/s	In/A	Un/V	Io>/A	to>/s	Io>>/A	to>>/s	Uo/V	kulma	hä/la	start	jänn/s	Hz	Porras			
J02	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J03	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J06	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J07	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J08	Päämuuntaja E03PT2	2000/1		10/0,1	1	1,0	1,0	3,0	0,1	Valokaarisuojaus Ks.Huom.															
J11	Kiskokatkaisija	2000/1			1	1,3	0,8	3,0	0,1																
J15	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J16	Lähtö	400/1	100/1		1	1,5	0,6	7,5	0,1	1	100	0,015	0,5	0,10	0,8	10	-90°	la	yv+ms	0,2					
J19	Päämuuntaja E02PT1	2000/1		10/0,1	1	1,0	1,0	3,0	0,1	Valokaarisuojaus Ks.Huom.															
KENNO		YLI-JÄLJÄNNITE										NOLLAJÄNNITE				HUOMAUTUKSET									
tunnus	osoite	Un/V	U>/V	t>/s	U>>/V	t>>/s	U</V	t</s	U<</V	t<</s	Un/V	Uo>/V	to>/s	Uo>>/V	to>>/s										
J12	W1 jännitemittaus			10/0,1	100	110	1,0	116	0,2	95	3,0	88	1,0	100	20	1,0	U>,U<,Uo> hä / U>>,U<<,Uo>> le								
J13	W2 jännitemittaus			10/0,1	100	110	1,0	116	0,2	95	3,0	88	1,0	100	20	1,0	U>,U<,Uo> hä / U>>,U<<,Uo>> le								

Huoltotöiden tai laitevaurion takia voidaan joutua tekemään esimerkiksi asemakorvaus. Tällöin pitää myös releasetteluita muuttaa. Väliaikaisesti muutetut asetellut kirjataan erilliseen Excel-taulukkoon.

Korvaustilanteiden releasettelut tarkastellaan tapauskohtaisesti. Asemakorvaustilanne voi kuitenkin tulla yllättäen, jolloin ei ole aikaa miettiä korvausasetteluita. Tällöin voi tulla eteen tilanne, jossa suojaus ei toimi selektiivisesti ja vian tapahtuessa keskeytysalue laajenee tarpeettoman paljon. Yleisimmät korvausasettelut olisi hyödyllistä tehdä valmiiksi releiden toisille asetteluryhmille, jolloin ne voitaisiin ottaa nopeasti käyttöön.

Asetteluarvojen lisäksi suojarleen toimintaan vaikuttaa se, miten releen logiikka on ohjelmoitu. Releen ohjelmointi ja logiikan rakenne riippuu relevalmistajasta. Kuvassa 11 on esitetty yksi tapa, miten ABB REF630 -suojarleen konfigurointi voidaan toteuttaa. Konfigurointi toteutetaan logiikkapiireillä, kuten kuvassa näkyvä jälleenkytkentälohko DARREC. Kuvasta nähdään muun muassa se, että ylivirtasuojauksen (OC_DOC) ja maasulkusuojauksen (EF_DEF) voivat käynnistää (INT_1-6) jälleenkytkennän. Jälleenkytkennän käynnistyminen riippuu vielä siitä, miten DARREC lohko on aseteltu. Kuvassa olevalla VSGGO-lohkolla ohjataan jälleenkytkennät päälle tai pois SCADA-järjestelmästä.



Kuva 11. Jälleenkytkentälogiikka TESV Oy:n Huhkolan sähköaseman lähtökennon konfiguraatiosta.

6 SUOJAUSALUEET

Seuraavaksi käsitellään TESV Oy:n keskijänniteverkon tärkeimmät suojauskohteet. Suojauskohteet ovat päämuuntaja, kiskosto ja johtolähdöt.

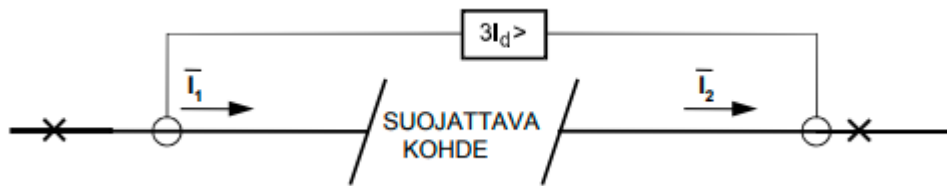
6.1 Päämuuntajan suojaus

Sähköaseman päämuuntaja on verkon kallein yksittäinen komponentti. Tämän takia sen suojaukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Muuntajan ensiöpuoli on suojattu muuntajan sekä syöttävän johdon suojuareleilla. Toisiopuoli kuuluu myös osittain kahteen eri suojausalueeseen. (Mörsky 1992, 189.) TESV Oy:n muuntajien pääsuojaus on toteutettu differentiaalireleellä. Varasuojana on monitoimisuojarele, jossa on ylivirta ja maasulkusuojaus. TESV Oy:llä pääsuojaan ei ole yhdistetty muita toimintoja kuin suojaus, joten ohjaustoiminnot on liitetty varasuojaan.

6.1.1 Sähköiset suojuareleet

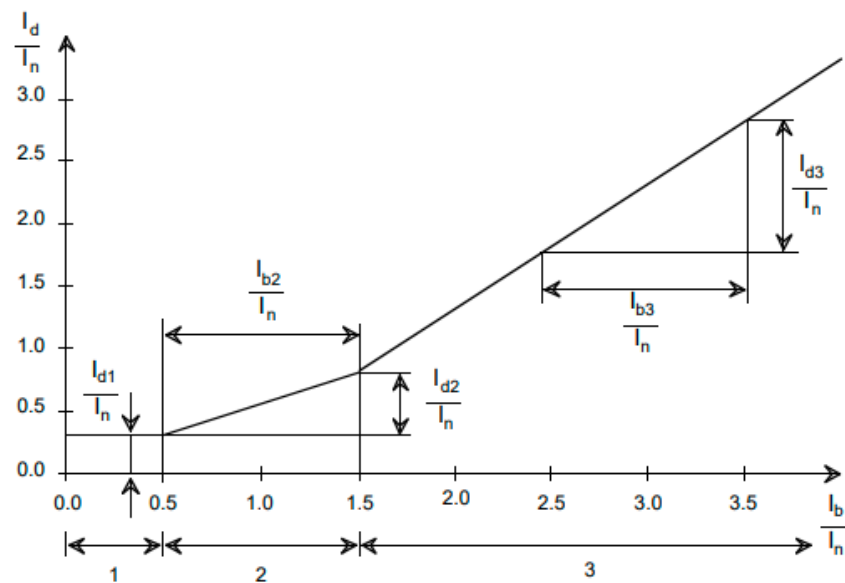
Differentiaalireleen toiminta perustuu Kirchhoffin virtalakiin. Laissa todetaan, että solmupisteeseen tulevien virtojen summa on yhtä suuri kuin pisteestä lähtevien virtojen summa. Muuntajan differentiaalirele mittaa virtaa muuntajan molemmilta puolilta ja muodostaa näistä erovirran. Erovirta ei kuitenkaan ole nolla, vaikka suojausalueella ei olekaan vikaa. Tämä johtuu virtamuuntajien mittausvirheistä, muuntajan tyhjäkäyntivirrasta, käämikytkimen asennonvaihteluista ja käynnistysvirtasysäyksestä. Jotta virhetoiminnoilta vältyttäisiin, on suoja vakavoitava. Vakavoidulla differentiaalireleellä laukaisuun vaadittavan erovirran suuruus riippuu muuntajan läpimenevästä virrasta.

Kuvassa 13 nähdään differentiaalireleen toimintaperiaate; suoja on absoluuttisen selektiivinen, koska se ei huomioi virtamuuntajien ulkopuolella tapahtuvaa vikaa.



Kuva 13. Differentiaalireleen toimintaperiaate (ABB TTT-käsikirja 2000, 230).

Kuviossa 4 nähdään ABB:n differentiaalirele SPAD346C toimintakäyrä. Se on jaettu kolmeen alueeseen. Ensimmäisellä alueella erovirran osuus pysyy vakiona. Tällä asettelulla otetaan huomioon muuntajan tyhjäkäyntivirta. Toisella alueella huomioidaan virta- ja käämikytkimen asennon vaihtelut. Kolmannen alueen jyrkkyys on 100 %, eli vaadittavan laukaisuvirran lisäys on yhtä suuri kuin vaaditun vakavoinnin lisäys. (ABB 1997, 5.) Rele suorittaa laukaisun, mikäli toimintapiste osuu käyrän yläpuolelle. Rele määrittää toimintapisteen paikan käyrällä laskemalla erovirran ja vakavointivirran mitatuista toisiovirroista.



Kuvio 4. Differentiaalireleen toimintakäyrä (ABB 1997, 5).

Erovirta I_d (differentiaalivirta) lasketaan kaavasta 10.

$$I_d = |\bar{I}_1 - \bar{I}_2|$$

, jossa \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 = suojauskohteen tulo ja lähtöpuolen toisiovirrat

Kaava 10. Erovirta (ABB 1997, 5).

Vakavointivirta I_b (biasointivirta) lasketaan kaavasta 11.

$$I_b = \frac{|\bar{I}_1 + \bar{I}_2|}{2}$$

Kaava 11. Vakavointivirta (ABB 1997, 5).

Releen toimintakäyrän muoto ja toimintapisteen laskentatapa vaihtelevat relevalmistajan mukaan, mutta toimintaperiaate pysyy kuitenkin samana.

Differentiaalireleessä on myös lukitustoimintoja, kuten kytkentävirtasysäyksen ja ylimagnetoitumisen estävä lukitus. Kytkevävirran lukitus perustuu erovirran toisen harmonisen ja perustajuisen komponentin suhteeseen. Ylimagnetoituminen havaitaan viiden harmonisen taajuuden avulla. (ABB 1997, 4.)

Päämuuntajat on varustettu käämikytkimellä, joka mahdollistaa muuntajan jännitteen säädön kuormituksen vaihdellessa. Käämikytkintä ohjataan muuntajan jännitteensäätäjällä. Jännitteensäätäjä voi olla erillinen laite, tai se voidaan yhdistää varasuojaan. Jännitteensäätäjä ei ole varsinainen suojarile, mutta siihen voidaan ohjelmoida myös suojaustoimintoja, kuten alijännite- ja ylivirtalukitus. Ylivirtalukitus lukitsee säätäjän toiminnan, jos käyttäjän asettelema-arvot ylittyvät. Tällä suojataan sitä, ettei käämikytkimen asentoa muuteta ylikuormitustilanteessa, jolloin käämikytkin saattaisi vaurioitua. Alijännitelukitus estää säätäjän toiminnan, jos sen mittaama jännite on liian matala. Tällainen tilanne voi tulla esimerkiksi mittauspiirin viasta tai verkolla olevasta oikosulusta. (Mörsky 1992, 203.)

6.1.2 Ei-sähköiset suojarileet

Muuntajan sisäisissä vioissa vikavirran suuruus riippuu muuntajan kierrossulussa olevien käämien määrästä. Mitä vähemmän kierrossulussa olevia käämejä on, sitä suurempi on virta muuntajan sisällä. Toisaalta taas, mitä vähemmän käämejä on oikosulkeutunut, sen pienempi virta on muuntajan liittimissä. Vasta usean prosentin kierrossulku

vastaa muuntajan nimellisvirtaa muuntajan liittimissä. Tämän on yksi syy, jonka takia tarvitaan myös sellaisia suoja, joiden toiminta ei perustu virranmittaukseen. Tällaisia suoja nimitetään primäärisuojiksi. (Mörsky 1992, 194.) Primäärisuojia ovat kaasurele, ylipaineventtiili, virtausrele, painerele ja muuntajan käämin sekä öljyn lämpötilaa valvovat mittarit.

Kaasurele (Buchholz-rele) suoja muuntajaa erilaisilta eristevoiltoilta, kuten käämi-, kierros- ja runkosulkuja. Suoja asennetaan muuntajasäiliön ja paisuntasäiliön väliseen putkeen. Normaalisti rele on täynnä öljyä. Jos muuntajan säilössä tapahtuu vika, saa se aikaan eristeaineiden ja öljyn kaasuuntumaan. Kaasu työntää öljyä pois releeltä kohti paisuntasäiliötä. Tällöin releen uimurikytkimet laskevat ja saavat ensin aikaan hälytyksen ja tämän jälkeen, jos vika on ollut riittävän suuri, laukaisee kaasurele muuntajan irti verkosta. (Mörsky 1992, 202.)

Muuntajien ylikuormitussuojana on öljyn kuumimman kohdan lämpötilaa mittaava kosketinlämpömittaria. Mikäli lämpötila nousee, käynnistyvät ensimmäiseksi muuntajan jäähdytyspuhaltimet, mikäli muuntajassa sellaiset on. Jos lämpötila jatkaa edelleen nousemista, aktivoituu hälytys ylikuumenemisestä. Mikäli lämpötila vieläkin nousee, laukaistaan muuntajalta kuormat pois.

Mikäli muuntajan kuormitus vaihtelee paljon, pelkkään öljynlämpötilaan perustuva mittaus ei anna riittävän nopeasti oikeaa käsitystä muuntajan kuormitustilanteesta. Tilanne saadaan ratkaistua toisella lämpötilamittarilla, eli niin sanotulla käämin lämpötilan kuvaajalla. Lämpömittariin on kytketty käämin lämpötilaa kuvaava lämmitysvastus. Lämmitysvastusta syöttää muuntajan sisällä oleva virtamuuntaja, joka mittaa muuntajan kuormitusvirtaa. Mittapalkeeseen vaikuttaa sekä käämin että öljyn lämpeneminen. (Mörsky 1992, 199.)

Virtaus- ja painerele suojaavat käämikytkintä, joka on asennettu omaan öljytilaan. Suojien toiminta perustuu käämikytkimen ja käämikytkimen paisuntasäiliön väliseen öljyn virtaukseen. (Mörsky 1992, 204.)

6.2 Kiskosuojaus

Sähköaseman kiskostossa tapahtuva vika aiheuttaa paljon tuhoa ja mahdollisesti pitkäaikaisen sähkönjakelun keskeytyksen. Tämä korostuu etenkin kojeistoissa, joissa on vain yksi kisko. Kiskoviolla tarkoitetaan vikaa, joka on virtamuuntajista katsottuna kiskon

puolella. Vika luetaan johtoviaksi, jos vika tapahtuu virtamuuntajista katsottuna johdon puolella. Virtamuuntajan sijainti vaikuttaa siis siihen, mihin alueeseen viat kuuluvat. Jos lähtöjen vaihevirtoja mitataan kaapelivirtamuuntajilla, kuuluu kaapelipäätteet myös kiskosuojan piiriin. (Mörsky 1992, 207.)

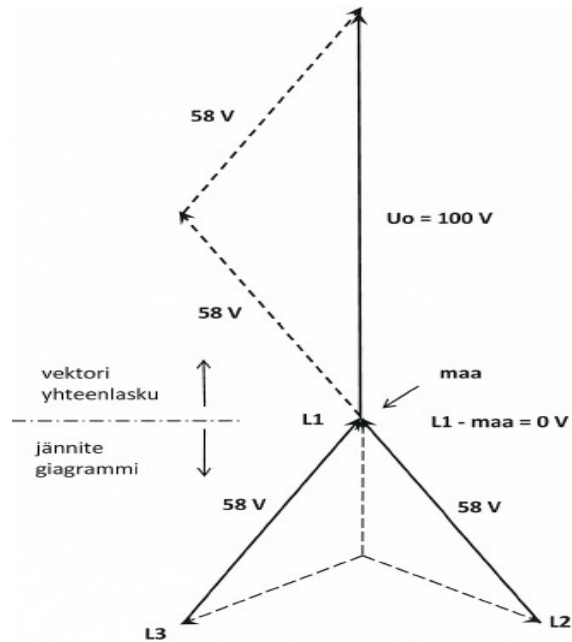
TESV Oy:n keskijänniteverkossa, jossa tehon siirtosuunta on ennalta määrätty, voidaan kiskosuojaus toteuttaa lähtöjen ylivirtareleillä, eli niin sanotulla lukitussuojauksella. Jokaisessa kiskoon liittyvässä lähdössä on ylivirtarele. Ylivirtareleet toimivat vain kiskoston ulkopuolisissa vioissa. Lähdön suojareleen havahtuessa se antaa lukituskäskyn syöttökennojen ylivirtareleiden hetkellisportaalle. Jos vika ei silti poistu, toimii syöttökennojen ylivirtasuojien alempi porras varasuojana. Mikäli vika on kiskostossa, syöttöjen ylivirtareleet toimivat hetkellisportaalle asetellun lyhyen hidastuksen jälkeen. (Mörsky 1992, 211–212.)

6.2.1 Jännitesuojaus

Liian pitkään vaikuttavat yli- tai alijännitteet vaurioittavat sähköä käyttäviä laitteita. Muuntajan käämikytkin säättää verkon jännitettä. Käämikytkimen toiminta ei kuitenkaan ole riittävän nopea ja säätöalue ei riittävän suuri, jotta verkon jännitesuojaus voitaisiin toteuttaa sillä. (Mörsky 1992, 232.)

TESV Oy:n kiskostojen yli-, ali- ja nollajännitesuojaus on toteutettu yleensä omalla monitoimisuusojareleellä, joka on sijoitettu kojeiston mittauskennoon. Joillain asemilla jännitesuojaus on liitetty suoraan syöttökennon monitoimisuusajaan. Alijännitesuojaus on toteutettu pääsääntöisesti hälyttävänä. Laukaisu on otettu käyttöön vain, jos kiskostoon on liitetty isoja moottoreita, joille alijännite on vahingollinen. Mikäli asemalla on loistehon kompensointi, laukaistaan kyseinen lähtö aina alijännitteestä pois. Ylijännitteen ylempi porras on laukaiseva ja se antaa laukaisukäskyn muuntajakatkaisijalle.

Kiskon maasulkusuojana on U0 jännitettä mittaava vakioaikainen suojauslohko. TESV Oy:llä nollajännitesuoja on aseteltu hälyttäväksi. Niillä asemilla, joilla on laukaiseva maasulkusuojaus käytössä, tullaan U0 suojaus asettamaan laukaisevaksi, koska se toimii varasuojana lähtöjen maasulkusuojaukselle. Maasulkujännite mitataan jännitemuuntajien avokolmiokäämityksestä. Kuvassa 12 on kuvattu, miten maasulkujännite muodostuu suorassa maasulussa (maadoitusvastus $R_f = 0$) avokolmiokäämin toisiojännite on 100 V.



Kuva 12. Maasta erotettu verkko, L1-vaihe maasulussa $R_f = 0$ (Inspecta 2014).

6.2.2 Taajuussuojaus

Euroopan Komissio on antanut sähköjärjestelmän hätätilaa ja käytönpalautusta koskevan asetuksen (Network code on Electricity Emergency and Restoration, COMMISSION REGULATION (EU) 2017/2196). Asetuksen mukaisesti Fingrid Oyj:n ja jakeluverkkoyhtiöiden on yhdessä luotava alitaajuussuojaus. Asetuksessa määritellään myös muita toimenpiteitä häiriötilanteiden varalle. (Fingrid 2019.)

Kaksiportainen alitaajuussuojaus oli käytössä vuoteen 2007 asti jakeluverkon keskijännitekojeistoissa. Järjestelmä purettiin sen vaikean hallittavuuden takia. Fingrid Oyj keskitti tuolloin alitaajuussuojauksen kantaverkon 110 kV sähköasemille. (Fingrid 2006.) Alitaajuussuojaus tullaan ottamaan uudelleen käyttöön ja suojauksen tulee olla käytössä vuoden 2022 loppuun mennessä. Suojauksen piiriin tulee kytkeä 30 % kokonaiskuormasta. Pudotettavat portaat voidaan jakaa viiteen ryhmään, jossa neljä ensimmäistä porrasta pitävät sisällään kukin 5 % ja viides porras 10 % kuormasta. Portaan kokonaistoi-
minta-aika ei saa ylittää 0,15 s. Alitaajuussuojaus on perinteisesti toteutettu mittausken-
non releellä, josta kuormienpudotukset on johdotettu kiertokaapeleilla laukaistaville kuor-
mille. Tämä toteutustapa lisää hieman viivettä laukaisuaikoihin, mutta säästää kustan-
nuksissa, koska lähtökentöjen releille ei tarvitse viedä jännitekiertoja. Relesaneerausten
yhteydessä taajuussuojaus tullaan lisäämään lähtöjen releisiin.

Taulukko 2. Alitaajuussuojauksen asettelu.

Porras	f [Hz]	Aika [s]	kulutus %
1	48,8	0,15	5
2	48,6	0,15	5
3	48,4	0,15	5
4	48,2	0,15	5
5	48	0,15	10

6.3 Valokaarisuojaus

TESV Oy:n keskijännitekojeistot ovat muutamaa asemaa lukuun ottamatta suojattu valokaarisuojauksella. Kojeistojen kennoihin on asennettu pääsääntöisesti kaksi valokaarianturia. Toinen on asennettu kisko- ja toinen kaapelitilaan.

Valokaarisuojauksen toiminta perustuu valokaaren ja virran yhtäaikaiseen havaitsemiseen. Releen pitää mitata oikosulkuvirta ja havaita valokaari, jotta se välittää laukaisun eteenpäin. Käyttämällä virtahtoa saadaan tehokkaasti estettyä vahinkolaukaisut esimerkiksi taskulampun kirkkaasta välähdyksestä. TESV Oy:n sähköasemilla virtahto on otettu muutamaa asemaa lukuun ottamatta keskijännitepuolelta. Jos virtahto otetaan suurjännitepuolelta, saadaan valokaarisuojauksen piiriin myös syöttökennon kaapelipääte.

Valokaarisuojauksen toiminta on erittäin nopea. Rele antaa laukaisukäskyn noin 10 ms kuluttua vian havaitsemisesta. Toiminta-aikaan on lisättävä vielä katkaisijan toiminta, joka riippuu katkaisijatyypistä, mutta on noin 40-60 ms.

Valokaarisuojaus voidaan toteuttaa kaksikiskojärjestelmässä selektiivisesti, jolloin vian tapahtuessa laukaistaan vain sen puolen syöttökatkaisijat, jossa on havaittu valo- ja vikavirta. Tällöin pitää myös kiskokatkaisija laukaista. Suojauksesta voi tulla monimutkainen, joten hyvät dokumentit ja selkeä kuvaus suojauksen toiminnasta on tärkeää tehdä.

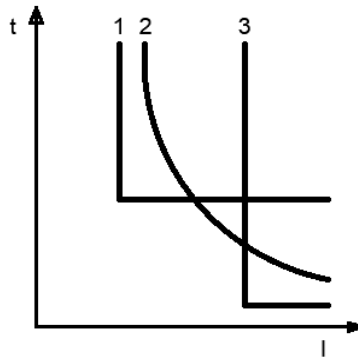
Kiskostossa tapahtuva suurivirtainen valokaari aiheuttaa aina isoa tuhoa, joten suojauksen käytettävyyden ja selkeyden kannalta voi olla parempi, että valokaarisuojauksella ei haeta liiaksi selektiivisyyttä, vaan vian sattuessa laukaisu välitetään aina jokaiselle kiskostoon liitetulle syöttökatkaisijalle.

6.4 Johtolähdön suojaus

Tyypillisin suojattava keskijännitekohde on johtolähtö. Suojauksen toteutustapa riippuu siitä, onko kyseessä kaapeli- vai ilmajohtolähtö. Yleisimmät käytössä olevat suojausfunktiot ovat ylivirta- ja oikosulkusuojaus, maasulkusuojaus ja alitaajuussuojaus. Varsinaista ylikuormitussuojausta ei ole käytössä. Johtojen kuormituksille on asetettu suurimmat sallitut arvot SCADA-järjestelmään, josta saadaan hälytys, mikäli rajat ylittyvät. Jälleenkytkennät ovat johtolähdöllä käytössä, mikäli johtolähtö sisältää ilmajohto-osuuksia.

6.4.1 Ylivirta- ja oikosulkusuojaus

TESV Oy:n johtolähtöjen ylivirta- ja oikosulkusuojaus on toteutettu kaksiporraisella vakioaikaisella ylivirtasuojauksella. Ylivirtasuojaukselta voidaan käyttää, kun pienin vikavirta on suurempi kuin suurin kuormitusvirta (Elovaara & Haarla 2011b, 340). Kuviossa 5 on esitetty ylivirtareleen eri toimintatavat. Suojarele voidaan asettaa toimimaan vakioaikaisena, käänteisaikaisena tai hetkellisaikaisena. Käänteisaikainen toiminta tarkoittaa, että rele toimii sitä nopeammin, mitä suuremman virran se mittaa.



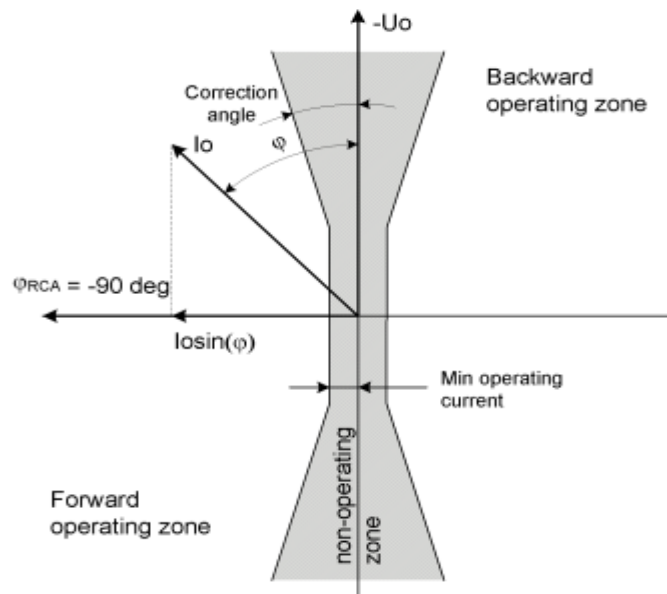
Kuvio 5. Ylivirtareleen toiminta-aika virran funktiona, 1 vakioaika, 2 käänteisaika, 3 hetkellisaika.

Ylivirtasuojauksen selektiivisyys on varmistettu porrastamalla peräkkäisten suojien ajat ja käyttämällä lukitusehtoa syöttökenttien ja lähtökenttien välillä. Aikaselektiivisyyden kannalta hyvä yleisohje on pitää vähintään 200 ms porrastus peräkkäisten suojien välillä. Lyhempi aika voidaan sallia tapauskohtaisesti. Nykyaikainen rele toimii selektiivisesti vielä 100 ms hidastuksella. Ajoissa on muistettava ottaa huomioon katkaisijan toimintaajat.

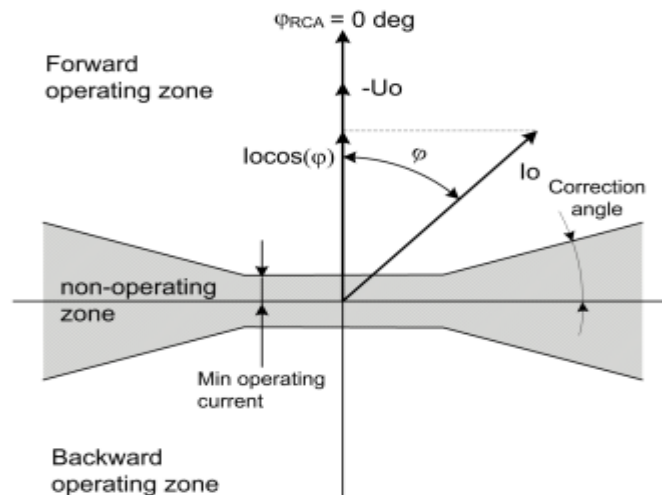
6.4.2 Maasulkusuojaus

TESV Oy:n keskijänniteverkon maasulkusuojaus on suunnattu ja toimintatavan määrää verkon maadoitustapa. Maasulkusuojaus voi olla joko hälyttävä tai laukaiseva. Jos johtolähtö ei liity laajaan maadoitusjärjestelmään, määräävät johtolähdöllä esiintyvät suurimmat kosketusjännitteet sen, onko maasulku laukaiseva vai ei. Lähdön rakenne vaikuttaa myös maasulkusuojauksen toteutustapaan. Jos johtolähtö sisältää ilmajohdon, on maasulkusuojaus silloin aina laukaiseva.

Maasulkuvirran suunta määritellään mittaamalla kaapelivirtamuuntajan kautta summavirtaa ja jännitemuuntajien avokolmiokäämityksestä nolajännite. Näiden välisestä kulmasta tai tehosta voidaan päätellä maasulun suunta. Maasta erotetussa verkossa mitataan maasulkuvirran loiskomponenttia ($I_0 \sin$) (Kuvio 6) ja sammutetussa verkossa maasulkuvirran pätkökomponenttia ($I_0 \cos$) (Kuvio 7).



Kuvio 6. $I_0 \sin$ karakteristika maasta erotettu verkko (ABB 2018, 456).



Kuvio 7. $I_0\cos$ karakteristika sammutettu verkko (ABB 2018, 456)

Verkon maadoitustavan vaihtuessa pitää suojarleiden maasulkuasettelut muuttua. Suojareleille on tuotu tieto sammutuskuristimen erottimen asennosta. Siirryttäessä esimerkiksi sammutetusta verkosta maasta erotettuun verkkoon avataan sammutuskuristimen erotin, jolla kuristin on kytketty muuntajan tähtipisteeseen. Maasulkusuojan asettelut vaihtuvat, kun rele saa erottimen auki-tiedon.

Sammutetussa verkossa tulisi käyttää myös katkeilevaa maasulkusuojausta. TESV Oy:llä sammutettua verkkoa on Ilpoisten ja Hirvensalon sähköasemilla sekä Ekvallan kytkemön alueella. Hirvensalon asemalla olevissa releissä ei ole katkeilevaa maasulkusuojausta käytettävissä. Ekvallassa ja Ilpoisissa kyseinen suojauslohko on ja se on aseteltu hälyttäväksi. Suojauksen asettamista laukaisevaksi tulisi miettiä. Ilpoisten asemalla katkeilevan maasulkusuojauksen käyttöönotto laukaisevana vaatii pienen konfiguraation lisäyksen releen logiikkaan. Tulevaisuudessa maasulun kompensointilaitteita tullaan todennäköisesti lisäämään verkkoon. Suojauksen toiminnasta olisi hyvä saada käyttökokemuksia, jolloin jatkossa suojauksen käyttöönotto olisi helpompaa.

Maasulkusuojauksen kannalta yksi ongelma on keskijänniteverkolla olevat välimuuntajat. Välimuuntajilla jännite muunnetaan 10 kV ja 20 kV välillä. Välimuuntajat ovat sellaisen verkon alueella, jossa on käytössä laukaiseva maasulkusuojaus. Jos välimuuntajan takana tapahtuu maasulku, ei sähköasemalla oleva syöttävän lähdön rele näe sitä.

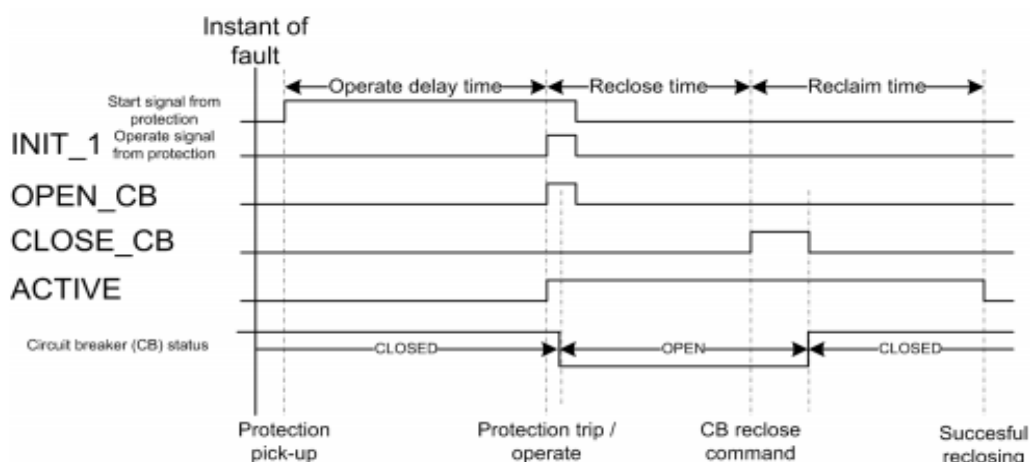
Välimuuntajan molemmille puolille on asennettu omat suojureleet. Suojareleet mittaavat nolajännitettä muuntajan tähtipisteisiin asennettujen jännitemuuntajan kautta. Mikäli nolajännite ylittää releeseen asetetun arvon, antaa rele hälytyksen. Suojaus tullaan muuttamaan siten, että se saadaan laukaisevaksi myös muuntajan takana tapahtuvissa maasuluissa. Yksi vaihtoehto on asentaa muuntajan molemmille puolille pylväskatkaisijat tai katkaisijakennot, joiden laukaisu toteutettaisiin välimuuntajalla olevilla suojureileillä.

6.4.3 Jälleenkytkennät

Avojohtoverkossa suurin osa vikatapauksista voidaan poistaa, kun vikakohta tehdään hetkellisesti jännitteettömäksi. Jälleenkytkentälohko saa tiedon suojureleen laukaisusta, jolloin se ohjaa katkaisijan kiinni määritellyn jännitteettömän ajan kuluttua; tyypillisesti aika on 200 ms. Jännitteettömänä aikana vian seurauksena syntynyt valokaari ehtii samua ja asiakas kokee vain valojen välähdyksen. Yleensä jälleenkytkentä suoritetaan ylivirta- ja maasulkusuojan ensimmäisestä portaasta. Jos vika alkaa suoraan oikosululla, voidaan olettaa, että kyse on jostain muusta kuin ohimenevästä viasta, ja jälleenkytkentä jätetään tekemättä. (Mörsky 1992, 352–353.)

Kuviossa 8 nähdään jälleenkytkentäohjelma, jossa pikajälleenkytkennän käynnistys tapahtuu suojausportaan laukaisusignaalista. Jännitteettömässä ajassa on huomioitava katkaisijan toiminta. Keskijännitekatkaisijan avautuminen tapahtuu noin 40 ms ja kiinniohjaus noin 60-80 ms. Katkaisijan kiinniohjauksen jälkeen käynnistyy takaisinkytkentäaika. Jos tämän vaiheen aikana suojaus havahtuu, ei uutta jälleenkytkentää enää tehdä, vaan suoritetaan lopullinen laukaisu.

TESV Oy:n keskijänniteverkossa releiden jälleenkytkentäohjelma sisältää yhden pikajälleenkytkennän. Jos vika ei poistu, suoritetaan lopullinen laukaisu. Jälleenkytkentä käynnistetään ylivirta- ja maasulkulohkoilta, jännitteetön aika on 200 ms.



Kuvio 8. Jälleenkytkentäohjelma (ABB 2018, 456).

6.4.4 Taajuussuojaus

Tehon vajuus syntyy, kun verkossa on tuotantoa kulutukseen nähden liian vähän. Tehon vajuus ilmenee selvemmin kantaverkon taajuuden alenemisena. Taajuuden muutosnopeus on tyypillisesti 0,1-1,0 Hz/s (Mörsky 1992, 357).

Taajuussuojaus tulee jatkossa olemaan TESV Oy:llä johtolähtökohtainen. Tällöin suojauksen hallinta ja raportointi on helpompaa. Suojauksen toiminta-aika vaatimus 0,15 s aiheuttaa sen, että suoja on lukittava verkossa tapahtuville nopeilla jännitteenheilahteiluilla, joita esimerkiksi verkossa tapahtuvat oikosulut saavat aikaan.

6.5 Relekoestus

Relekoestuksen tarkoituksena on todeta suojauksen toimivuus ja asetteluarvojen paikansäilyvyys. TESV Oy:llä relekoestukset pyritään tekemään suojauskohteen ollessa korvattuna tai keskeytyksessä. TESV Oy:n suojareleille on laadittu koestusohjelma, jonka mukaan koestukset tehdään. Suojareleet, joissa on itsevalvonta, eli käytännössä digitaaliset releet, koestetaan kuuden vuoden välein. Staattiset releet koestetaan kolmen vuoden välein. Valokaarisuojauksen toiminta koestetaan kahden vuoden välein. Valokaarisuojan koestussykli on melko tiheä. Valokaarisuojia on uusittu, jolloin vanhimmat releet ovat poistumassa. Koska valokaarisuojan koestus pitää tehdä käyttöpäällä, lisää

se inhimillisen virheen riskiä, jonka seurauksena voi koko asema irrota verkosta. Valokaarisuojauksen koestussykliä olisi syytä pidentää kolmeen tai neljään vuoteen.

Muuntajan ei-sähköiset suojaukset koestetaan muuntaja huoltojen yhteydessä. Koestussykli on kuusi vuotta. Koestustilanteessa on pyrittävä testaamaan koko järjestelmä mahdollisimman kattavasti. Laukaisujen testaamien katkaisijalle asti on aina suositeltavaa, kun siihen on mahdollisuus. Koestuksissa tulee myös huomioida hälytysten ja signaalien testaus. TESV Oy:n asemilla on hieman kirjava käytäntö siitä, mitä hälytyksiä ja signaaleja hälytyskeskukselle ja SCADA-järjestelmään on otettu. Tätä olisi hyvä selkeyttää. Suojauskohteittain tulisi laatia lista siitä, mitä hälytyksiä suojareleestä otetaan ylöspäin.

7 KEHITTÄMISKOHTEET

Suojaus selvitys osoittaa, että kaiken kaikkiaan TESV Oy:n keskijänniteverkon suojaus on toteutettu hyvin. Suojareleitä ja verkon komponentteja huolletaan ja koestetaan niille määriteltyjen huolto-ohjelmien mukaisesti. Tällä voidaan varmistua siitä, että suojaus toimii oikein verkon vikatilanteissa. Seuraavaksi esitellään suojaus selvityksen pohjalta laaditut toimenpide-ehdotukset, joiden avulla TESV Oy:n keskijänniteverkon suojausta voidaan kehittää edelleen. Kehittämiskohteet ovat sellaisia, että niihin ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa ratkaisua. Jokainen kehittämissuositus antaa yhden vaihtoehdon, miten tilannetta voidaan kehittää.

7.1 Releasettelut

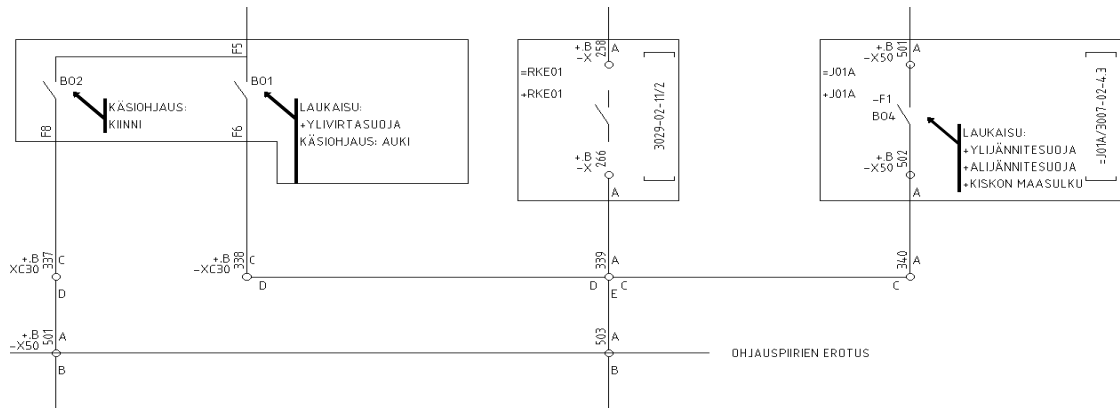
TESV Oy:llä käytössä oleva releasettelutaulukko antaa selkeän kuvan lähtökennojen suojausfunktionista. Jännitesuojauksen osalta taulukko ei kuitenkaan kerro sitä, mihin suojausfunktion otettavat laukaisut on ohjattu. Laukaisuiden selvittämiseksi pitää ensin tutkia releen logiikkaa, josta pitää selvittää, mihin releen lähtöön suojausfunktion laukaisu on liitetty. Tämän jälkeen on tutkittava piirikaavioista, miten kyseinen lähtö on johdettu kojeistossa. Monesti pitää vielä tutkia laukaisun vastaanottavan releen logiikkaa ja selvittää sieltä, onko, kyseinen suoja käytössä. Tilanteen helpottamiseksi olisi hyvä, jos releasettelutaulukosta kävisi selkeästi selville se, mihin kukin laukaisu vaikuttaa. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi lisäämällä releasettelutaulukkoon tieto siitä, mihin laukaisut vaikuttavat.

Poikkeusasettelut kirjataan tällä hetkellä erilliseen Excel-tilukkoon. Releasettelutaulukko ja poikkeusasettelutaulukko olisi hyvä yhdistää. Releasetteluiden hallinta helpottuisi, mikäli nämä asetellut olisivat yhdessä tilukossa. Tällöin ei myöskään pääsisi niin helposti syntymään tilannetta, että jokin asetelluarvo unohtuu palauttaa normaalitilaan.

Releiden sisäisen logiikan rakenne vaikuttaa vaikutta siihen, miten rele toimii ja tämä ei selviä asemalla olevista piirikaavioista. Logiikan rakenteen selvittämiseksi on oltava oikea relesovellus ja osaaminen sen tulkitsemiseksi. Kaikilla työntekijöillä, jotka työskentelevät sähköasemilla ei tällä hetkellä ole pääsyä tai osaamista selvittää releen logiikkaa. Muutamilla TESV Oy:n asemilla tämä on ratkaistu siten, että releen logiikkakaaviot on tulostettu kansioihin, jolloin niihin on kaikilla pääsy. Kehittämissuositus on, että kaikille

asemille toimitetaan kansiot, joista releen logiikkakaaviot löytyvät helposti. Lisäksi ole-massa oleviin piirikaavioihin tulisi lisätä, mitkä suojausfunktiot ohjaavat lähtökoskettimia.

Kuvassa 13 nähdään hyvä esimerkki siitä, miten piirikaavioihin on eräällä TESV Oy:n sähköasemalla merkattu tiedot siitä, mikä suojausfunktio kyseistä lähtökosketinta ohjaa. Sekä logiikkakaaviot että piirikaaviolisäykset helpottavat ja nopeuttavat esimerkiksi vian selvitystä.



Kuva 13. Lähtökoskettimien merkintä. (TESV Oy:n Maarian sähköasema)

7.2 Korvausasettelut

Asemakorvaustilanne voi tulla eteen nopeasti esimerkiksi kriittisen komponentin vaurioitumisen takia. Tällöin olisi hyvä, jos tilanteesta olisi laadittu valmiit korvausasettelut releiden toisille asetteluryhmille. Poikkeustilanteessa korvausasettelut olisivat näin helpommin otettavissa käyttöön, jolloin esimerkiksi maasulkusuojaus saataisiin nopeasti vastaamaan muuttunutta tilannetta ja sallitut kosketusjänniterajat eivät ylittyisi. Koska korvaustilanteissa galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus yleensä lisääntyy, kasvaa myös maasulkuvirta. Tämä on huomioitava lyhentämällä korvaustilanteessa releiden maasulkusuojauksen toiminta-aikoja. Ylivirtasuojauksen osalta korvaustilanteissa tulee tarkastella selektiivisyyttä.

TESV Oy:llä ei ole käytössä valmiita korvausasetteluja. Valmiit korvausasettelut tulisi laatia ainakin niille asemille, jolla on vai yksi päämuuntaja, koska päämuuntajan vaurioituminen aiheuttaa sen, että asema on korvattava. Näitä asemia ovat Artukainen, Maria, Pääskyvuori ja Hirvensalo. Releiden toisia asetteluryhmiä käyttöönotettaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota siihen, että muiden suojauslohkojen asettelut pysyvät oikeina

asetteluryhmien muutoksen huolimatta, koska asetteluryhmä vaihtuu aina kaikissa suojausfunktioissa.

7.3 Katkaisijanvikasuoja

TESV Oy:n keskiännitekojeistossa ei ole käytössä katkaisijanvikasuojaa. Lähtökatkaisijan toimimattomuus vikatilanteessa voi johtaa siihen, että vika poistetaan vasta syöttökenttien hidastetulla ylivirtasuojauksella. Katkaisijanvikasuoja voidaan asettaa toimimaan kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on asettaa se lähettämään toinen avauskäskyn (retrip) vikaantuneelle katkaisijalle. Mikäli katkaisija ei tästäkään huolimatta aukea, lähettää se vasta siinä tilanteessa laukaisukäskyn ylemmän tason katkaisijalle. Toinen tapa on asettaa suojaus siten, että laukaisu välitetään heti epäonnistuneen laukaisun jälkeen ylemmän tason katkaisijalle. Jälkimmäisessä tilanteessa vika saadaan poistettua nopeammin, mutta menetetään se mahdollisuus, että lähtökatkaisija avautuisi toisella yrittämällä, jolloin koko asemaa ei tarvitsisi lakaista irti verkosta.

Katkaisijavikasuojaa ei ole käytössä millään keskiännitekojeistolla. Katkaisijan vika on harvinainen, mutta mahdollinen, ja siksi siihen tulee varautua. Vika voi syntyä myös ihmillisen virheen takia. Esimerkiksi jos koestustilanteen jälkeen laukaisuliittimet ovat jääneet auki, ei katkaisija toimi vikatilanteessa. Laukaisupiirien katkoksiin on kylläkin joillain TESV Oy:n sähköasemilla varauduttu. Katkaisijat on varustettu laukaisupiirin valvonnalla, joka antaa hälytyksen, jos se huomaa katkoksen laukaisupiirissä. Laukaisupiirin valvonta olisi hyvä lisätä niille asemille, joilta se puuttuu.

Katkaisijavikasuojan virheellinen toiminta aiheuttaa koko aseman irtoamisen verkosta, joten sen käyttöönottoaminen on tehtävä harkiten. Virhetoimintojen estämiseksi katkaisijavikasuojalle asetetaan muun muassa virtaehto, jonka pitää täytyä ennen kuin suoja voi toimia. Virtaehdon tulee asettaa siten, että se huomio lähdöllä vaikuttavan pienimmän vikavirran.

7.4 Relekoestus ja koestussyklit

TESV Oy:n päämuuntajien keskijännitepuolen suojarleet kuuluvat suurjännitepuolen koestussykliin, eli ne koestetaan samaan aikaan kuin kyseisen aseman muut suurjännitereleet koestetaan. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että keskijänniteverkon kiskosuojaus, joka on toteutettu lähtökenttien releillä, eli niin sanotulla lukitusuojauksella, ei välttämättä tule riittävästi huomioduksi koestustilanteissa. Lukitusuojauksen koestus suoritetaan siten, että jokaiselta lähtökentältä varmistetaan lukitustiedon lähetys ja perille meno syöttökenttien releille. Lukituksen toimivuus taas varmistetaan syöttökenttä relekoestuksen yhteydessä. Tässä tilanteessa päämuuntajien suojarleiden koestukset tulisi siirtää keskijännitereleiden kanssa samaan sykliin.

TESV Oy:n valokaarisuojauksen koestussyklin pidentämistä tulisi harkita. Valokaarisuojaus koestetaan nyt kahden vuoden välein. Valokaarisuojauksen koestus on haastavaa, koska suojaus on laaja ja koestus joudutaan tekemään aseman ollessa verkossa. Koestustilanne luo aina myös riskin siitä, että muutettuja asetteluita tai avattuja liittimiä jää palauttamatta tai sulkematta. Valokaarisuojauksia on viime aikoina uusittu, jolloin vanhimmat suojarleet ovat poistuneet käytöstä. Uusissa suojarleissa on kattavammat itsevalvontaominaisuudet, jolloin pidempi koestussykli on perusteltu. Pidennettäessä koestussykliä saavutetaan myös kustannussäästöjä.

7.5 Suojarleiden hälytykset

TESV Oy:n keskijänniteverkon suojarleiltä ylempään järjestelmään otettavat hälytykset tulisi yhdenmukaistaa. Nyt käytössä on kirjavia käytäntöjä siitä, mitä hälytyksiä asemilta tulee. Tämä voi joissain tilanteissa, esimerkiksi suurhäiriötilanteissa, hankaloittaa verkolla tapahtuvista häiriöistä saatavaa kokonaiskuvaa. Kokonaiskuvan muodostumista hankaloittaa myös se, jos hälytyksiä tulee turhan herkästi. Esimerkki tämän kaltaisesta tilanteesta on verkolla tapahtuva oikosulku, joka aiheuttaa jännitekuopan, josta seuraa hetkellinen alijännite. Alijännitteeseen reagoi jännitteen valvonta, joka antaa tilanteesta havahtuman. Oleellisin tieto on kuitenkin oikosulkusuojan toimiminen, josta tulee ensimmäisenä voida varmistua vikatilanteesta.

Sekaannusta saattaa aiheuttaa myös aseman lähihälytyskeskuksen kautta tulevat hälytykset. Lähihälytyskeskuksen kautta voidaan ottaa rajallinen määrä hälytyksiä ja tämän

takia lähtöjen suojukselta tulevia hälytyksiä on yhdistetty. Yhdistettyjä hälytyksiä ovat usein releiden suojauslohkoilta tulevat hälytykset. Epäselvä tilanne syntyy silloin, kun lähtöjen maasulkusuojaus voi olla joko hälyttävä tai laukaiseva, jolloin yhdistetty hälytys tulisi nimetä neutraalisti siten, ettei se ota kantaa siihen onko kyseessä hälyttävä vai laukaiseva suojaus. Tällä hetkellä kyseiset hälytykset ovat suurella osalla asemista nimetty siten, että niistä on tulkittavissa maasulkusuojan tehneen laukaisun, vaikka kyseinen lähtö olisi aseteltu hälyttävän maasulkusuojuksen piiriin.

TESV Oy:n keskijänniteverkon suojukselta ylempään järjestelmään otettavien hälytysten yhdenmukaistaminen voidaan toteuttaa selkeyttämällä niiden nimeämiskäytäntöjä. Aluksi tulee käydä suojauskohteet läpi ja listata kustakin kohteesta oleellimmat hälytykset, jotka ovat tarpeellista ottaa ylempään järjestelmään. Tämän jälkeen tulee listan pohjalta laatia hälytyksistä yhdenmukaiset tekstit lähihälytyskeskukselle ja SCADA-järjestelmään.

Nämä edellä luetellut kehittämissuositukset parantavat TESV Oy:n keskijännitesuojuksen käytettävyyttä ja vikatilanteiden hallintaa, tuovat lisää yhdenmukaisuutta TESV Oy:n toimintoihin ja lisäävät työntekijöiden tietämystä verkon suojuksesta. Näillä toimenpiteillä voidaan osaltaan varmistaa turvallinen ja laadukas verkon käyttö ja taata, että verkon suojausta kehitetään asianmukaisesti.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella TESV Oy:n keskijänniteverkon suojausta. Aluksi tarkasteltiin keskijänniteverkon rakennetta ja käytiin läpi suojausten kannalta tärkeimmät komponentit. Sähköverkon vikatilanteista tarkasteluun otettiin oikosulku ja maasulku. Työn pääpaino oli keskijänniteverkon suojauskohteiden läpikäynnissä. Työssä käsitellyt suojauskohteet olivat päämuuntaja-, kisko-, valokaari-, ja johtolähtösuojaus. Lopuksi laadittiin kehittämissuhteet verkon suojaukseen liittyen.

Suojausselvityksen perusteella voidaan todeta, että Turku Energian keskijänniteverkon suojaus on nykytilassaan hyvin toteutettu. Suojarelekantaa on uusittu ja tullaan jatkosakin uusimaan. Releet koestetaan huolto-ohjelman mukaisesti. Myös sähköaseman muut komponentit huolletaan ja koestetaan niille määritellyn huolto-ohjelman mukaisesti. Suojausta tulee kuitenkin jatkossa kehittää, jotta voidaan edelleen parantaa verkon häiriötöntä käyttöä.

Keskijännitekojeistoissa tulisi harkita katkaisijanvikasuojan käyttöönottamista. Johtolähtösuojauskohteissa tulisi tarkastella yleisimpiä korvaustilanteita ja asetella niiden perusteella korvausasettelut valmiiksi releiden toisille asetteluryhmille. Katkeilevan maasulkusuojauksen asettamista laukaisevaksi tulisi myös harkita.

Työn aihe oli hyvin laaja siksi suojattaviin kohteisiin ei voitu syventyä kovin syvällisesti. Suojattavista kohteista käsiteltiin kuitenkin keskeiset ja tärkeimmät asiat. Haasteita tulevaisuudessa tuo suojaustekniikan nopea kehittyminen. Osaamisen pitää olla laaja-alaista, mutta toisaalta myös kaikki pienetkin yksityiskohdat on huomioitava.

Jatkotutkimusehdotus on syventyä tarkemmin eri reletyyppeihin ja niiden suojausfunktioiden asetteluihin ja ominaisuuksiin. Eri suojarelevalmistajien releitä voisi tarkastella ja selvittää niiden hyvät ja huonot ominaisuudet TESV Oy:n kannalta. Lisäksi suurjänniteverkon suojausten tarkastelu olisi myös hyödyllistä tehdä.

LÄHTEET

- ABB 1997. SPAD 346 C Vakavoitu differentiaalirele, Tekninen ohje.
- ABB 2000. TTT-käsikirja Teknisiä tietoja ja taulukoita, Helsinki.
- ABB 2018. 615 series 5.0 FP1 IEC, Technical Manual.
- A Eberle 2007. Petersen.Coil Controller, REF-DPA, Operation Manual.
- Arcteq 2017. Protection and Control, AQademy Sähköaseman johtolähtöjen suojaus.
- Arcteq 2018. Protection and Control, AQ-F255 Instruction manual v2.01.
- Aura, L. & Tonteri, A. 1993. Sähkölaitostekniikka, Porvoo, WSOY.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 1 Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, Helsinki, Otatiето.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b, Sähköverkot 2 Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Helsinki, Otatiето.
- Energiateollisuus 2021. kotisivut. Viitattu 30.4.2021.
<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot>
- Eronen, P. 2014. Tehtaan keskijänniteverkon selektiivisyystarkastelu, Diplomityö, Sähkötekniikan koulutusohjelma, Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Viitattu 3.5.2021.
<https://trepo.tuni.fi//handle/123456789/22239>
- Fingrid Oyj 2019. Alitaajuudesta tapahtuvan irtikytkennän toteutus Suomessa.
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/alitaajuussuojauksen-sovellusohje-5.8.2019.pdf>
- Fingrid Oyj 2021. kotisivut. Viitattu 10.4.2021.
<https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/>
- Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen, Opetusministeriö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
http://www.uotila.cc/images/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf
- Inspecta 2014. Relesuojauksen jatkokurssi sähkölaitoksille.
- Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isaksson, M. 1999. Intermittent earth fault challenge conventional protection schemes. Viitattu 20.5.2021.
http://www.cired.net/publications/cired1999/papers/3/3_3.pdf
- Mikander, P. 2020. Kompensoidun 20kV maakaapeliverkon käyttö maasulun aikana Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Viitattu 12.5.2021.
<https://lutpub.lut.fi/handle/10024/161835>
- Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka, Hämeenlinna, Otatiето Oy.
- Paavola, M. & Halme, H. 1979. Sähkölaitosten suojareleet, Porvoo, WSOY.
- SFS 6001 2018. Suurjänniteasennukset, 5. painos, Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS.
- Turku Energia 2021, kotisivut. Viitattu 17.4.2021.

<https://www.turkuenergia.fi/turku-energia/olemme-lahella-naemme-kauas/turku-energia-lyhyesti/tytar-ja-osakkuusyhtiot/>