



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HEIKKI TULOMÄKI
MAASULKUJEN ANALYSOINTI HÄIRIÖTALLENNUKSILLA
JE-SIIRTO OY:SSÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pekka Verho
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 11. tammi-
kuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HEIKKI TULOMÄKI: Maasulkujen analysointi häiriötallennuksilla JE-Siirto Oy:ssä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 92 sivua, 3 liitesivua

Huhtikuu 2017

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja markkinat

Tarkastaja: professori Pekka Verho

Avainsanat: Häiriötallenne, Maasulkusuojaus, Maasulkukokeet

Keskijänniteverkon maasulut ovat monimutkaisia vikoja. Tässä työssä tutustuttiin maasulkusuojausten toteutustapaan, releiden häiriötallenteiden käyttöön ja Wavewin-analysointiohjelmaan. Lisäksi työn yhteydessä tehtiin maasulkukokeet.

Maasulkusuojaus toteutetaan käyttämällä verkon nollavirtaa sekä nollajännitettä. Erilaisia suojauslohkoja, jotka hyödyntävät nollasuureita, on useita. Perinteinen maasulkusuojaus seuraa nollavirran kulmaa suhteessa nollajännitteeseen. Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa myös admittanssisuojilla, jolloin maasulkusuojaus on luotettavampi, kuin perinteisin menetelmin toteutettuna.

Häiriötallenteet ovat yksi ainoista tavoista saada tietoa verkon tapahtumista vian tai muun poikkeavan tapahtuman aikana. Häiriötallenne voidaan liipaista usealla eri tavalla: aika-perusteisesti, analogiasignaalin raja-arvon ylityksestä tai suojauslohkon havahtumisesta. Liipaisuperusteet asetellaan sen mukaan, miten paljon tietoa halutaan. Liian herkillä asetuilla dataa tulee liikaa, eikä dataa ehditä analysoimaan. Häiriötallenteen liipaisuperusteiden lisäksi tallenteen pituuden määrittäminen on tärkeää. Pidempiin tallennuksiin mahtuu enemmän tietoa verkon tapahtumista, mutta ne vievät enemmän tilaa. Vanhemmilla releillä releen muistin määrä rajoittaa tallenteen pituutta sekä releelle mahtuvien tallennusten määrää. Uusilla releillä ei ole näitä ongelmia.

Työn maasulkukokeet toteutettiin keskijänniteverkon muuntajalla, jossa tyhjään kennoon kytkettiin kolmivaiheisesti katkaisijakärri. Kokeet tehtiin erisuuruuksilla vikavastuksilla sekä verkon eri kompensointiasteilla. Kokeiden tuloksista muodostettiin kirjasto, jota voidaan käyttää vikojen referenssitapauksina sekä myöhemmässä laskennassa.

Wavewin-analysointiohjelmalla voidaan tarkastella comtrade-muotoisia häiriötallenteita. Ohjelma kuvaa selkeästi häiriötallenteen, jolloin yhdellä silmäyksellä saadaan hyvä kuva siitä, mitä on tapahtunut. Ohjelmassa on myös mahdollisuus laskea analogiakanavia yhteen. Laskentaominaisuutta tutkittiin laskemalla maasulkukoetuloksista resistiivinen nollavirta ja vikavastuksen suuruus. Laskettuja arvoja verrattiin MatLab-ohjelmalla lasketuihin sekä testien aikana mitattuihin arvoihin. Laskennalla saatiin hahmoteltua verkon tapahtumia, mutta sillä ei saatu matemaattisesti tarkkoja tuloksia.

Työn lopputuloksena tehtiin erillinen dokumentti, jossa on JE-Siirrolle sopivat häiriötallentimien asetelut. Wavewin ohjelma on hyvä työkalu, mutta sillä ei saada matemaattisesti tarkkoja tuloksia. Myöskään sitä ei voida käyttää osana automaattista häiriötallennetyökalua, koska ohjelmaa ei voida ohjata työkaluriviltä.

ABSTRACT

Heikki Tulomäki: The analysis of earth faults with disturbance records in JE-Siirto Oy

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 92 pages, 3 Appendix pages

April 2017

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power systems and Markets

Examiner: Professor Pekka Verho

Keywords: Disturbance record, Earth fault protection, Earth fault tests

Earth faults are a complex fault type. Disturbance records are often the only way to solve what has happened in the grid during the fault. This thesis studies earth fault protection and the use of disturbance records. Earth fault tests were performed in order to get disturbance records of different kinds of faults.

Earth fault protection uses the residual voltage and residual current. There are many different kinds of protection functions, which use the residual quantities. Traditional earth fault protection follows the angle between the current and the voltage. Earth fault protection can be made using the admittance function. When using the admittance function, the earth fault protection is more reliable than when using traditional methods.

There are many different ways to trigger a disturbance record: by time, by exceeding an analog channel limit or by the triggering of a protection function. The selection of the triggering philosophy depends on the amount of data that can be analysed. Another important aspect of disturbance records is the record length: The longer the record is, the more information it can contain. On the other hand, longer records require more space. Older relays have a limited memory capacity, which effects the maximum record length. New relays have a larger memory, so the record length can be chosen more freely.

The earth fault tests were executed at a distribution transformer, where a mobile circuit breaker was attached to the network. During the tests the fault impedance, the amount of compensation and fault location were changed. The test results formed an earth fault library for later analysing.

Wavewin-software is a tool for analysing comtrade fault records. The software has a clear view of the fault, so it is easy to understand what happens in the grid during a fault. The software also allows simple calculation of channels. The calculating tool was used to solve the resistive residual current and the fault impedance. The calculated results were compared to results from the earth fault tests and to results calculated with MatLab-software. The calculation tool gives a rough estimate and is therefore is in gaining a general understanding. However the results are not mathematically solid.

As a result of this thesis there is a seperate document, which is a guide for setting the disturbance records of JE-Siirto. Wavewin is a good software, but it is not suitable for mathematical calculations. Also is can not be used as a part of the automatical disturbance record opening tool.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty sähköverkkoyhtiö JE-Siirto OY:n tilauksesta. Työn aihe hahmottui kesän 2016 aikana ja varsinainen työ aloitettiin syksyllä 2016.

JE-Siirto OY:ssä työn tilaajana toimi käyttöpäällikkö Sakari Kauppinen. Kiitokset Sakkelle mielenkiintoisesta aiheesta. Työssä korvaamattomana apuna toimi kehitysasiantuntija Risto Pitkänen. Erityinen kiitos Ristolle neuvoista, avusta sekä kokemuksen jakamisesta. Kenttäkokeiden aikana tarvittiin koko käyttö-tiimin työpanosta. Kiitokset myös käyttöasentajille sekä käyttökeskuksen väelle.

ABB:n releitä ja häiriötallenteita koskevissa kysymyksissä apuja sain ABB:n Lehesvuon Veikolta, Wahlroosin Arilta ja Altosen Jannelta. Kiitokset myös heille. Maasulkukokeet tehtiin Maviko OY:n laitteilla. Kiitokset Kimmo Autiolle ja Markus Toivoselle avusta maasulkukokeiden kanssa.

Tämän diplomityön tarkastajana on toiminut professori Pekka Verho Tampereen Teknillisestä yliopistosta. Kiitos hänelle työn tarkastamisesta sekä kommentteista ja näkökulmista joita sain työn aikana.

Lopuksi haluan kiittää Inaa ja muita läheisiäni, jotka ovat olleen tukenani tämän työn tekemisen aikana.

Jyväskylässä, 18.4.2017

Heikki Tulomäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖVERKON VIAT	2
2.1	Mittamuuntajat ja jännitemuuntajat	2
2.2	Releet	4
2.3	Kosketusjännitteet	5
2.4	Sähköverkon erilaiset viat	9
2.5	Maasulku	9
2.5.1	Maasta erotetun verkon maasulku	11
2.5.2	Sammutetun verkon maasulku	14
3.	MAASULKUSUOJAUS, RELEIDEN ASETTELUT JA TOIMINTAPERIAATTEET	21
3.1	Suuntaamaton maasulkusuoja $I_{o>}$	23
3.2	Suunnattu maasulkusuoja $I_{o>->}$	24
3.3	Wattmetric $P_{o>->}$	30
3.4	Admitanssisuojaus	32
3.5	Katkeilevan maasulun suojaus	34
3.6	Varasuojat	37
4.	JE-SIIRTO OY:N SÄHKÖVERKKO JA SEN SUOJAUSASETTELUT	39
4.1	Vianhoito Jyväskylän Energian sähköverkossa	40
4.2	Suojausasettelut	41
4.2.1	Relion 630-releiden maasulkusuojausasettelut	43
4.2.2	Relion 543-releiden maasulkusuojausasettelut	44
4.2.3	Muut asemat	45
5.	HÄIRIÖTALLENTIMET	46
5.1	Tallenteiden käyttötarkoitus	46
5.2	Releet häiriötallentimina	47
5.3	Relion 630 -releiden häiriötallentimien asettelu	49
5.4	Relion 543 -releiden häiriötallentimien asettelu	52
5.5	Releiden kellojen synkronisointi	56
5.6	Tallenteiden siirtäminen releeltä käyttöön	57
5.7	Häiriötallennusten jatkokäsittely	59
6.	MAASULKUKOKEET	61
6.1	Aikaisemmin tehdyt maasulkukokeet	61
6.2	Eteläportti 2016	61
6.2.1	Testien suunnittelu	62
6.2.2	Vikakärry	64
6.2.3	Releasettelut	65
6.2.4	Muut mittalaitteet	66
6.2.5	Vikavastukset	68
6.2.6	Lämpökamerakuvaus	69

6.2.7	Turha laukaisu	71
7.	HÄIRIÖTALLENNUSTEN ANALYSOINTIOHJELMA WAVEWIN	73
7.1	Ohjelman ominaisuudet	73
7.2	Mitä suureita halutaan saada selville	76
7.3	Toteutus.....	76
7.3.1	Resistiivisen virran laskenta	77
7.3.2	Kapasitiivisen virran arviointi	78
7.3.3	Arvio todellisesta vikavirrasta	79
7.3.4	Laskennallisen vaihejännitteen muodostaminen	81
7.3.5	Arvion muodostaminen vikavastuksen suuruudesta	82
7.4	Maasulkukokeiden testitulosten analysointia Wavewin-ohjelmalla	83
8.	YHTEENVETO.....	87
8.1	Yhteenveto Häiriötallennuksista	87
8.2	Yhteenveto maasulkukokeista	88
8.3	Yhteenveto Wavewin-analysointiohjelmasta.....	88
8.4	Diplomityön pohjalta tehtävät toimenpiteet.....	89
	LÄHTEET.....	90

LIITE 1: Fluke-mittarin asetteluraportti

LIITE 2: Maasulkusuojauslohkojen nimeämistavat

LIITE 3: Maasulkukokeiden testipöytäkirja

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Releiden sijoittelu sähköasemalle (Verho, 2016)</i>	5
<i>Kuva 2 Kosketusjännitteen muodostuminen maasulun aikana (Perustuu lähteeseen: Lakervi & Partanen, 2012)</i>	6
<i>Kuva 3. Kosketusjännitteen moninkerrat (SESKO RY, 2015)</i>	8
<i>Kuva 4. Maasulkuviran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)</i>	12
<i>Kuva 5. Yksivaiheinen maasulun sijaiskytkentä Maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)</i>	13
<i>Kuva 6. Maasta erotetun verkon vektorikuva (Mörsky, 1992)</i>	14
<i>Kuva 7. Maasulun aikaiset vikavirrat sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)</i>	16
<i>Kuva 8. Vaihejännittet maasulun aikana sammutetussa verkossa</i>	18
<i>Kuva 9. Yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)</i>	19
<i>Kuva 10. Sammutetun verkon suunnatun maasulkusuojan toiminta-alueet, muokattu (ABB, b2014)</i>	25
<i>Kuva 11. Suunnatun maasulkusuojan toiminta-alueet maasta erotetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)</i>	26
<i>Kuva 12. Suunnatun maasulkusuojan kulmaperiaatteen universaali asettelu, muokattu (ABB, b2014)</i>	26
<i>Kuva 13. Kulmaperiaatteen 80 asteen asettelut sammutetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)</i>	27
<i>Kuva 14. Kulmaperiaatteen 88 asteen asettelut sammutetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)</i>	28
<i>Kuva 15. Sammutetun verkon I₀COS –periaate, muokattu (ABB, b2014)</i>	29
<i>Kuva 16. Maasta erotetun verkon I₀SIN-periaate, muokattu (ABB, b2014)</i>	29
<i>Kuva 17. Wattmetric-menetelmä, muokattu (ABB, b2014)</i>	31
<i>Kuva 18. Admittanssi sammutetun verkon maasulussa (ABB, 2015)</i>	33
<i>Kuva 19. Katkeilevan maasulun Transient EF-suojan toiminta (ABB Oy, a2014)</i>	36
<i>Kuva 20. Katkeilevan maasulun Intermittent-suojan toiminta (ABB Oy, a2014)</i>	37
<i>Kuva 21. Relion 630 releiden häiriötallenteiden pituuden määrittäminen, muokattu (ABB, b2014)</i>	50
<i>Kuva 22. Häiriötallentimen analogiakanavien asettelu Relion 630 -releillä</i>	51
<i>Kuva 23. Relion 630 -releen digitaalisignaalien asettelu häiriötallenteelle</i>	51
<i>Kuva 24. REF 500 -häiriötallennusten asetteluohje</i>	53
<i>Kuva 25. Tallenteiden pituuden ja määrän korrelaatio (Lehesvuo, 2016)</i>	54
<i>Kuva 26. Maasulkukokeiden alue</i>	62
<i>Kuva 27. Fluke-435 mittarilla mitatut PJ-puolen jännitteen arvot 9.11.2016</i>	67
<i>Kuva 28. Fluke M453 mittarin tekemä yhteenveto ja mittarin asettelut</i>	67
<i>Kuva 29. Testi 17 pistorasian maaliuskan jännite</i>	68

<i>Kuva 30. Maasulkukokeissa käytetyt vastustornit</i>	69
<i>Kuva 31. 1 kΩ testin vastusten lämpenemä</i>	70
<i>Kuva 32. Uuden 1 kΩ vastuksen lämpeneminen</i>	71
<i>Kuva 33. Kuvankaappaus Wavewin -ohjelmasta</i>	74
<i>Kuva 34. Wavewin-ohjelman laskentakaavat</i>	74
<i>Kuva 35. Testin 5 häiriötallenne vaunulta</i>	81
<i>Kuva 36. Häiriötallenne testistä 17</i>	85
<i>Kuva 37. Häiriötallenne testistä 18</i>	85

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Suurin sallittu kehon kautta kulkevan virran suuruus kestoajan suhteen (SESKO RY, 2015)</i>	7
<i>Taulukko 2. Sallittu kosketusjännite U_{ip} vian kestoajan t_f funktiona (SESKO RY, 2015)</i>	7
<i>Taulukko 3. Wattmetric esimerkkiasettelut</i>	31
<i>Taulukko 4. JE-Siirto OY:n kapasitiivisen verkon koko päämuuntajittain (JE-Siirto, a2016)</i>	39
<i>Taulukko 5. Relion 630 -releen admitanssisuojausasettelut</i>	43
<i>Taulukko 6. I_0 ja I_{dir} asetellut Jyväskylän Energialla</i>	44
<i>Taulukko 7. Relion 543 -releen maasulkusuojausasettelut</i>	45
<i>Taulukko 8. Häiriötallennusten sopiva pituus</i>	50
<i>Taulukko 9. Jyväskylän Energian REF 630-releen häiriötallenteen liipaisevat digitaalisignaalit</i>	52
<i>Taulukko 10. Relion 543 -releen digitaalisignaalit</i>	55
<i>Taulukko 11. Analogiakanavien liipaisurajat REF 543 -releellä</i>	56
<i>Taulukko 12. Maasulkukoejärryn keskijännitekojeiston keskeiset tekniset tiedot (Siemens , 2016) ja (Toivonen, 2016)</i>	64
<i>Taulukko 13. Vikakärryn katkaisijan toimintanopeus eri asetteluarvoilla (Toivonen, b2016)</i>	65
<i>Taulukko 14. Topas-1000 mittarin kanavien asettelu</i>	68
<i>Taulukko 15. EFD- laitteiston asettelu (TRENCH, 2010)</i>	72
<i>Taulukko 16. Wavewin-ohjelmassa käytetyt laskentaoperaattorit</i>	75
<i>Taulukko 17. Eri testeillä laskennan vertailu</i>	77
<i>Taulukko 18. Kapasitiivisen virran arviointi eri vikatilanteilla</i>	79
<i>Taulukko 19. Todellisen vikavirran laskenta maasulkukoetuloksista</i>	80
<i>Taulukko 20. Vaihejännitteet vian aikana</i>	82
<i>Taulukko 21. Vikavastuksen arviointia Wavewin-ohjelmalla</i>	83
<i>Taulukko 22 Admitanssisuojan asettelut suojien vertailussa</i>	84
<i>Taulukko 23. Wavewin-ohjelmalla laskettujen arvojen käyttö maasulkusuojauslohkojen vertailuun</i>	86

LYHENTEET JA MERKINNÄT

B	Suskeptanssi
C_0	Maakapasitanssi
C_{0j}	Viallisen vaiheen kapasitanssi
G	Konduktanssi
I_0	Nollavirta
I_b	Kehon kautta kulkema virta
I_C	Kapasitiivinen maasulkuvirta
I_e	Maasulkuvirta
I_f	Vikavirta
I_L	Induktiivinen maasulkuvirta
IL1, IL2, IL3	Vaihevirratt
I_r	Resistiivinen maasulkuvirta
I_{sc}	Maasulun aikana terveen vaiheen kapasitiivinen virta
I_t	Sammutuskelan läpi menevä virta maasulun aikana
I_{tc}	Maasulun aikana terveen vaiheen kapasitiivinen virta
I_v	Releen näkemä nollapiirin virta
I_X	Kelan virta
P_0	Maasulkuteho
R_0	Lisäresistanssi
R_m	Maadoitusresistanssi
R_f	Verkon resistiiviset häviöt
T	Lämpötila
T_f	Vian kesto
U_0	Nollajännite
$U_r, U_s, U_t,$	Vaihejännite
U_1, U_2, U_3	Vaihejännite
U_v	Vaihejännite
U_{12}, U_{23}, U_{31}	Pääjännite
U_m	Maadoitusjännite
U_{TP}	Kosketusjännite
Y_0	Nollapiirin admittanssi

A	Ampeeri
F	Faradi
Hz	Hertsi
j	imaginäärioperaattori
kt	kilotavu
m	Metri
S	Siemens
V	Voltti
Ω	Ohmi
φ	Kulma

1. JOHDANTO

Monilla suomalaisilla sähköverkkoyhtiöillä on käytössä releitä, joissa on häiriötallennuslohko. Kuitenkaan monesti häiriötallennuksia ei käytetä tai niistä ei saada parasta hyötyä irti, johtuen releiden väärästä asettelusta tai siitä, ettei tallenteita saada tulkittavaksi eikä niitä osata tulkita. Häiriötallenteet ovat ainoita tapoja saada tietoa verkon tapahtumista.

Sähköturvallisuuslaki vaatii, ettei sähkölaitteisto saa asettaa sen käyttäjiä vaaraan. Sähköverkkoa käsitellään yhtenä suurena sähkölaitteena, jonka on täytettävä tämä kriteeri. Maasulkusuojaus on sähköturvallisuuslain kannalta erityisen tärkeä, koska sen avulla saadaan suojattua ihmisiä ja eläimiä vikojen aiheuttamilta jännitteiltä.

Tässä työssä tutkitaan häiriötallenteiden käyttöä JE-Siirto Oy:ssä. JE-Siirto on kaupunkiverkkoyhtiö, joka vastaa sähkön jakelusta Jyväskylän kantakaupungin alueella. Työ on rajattu koskemaan keskijänniteverkkoa ja maasulkuja. Keskijänniteverkko valikoitui tarkastelun kohteeksi, koska 110 kV alueverkko on JE-Siirrolla käytännössä vikavapaata ja pienjänniteverkon puolella suojaus toteutetaan pääosin sulakkeilla, eikä releohjatuilla katkaisijoilla. Maasulut ovat tarkastelun kohteena niiden monimutkaisen ja käyttäjille vaarallisen luonteen takia. Oikosulut jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska kaupunkialueella oikosulkusuojauksen toteuttaminen on suhteellisen helppoa suurien oikosulkuvirtojen takia.

Tämän työn tavoitteena on dokumentoida häiriötallentimien asettelutapa ja periaatteet, toteuttaa maasulkukokeet sekä tutustua Wavewin-analysointiohjelmaan. Wavewin-ohjelmaan on tarkoitus tehdä laskentakaavoja, joilla voidaan tutkia maasulkukokeiden häiriötallenteita ja vertailla eri suojauslohkojen toimintaa. Maasulkukokeiden häiriötallenteista tehdään vikakirjasto, jota voidaan hyödyntää myöhemmin vikojen analysoinnissa.

Työn luvussa 2 käsitellään sähköverkon maasulkuja ja tutustutaan muihin työn kannalta tärkeisiin perusasioihin. Luvussa 3 käsitellään erilaisia maasulkusuojauslohkoja, eli tarkastellaan miten releiden maasulkusuojaus toimii. Neljännessä luvussa tutustutaan Jyväskylän Energian keskijänniteverkon käyttöperiaatteisiin ja käytettyjen releiden suojausasetteluihin. Viidennessä luvussa käydään läpi miten häiriötallenteet on aseteltu eri releille ja miten häiriötallenteet saadaan releiltä käyttökeskukseen. Kuudes luku käsittelee maasulkukokeita. Luvussa on esitetty, miten kokeet toteutettiin ja mitä niissä mitattiin. Luvun lopussa on käytetty kokeiden häiriötallenteiden analysointiin Wavewin-ohjelmaa laskentakaavoineen. Analysoinnin näkökulmaksi on otettu eri maasulkusuojauslohkojen toimivuus. Luku 7 on lyhyt katsaus Wavewin-ohjelmaan ja siihen tehtyihin laskentakaavoihin.

2. SÄHKÖVERKON VIAT

Suomessa on kaikille sähkön kuluttajille ja tuottajille yhteinen sähköverkko. Verkon rungon muodostaa 400 kV ja 220 kV siirtolinjat, joita täydennetään 110 kV linjoilla. 110 kV muuntoasemilla jännite muutetaan 20 kV jännitteeksi, jolla se viedään lähelle kuluttajia. 20 kV sähkö muutetaan muuntamoissa kuluttajakeluun sopivaksi, jolloin vaihejännite on 230 V, joka on pääjännitteenä ilmaistuna 400 V. Yli 110 kV linjoja käytetään renkaassa, jolloin sähkönsyöttösuuntia on useita. 20 kV ja 400 V verkkoja käytetään säteittäisesti, jolloin sähkönsyöttösuuntia on yksi. 20 kV verkko on kuitenkin rakennettu renkaaksi helpottamaan käyttötoimintaa. Sähköverkkoyhtiöille on jaettu monopolialueet, joiden alueella ne toimittavat sähköä alueensa kuluttajille. Sähköverkkoyhtiöiden verkko muodostuu pääasiassa 20 kV ja 400 V verkosta, mutta usein verkkoyhtiöille kuuluu pätkiä 110 kV verkkoa. (Elovaara & Haarla, 2011)

Sähköverkkoyhtiöiden keskijänniteverkon (20 kV) toiminta perustuu sähköasemiin, joilla 110 kV muutetaan 20 kV jännitteeksi. Näillä sähköasemilla sijaitsee päämuuntaja (110/20), kiskosto kytkinlaitteineen (20 kV) ja paljon apulaitteita. Apulaitteita ovat erilaiset mittamuuntajat, suojareleet, tietoliikennelaitteet ja akusto. (Elovaara & Haarla, 2011)

Sähkönjakelun primääripiiri sähköasematasolla sisältää päämuuntajan, kiskoston, kytkinlaitteet ja johtolähdöt (Mörsky, 1992). Suojausjärjestelmä taas sisältää suojareleet, mittalaitteet, johdotuksen, laukaisupiirin, teholähteet ja tiedonsiirtojärjestelmän (Elovaara & Haarla, 2011). Nämä kaksi linkittyvät toisiinsa katkaisijan kohdalla, jossa suojausjärjestelmä mittaa primääripiirin arvoja ja tarvittaessa ohjaa katkaisijan auki.

Tässä luvussa käsitellään mittamuuntajia, releitä, sähköverkon kosketusjännitteitä ja sähköverkon vikoja. Vioista keskitytään maasulkuihin niiden kompleksisen luonteen takia.

2.1 Mittamuuntajat ja jännitemuuntajat

Releiden toiminta perustuu verkon jännitteen ja virran mittaamiseen sekä näiden arvojen tulkitsemiseen. Mikäli verkon arvot muuttuvat releen toiminta-alueelle, rele toimii siihen ohjelmoidun koodin mukaisesti. Releet koostuvat herkästä elektroniikasta, minkä seurauksena niillä ei voi mitata suoraan verkon suureita kuten jännitettä ja virtaa. Verkon suuret on muutettava releille sopiviksi, ja tähän tarvitaan erilliset muuntajat. Näitä muuntajia kutsutaan mittamuuntajiksi, joita on yleisesti kahta tyyppiä: virta- ja jännitemuuntajia, jotka mittaavat nimiensä mukaisesti joko jännitettä tai virtaa. Muuntajilla on aina nimellinen arvonsa, joka ilmoitetaan ensiö- ja toisioarvoina. Mittamuuntajan nimellisarvot on syötettävä releelle, jotta rele osaa laskea ensiöarvot toisioarvojen perusteella.

Maasulkujen kannalta tärkeät suureet ovat päämuuntajakohtainen nollajännite U_0 ja johdolahtokohtainen nollavirta I_0 .

Nollajännite saadaan mitattua jännitemuuntajien avokolmiokäämityksestä tai verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiossa. Avojännite muodostuu vaiheiden ja maan välisten jännitteiden summasta. Nollajännite voidaan mitata myös jännitesensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla. Tällöin rele muodostaa laskennallisen nollajännitteen. (ABB, 2000) Nollajännitteen nimellisarvo on 11,543 kV ensiossa ja 100 V toisiossa (Mörsky, 1992).

Maasulkuvirta, eli nollavirta, voidaan mitata kolmella tavalla: kaapelivirtamuuntajalla, vaihevirtamuuntajien summakytkennästä tai vaihevirtasensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla. Näistä vaihtoehdoista kaapelivirtamuuntajalla voidaan mitata pienimpiä, jopa 0,5 A maasulkuvirtoja, eikä kaapelivirtamuuntajan tarkkuus riipu sen nimellisarvosta. Kaapelivirtamuuntajien heikkous on niiden huono kuormitettavuus, mutta pienitaakkaisten suorareleiden yhteydessä se ei muodosta ongelmaa. (ABB, 2000)

Mittamuuntajien tyyppin ja koon tietäminen on tärkeää releitä asettellessa. Releiden asetteluarvot syötetään joko todellisina arvoina tai nimellisarvoina. Nimellisarvot riippuvat käytettyjen mittamuuntajien koosta. Virtamuuntajien koko ilmoitetaan esimerkiksi 5/400 A, jolloin 400 A on virtamuuntajan nimellinen virta. Nollavirtamuuntajilla koko voi olla 1/100 A, jolloin 100 A on virtamuuntajan nimellisvirta. Vaihejännitteen nimellinen arvo on 11 547 V, pääjännitteiden nimellisarvo on 20 000 V ja nollajännitteen nimellisarvo on 11 547 V.

Mittamuuntajia on käytössä suojausta ja energian mittausta varten. Näille kahdelle eri käyttötarkoitukselle on erilaiset tarpeet mittaustarkkuuden suhteen. Perinteisesti energian mittaamisessa on vaadittu suurta tarkkuutta ja suojaukseen on riittänyt epätarkempi mittaustulos. Standardissa IEC 61869-2 on käsitelty mittamuuntajien tarkkuutta. Suojauksikäytössä on kahta eri mittaustarkkuusluokkaa, joissa tarkkuusluokan 10P virtamuuntajille ei ole määritetty kulman tarkkuutta ja tarkemmille, 5P-luokan mittalaitteille tarkkuus on annettu vain nimellisvirralla. Kyseinen standardi antaa virheen suuruuden muulla kuin nimellisvirralla ainoastaan mittaustarkkuusluokan muuntajille. Suojausluokan muuntajille virheen saa valmistajalta tai mittaamalla. (Wahlroos, 2016)

Maasulkusuojausta varten I_0 -virran kulman mittaustarkkuus ja mahdollinen virhe on tärkeää tietää. Tällöin releitä asettellessa voidaan huomioida mittaustarkkuus ja asetella releet niin, ettei suurilla vikaresistansseilla tapahdu mittaustarkkuuksista johtuvia virhelaukaisuja. Mittaustarkkuus vaikuttaa suoraan suojauksen herkkyyteen ja käytettyihin asetuksiin. (Wahlroos, 2016)

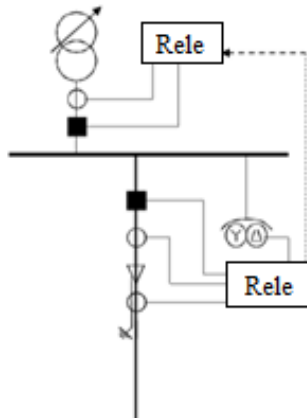
2.2 Releet

Nykyään sähköverkon suojarleinä käytetään mikroprosessoripohjaisia releitä. Perinteisten suojausominaisuuksien lisäksi mikroprosessoripohjaiset releet tuottavat ja vastaanottavat tietoa. Kahdensuuntaisen tiedonkulun takia releitä kutsutaan myös kennoterminäileiksi. (Mörsky, 1992)

Releen toiminta on yksinkertaistettuna sähköverkon tilan seuraamista ja tarvittaessa toimimista. Sähköverkon tilaa seurataan mittamuuntajilta saatavilla mittaustiedolla. Releessä tämä analoginen mittaussignaali muutetaan analogi/digitaali-muuntimessa (a/d-muunnin) digitaaliseksi. Tieto on muutettava digitaaliseksi, jotta se on laskettavissa mikroprosessorilla. Digitaalisen tiedon määrä riippuu näytteenottotaajuudesta. Relemallista riippuen mittaustaajuus on välillä 1 – 4 kHz. ABB:n 543-releillä mittaustaajuus on 2 kHz (Lehesvuo, 2016). ABB:n 630-releillä näytteenottotaajuus on 50 Hz:n järjestelmässä joko 1 khz tai 4 kHz, riippuen suojausfunktioista (ABB, b2014). Näytteenottotaajuutta tarvitaan, koska analogiatieto on jatkuvaa, mutta digitaalitieto koostuu biteistä, jotka sisältävät yhden ajanhetken tiedon. Peräkkäiset digitaalitiedot yhdistämällä voidaan muodostaa aaltokäyrä.

Rele seuraa digitaalitietoa ja toteuttaa tälle tiedolle erilaisia laskutoimenpiteitä. Laskutoimenpiteet on toteutettu loogisten toimintojen avulla, jolloin voidaan muodostaa hyvin monimutkaisia suojausfunktioita. Erilaisia funktioita voi olla kymmeniä samassa releessä. Releiden toiminta-ajat ovat tarkkoja, koska releessä on sisäänrakennettu kideohjattu kello. (Mörsky, 1992)

Releet sijoitetaan yleensä katkaisijoiden kanssa samoihin paikkoihin niiden yhteisen toimintatavan takia. Kuvassa 1 on esitetty päämuuntajan suojarle, johtolähdön suojarle ja johtolähdön varrelle sijoitetun katkaisijan rele.



Kuva 1. Releiden sijoittelu sähköasemalle (Verho, 2016)

Sähköasemilla johtolähtöjen suojarleet saavat mittaustietoa useasta eri paikasta. Aseman kiskostolle yhteiset jännitemuuntajat tuottavat releille jännitetiedon ja johtolähtökohtaiset virtamuuntajat tuottavat releelle sen suojaaman johtolähdön virran.

2.3 Kosketusjännitteet

Suomessa käytettävät sähkölaitteistot eivät saa aiheuttaa kenenkään hengelle, omaisuudelle tai terveydelle vaaraa. Lisäksi sähkölaitteisto ei saa aiheuttaa kohtuutonta sähköistä tai sähkömagneettista häiriötä tai vastaavasti olla altis kyseisille häiriöille. (Finlex, 2016)

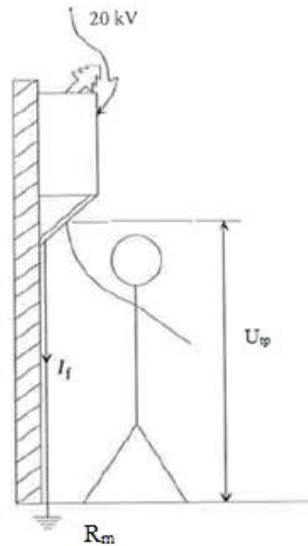
Sähköverkon vioissa tavallisesti jännitteettömät osat voivat muuttua jännitteisiksi. Tällaisia osia ovat muuntajien kuoret ja maadoitusjohtimet. Maadoitusjohtimien kautta jännite välittyy galvaanisesti yhteen kytkettyjen maadoitusten alueelle. (SESKO RY, 2015) Jännite, jota maadoitetuissa osissa esiintyy, kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Maadoitusjännite aiheutuu maasulussa vikapaikassa olevasta maasulkuvirrasta. Tyypillinen esimerkki maasulusta on ylijännitesuojan toiminta ukkosella, jolloin suojan johtaessa vaihe ja maadoitukset ovat galvaanisesti yhteydessä. (Lakervi & Partanen, 2012)

Maadoitusjännite U_m voidaan laskea kaavalla

$$U_m = I_f \cdot R_m, \quad (1)$$

jossa I_f on vikavirta maasulussa ja R_m maadoitusresistanssi.

Maadoitusjännitteestä voidaan erottaa kosketusjännite U_{tp} , joka on ihmisen kosketeltavissa oleva jännite maasulun aikana. (Lakervi & Partanen, 2012) Kosketusjännite on yleensä maadoitusjännitettä pienempi, koska maadoitusjännitteeseen vaikuttaa virtapiirin osana olevan ihmisen tai eläimen maadoittuminen. Ihmisen maadoittumiseen vaikuttavat muun muassa maaperä sekä päällä olevat varusteet.



Kuva 2 Kosketusjännitteen muodostuminen maasulun aikana
(Perustuu lähteeseen: Lakervi & Partanen, 2012)

Kuvassa 2 on havainnollistettu kosketusjännitteen syntymistä. Lisäksi kuvasta nähdään, miten vikavirralla on kaksi kulkutietä maahan: ihmisen läpi ja maadoitettua osaa pitkin.

Sähköverkon kosketusjännitteelle annetaan raja-arvot standardissa SFS 6001. Suurjänniteasennusten kosketusjännitteen laskennassa tehdään seuraavat neljä oletusta:

- Virtatie on toisesta kädestä jalkoihin
- Kehon impedanssin todennäköisyys on 50 %
- Sydänkammiovärinän todennäköisyys on 5 %
- Lisäresistansseja ei oteta huomioon

(SESKO RY, 2015)

Näitä oletuksia tarvitaan, koska ihmiskehon impedanssi voi vaihdella tapauskohtaisesti ja sydänvärinän syntyminen on tapauskohtaista. Taulukkoon 1 on koottu standardin SFS 6001 mukaiset ihmisen kestävät virrat.

Taulukko 1. Suurin sallittu kehon kautta kulkevan virran suuruus kestoajan suhteen (SESKO RY, 2015)

Vian kesto aika t_f (s)	Kehon kautta kulkeva virta I_b (mA)
0,05	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Taulukossa 1 esitetyillä arvoilla on tilastollisesti 5 % todennäköisyys saada sydämen kammiovärinä sähköiskun seurauksena. Ihmiskehon impedanssi muuttuu jännitteen funktiona, joka huomataan yllä olevista arvoista. Kehon impedanssin avulla kehon läpi kulkevat virrat voidaan muuttaa sallituiksi kosketusjännitteiksi. Sallitut kosketusjännitteet kestoajan suhteen on koottu taulukkoon 2.

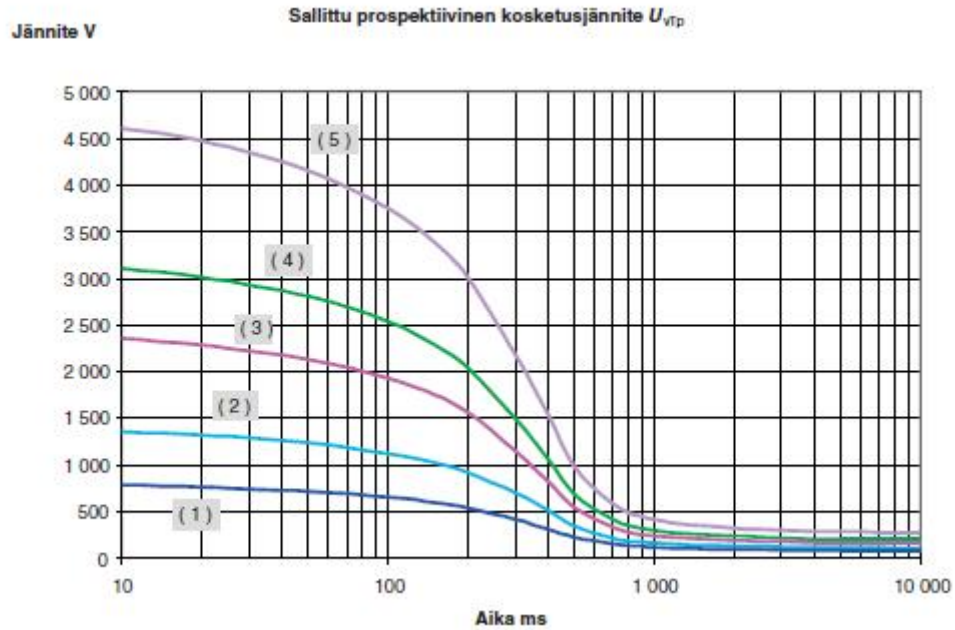
Taulukko 2. Sallittu kosketusjännite U_{tp} vian kestoajan t_f funktiona (SESKO RY, 2015)

Vian kesto aika t_f (s)	Sallittu kosketusjännite U_{tp} (V)
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Taulukoiduista sallitus kosketusjännitteen arvoista huomataan, että lyhyillä vian kestoajoilla sallitaan korkeammat kosketusjännitteet, kun taas vikojen keston, eli releiden toiminta-ajan kasvaessa, sallittu kosketusjännitteen suuruus pienenee.

Sähköverkon suunnittelussa käytetään kosketusjännitteen monikertoja. Kosketusjännitteen tavoitetaso on $2 \cdot U_{tp}$, mutta teknisten ja taloudellisten seikkojen takia erikoistoimenpiteillä sallitaan $4 \cdot U_{tp}$ arvoja, huonoissa maadoitusolosuhteissa jopa $5 \cdot U_{tp}$. (SESKO RY, 2015) Eriyistoimenpiteitä ovat muuntamoihin rakennettava potentiaalinhjaus sekä jokaisen liittymän yhteyteen maadoitus. Jos edellä mainittuja ehtoja ei voida varmasti täyttää, on liittymän rakennuksen ympärille tehtävä potentiaalinhjaus. (Lakervi & Partanen, 2012) Potentiaalinhjaus suojaa vain välittömässä läheisyydessä. Mikäli sähköjä käytetään kaukana potentiaalintasauksesta, esimerkiksi jatkojohdon avulla, potentiaalintasauksesta ei ole hyötyä.

Kosketusjännitteen monikerrat on koottu kuvaan 3.



Kuva 3. Kosketusjännitteen moninkerrat (SESKO RY, 2015)

Kuvan 3 avulla voidaan määritellä tarvittavat maasulkusuojausten toiminta-ajat. Pahimmillaan kosketusjännite on maadoitusjännitteen suuruinen. Maadoitusjännite voidaan laskea vikavirran ja muuntopiirin maadoitusten tulona.

Sallittujen kosketusjännitteiden tasolle voidaan päästä useilla eri toimenpiteillä: parantamalla maadoituksia, lyhentämällä releiden toiminta-aikaa tai pienentämällä maasulkuvirtaa. Maadoitusten parantaminen on käytännössä mahdollista vain samalla kun rakennetaan verkkoa. Tällöin maaperään lisätään erillisiä maadoitusjohtimia, jolloin maa johtaa paremmin sähköä. Releiden toiminta-ajan lyhentäminen on helppoa ja edullista. Toiminta-aikojen lyhentämisen hyödyt ovat rajalliset, koska lyhyet toiminta-ajat lisäävät virhelaukaisujen riskiä, ja toiminta-aikoja voidaan lyhentää vain rajallisesti. Maasulkuvirran pienentäminen voidaan tehdä sammutuskuristimilla tai jakamalla keskijänniteverkko useamman päämuuntajan perään. Nämä ovat kalliita investointeja, mutta tarpeellisia, jotta sallitut saavutetaan kosketusjännitteet. (Lakervi & Partanen, 2012)

Maasulkusuojausta ohjaa sähköturvallisuuslaki (1135/2016), jonka mukaan sähkölaitteet eivät saa aiheuttaa hengenvaaraa (Finlex, 2016). Kun tiedetään maaperän johtavuus ja maasulkuvirta, voidaan määritellä maasulkusuojaus standardin vaatimalle tasolle käyttämällä kuvaa 3. (SESKO RY, 2015)

Standardi SFS 6001 esittää kriteerit maadoitusjärjestelmän suunnittelulle, asennukselle, testaamiselle ja kunnossapidolle siten, että maadoitusjärjestelmä toimii kaikissa tilanteissa ja varmistaa henkilöiden turvallisuuden kaikissa paikoissa, joihin henkilöiden pääsy on sallittu. Lisäksi standardin SFS 6001 mukaisesti maasulkusuojaus on aina varmennettava. (SESKO RY, 2015)

2.4 Sähköverkon erilaiset viat

Keskijänniteverkossa tapahtuvat viat voidaan karkeasti jakaa kahteen luokkaan: oikosulkuihin ja maasulkuihin. Verkon ominaispiirteen, nollajohtimen puuttumisen vuoksi, vikojen luonteet eroavat merkittävästi toisistaan. Oikosulut ovat vikoja, joissa vaihejohtimet osuvat yhteen. Maasuluissa vaihejohdin osuu maahan tai maadoitettuun osaan. (Partanen & Lakervi, 2012) Yleistettynä yksivaiheiset viat ovat maasulkuja ja kaksi- sekä kolmivaiheiset viat oikosulkuja.

Oikosulkuvioissa vikavirrat ovat suuria ja tämän vuoksi viat on helppo havaita. Viat on kytkettävä nopeasti pois verkosta, koska suuret virrat voivat aiheuttaa laitevaurioita. Tyypillinen oikosulkuvirta keskijänniteverkossa on 150 A – 12 kA riippuen vian sijainnista: kiskostossa vikavirrat ovat suuria ja pitkien johtojen loppupäissä pieniä. (Partanen & Lakervi, 2012) Kaupunkialueella oikosulkuvirrat ovat kuitenkin 4 – 12 kA. Tämä johtuu siitä, että päämuuntajat ovat isoja ja johtolähdöt lyhyitä. Oikosulkuviat on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Maasuluissa vikavirrat tyypillisesti ovat pieniä ja tämän takia viat on vaikea havaita. Avojohtoverkoilla maasulkuvirta on 5 – 20 A ja kaapeliverkoilla 20 – 200 A. (Lakervi & Partanen, 2012) Eräs tyypillinen tapaus maasulusta on ylijännitesuojan toiminta, jolloin yksi vaihe on johtavassa yhteydessä maahan ja vikaresistanssi on hyvin pieni. Pienen vikaresistanssin kautta tapahtuvat maasulut on helppo havaita. Toinen tyypillinen maasulku on puun nojaaminen linjaan, jolloin vikaresistanssi on suuri ja vikaa on vaikea havaita. Katkeilevat maasulut, johtimien katkeamiset ja kaksoismaasulut ovat maasulkujen erikoistilanteita. (Lakervi & Partanen, 2012) Nykyään sähkönjakelun siirtyessä kohti säävarmaa verkkoa, maakaapeloitavan verkon määrä on kasvanut huomattavasti. Tämä muuttaa erityisesti maaseudun maasulkuja vikavirtojen kasvaessa kaapeloinnin takia.

Kaksoismaasulku on tilanne, jossa kaksi vaihetta on galvaanisessa yhteydessä maihin eri kohdissa verkkoa. Tilanne voi syntyä, kun maasulun aikana terveiden vaiheiden vaihejännitteet voivat kasvaa jopa pääjännitteitä suuremmiksi. Noussut jännite voi aiheuttaa läpilyönnin jossain muualla verkossa, jolloin verkossa on kaksi maasulkuja samaan aikaan. Vikapaikkojen välillä kulkeva virta hakeutuu johtaviin osiin, kuten telekaapeleiden vaipoihin, rikkoen kaapeleita. (Lakervi & Partanen, 2012) Kaksoismaasulut on erityisen luonteensa takia rajattu tämän työn ulkopuolelle.

2.5 Maasulku

Yksivaiheinen maasulku syntyy yhden vaihejohtimen osuessa maahan joko suoraan tai vikaimpedanssin kautta. Tällöin viallisen vaiheen jännite pienenee ja terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat. (Mörsky, 1992) Suorissa maasuluissa vikavastus R_f on 0Ω , jolloin

vaihejännitteet nousevat pääjännitteiden suuruiseksi ja tähtipisteen jännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi. Suurempi vikaimpedanssi aiheuttaa pienemmän vikavirran, jolloin myös verkon jännitteen muutokset pienenevät. Maasulkujen aikana terveiden vaiheiden väliset pääjännitteet pysyvät ennallaan, eivätkä kuormitukset häiriinny. (Mörsky, 1992)

Verkon vaihejohtimet toimivat maan kanssa kondensaattorin tavoin, eikä terveessä verkossa ole johtavaa yhteyttä maahan. Normaalissa tilanteessa vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkee varausvirtaa, joiden summa on nolla. Vian aikana yhden vaiheen jännitteen mennessä nolnaan, myös kyseisen vaiheen varausvirta menee nolnaan. Terveiden vaiheiden varausvirrat kiertävät generaattorien ja muuntajien käämien tähtipisteiden kautta viallista vaihetta pitkin vikakohtaan. Varausvirrat muuttavat asemalla mitattavia vaihevirtoja. (Mörsky, 1992) Vian alun muutostilanteessa virtojen muuttuminen näkyy tasavirtakomponenttina, eli alkutransienttina. Vian jatkuessa verkon tila tasaantuu, jolloin varausvirrat näkyvät perustaaajuisena virtamuutoksena. (Pitkänen, 2016).

Yksivaiheinen maasulku ei vaikuta kuormitusvirtoihin. Vikavirran mittauksista kolmivaiheinen kuormavirta summautuu pois. Maasulun tyypistä riippuen vikavirrat voivat olla kuormitusvirtoja suuremmat. (Mörsky, 1992)

Maasulkuvirta koostuu verkon kapasitanssin muodostamasta virrasta sekä resistiivisistä häviöistä johtuvasta virran resistiivisestä osasta. Maakaapelien kapasitanssit vaikuttavat merkittävästi verkon kapasitanssiin. Maasta erotetulla verkolla maasulkuvirran suuruus riippuu galvaanisesti yhteen kytketyn verkon koosta. Sammutetulla verkolla vikavirtaan vaikuttaa lisäksi sammutuskelan asento ja mahdollinen lisävastus (Mörsky, 1992). Maakaapelien kapasitanssit ovat avojohtojen kapasitansseja suuremmat, jolloin kaapeleiden tuottama maasulkuvirta on 2,7 – 4 A/km (Lakervi & Partanen, 2012). Avojohdot tuottavat kapasitiivista maasulkuvirtaa 0,067 A/km, jonka suuruuteen vaikuttaa myös avojohtojen geometria. Yleisesti laskelmissa voidaan käyttää maakapasitansseille keskimääräistä arvoa 6 nF/km/vaihe (Lakervi & Partanen, 2012). Maakaapelien kapasitanssi riippuu kaapelin tyypistä. Kaapeleita on kahta päätyyppiä: vyöeristeisiä ja lieriökenttäisiä. Lieriökenttäisillä kaapeleilla maakapasitanssi C_0 on käyttökapasitanssin suuruinen, kun taas vyöeristeisillä kaapeleilla maakapasitanssi on noin 60 % käyttökapasitanssista. Kaapelityypin lisäksi kaapelin poikkipinta-ala, lämpötila ja eristysaine vaikuttavat kaapelin kapasitanssiin, eli kaapelin tuottamaan maasulkuvirtaan. Kaupunkialueella käytetyt kaapelit, joiden poikkipinta-ala on 185 - 240 mm² tuottavat suuruudeltaan 2,6 - 4,5 A/km maasulkuvirtoja. (Mörsky, 1992)

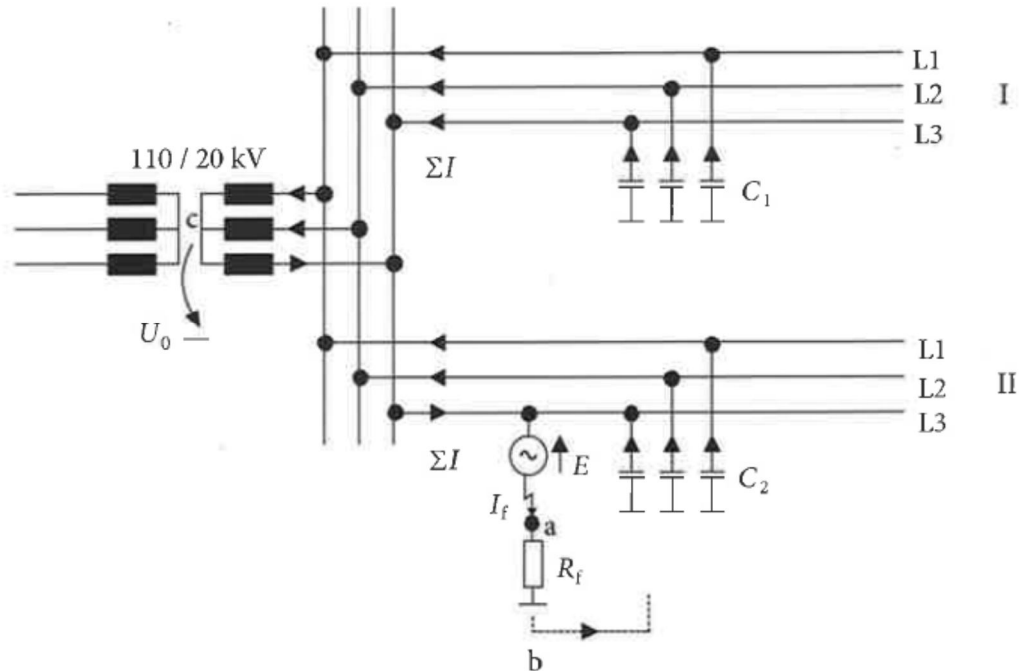
Mikäli verkossa on useampia tähtipisteitä, tähtipisteen kautta kiertävät vikavirrat jakautuvat eri tähtipisteille käämien impedanssien suhteessa. Summavirran suuruuteen ja suuntaan vaikuttaa kuitenkin vain verkon koko ja vikaimpedanssi. Maasta erotetulla verkolla muuntajien vianpuoleinen kytkentätapa ei vaikuta vikavirtaan, jos tähtipistettä ei ole maa-

doitettu tai sammutettu. Maasulkuvirtaa pienentää viallisen vaiheen ja maan välinen viikaimpedanssi. (Mörsky, 1992) Vikaresistanssi aiheuttaa vikavirran kanssa maadoitusjännitteen, joka voi olla suuruudestaan ja kestostaan riippuen vaarallinen ihmisille tai eläimille. Tämän takia tarvitaan maasulkusuojaus poistamaan vialliset johtolähdöt verkosta.

Maasulkuvirtaan vaikuttaa verkon galvaaninen pituus sekä käytetyt avojohto- ja kaapelityypit. Maakaapeliverkoilla, joissa eri vaiheiden maakapasitanssit ovat yhtä suuret, terveen tilan nollajännite on pienempi kuin avojohtoverkoissa, jossa maakapasitansseissa on eroja. Tästä syystä eri verkoissa nollajänniterele on asetettava eri tavalla. Maakaapeliverkossa rele voidaan asettaa toimimaan herkemmin. (ABB, 2000) Vikavastuksellisen maasulun aikana nollajännitteen muutos on suurilla verkoilla pienempi kuin pienillä verkoilla. Näin tapahtuu maasta erotetulle verkolle verkon kasvaessa ja sammutetuille sivuunvirityille verkoille. (Pitkänen, 2016) Kaapeliverkoilla kaapeleiden suuri maakapasitanssi aiheuttaa sen, että nollajännite pienenee nopeasti verkon koon kasvaessa (ABB, 2000).

2.5.1 Maasta erotetun verkon maasulku

Maasta erotetun verkon nollapistettä ei ole kytketty maahan, eli se on kelluva. Maasta erotetuilla verkoilla maasulkuvirta muodostuu verkon koon ja mahdollisen vikaresistanssin mukaan. Verkon koolla tarkoitetaan maasulkuvirtaa tuottavien johtimien pituutta. Ilmajohdoilla maakapasitanssi on verrannollinen johtimen pituuteen ja halkaisijaan. Johtimien väli ja ripustuskorkeus vaikuttavat maakapasitanssiin hyvin vähän. (Mörsky, 1992) Kuvassa 4 on havainnollistettu maasulkuvirran muodostumista maasta erotetussa verkossa.



Kuva 4. Maasulkuviran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)

Kuvasta 4 nähdään, miten jokaisen johtimen kapasitanssi synnyttää maasulkuvirtaa. Nämä kapasitiiviset virrat kiertävät muuntajan tähtipisteen kautta vialliseen vaiheeseen ja siitä vikapaikan kautta maahan. Vikavirran paluujohtimena toimii muu verkko. Suoran, eli vikavastuksettoman maasulun, aikana viallisen vaiheen ja maan välinen potentiaaliero on nolla, eikä viallisen vaiheen johdin syötä maasulkuvirtaa. Jos maasulussa on vikaresistanssia, viallinen johdin syöttää osan maasulkuvirrasta maakapasitanssin kautta. Viallisessa lähdössä terveet vaiheet syöttävät vikavirtaa kohti sähköasemaa ja viallisessa vaiheessa virta on sähköasemalta vikaa kohti. Rele mittaa näiden kolmen virran summaa. Suorien maasulkujen aikana terveiden johtolähtöjen kaksi vaihejohdinta syöttää maasulkuvirtaa. Vastaavasti maasuluissa, joissa on vikaresistanssia, terveiden johtolähtöjen kaikki kolme vaihejohdinta syöttävät kyseisen johtolähdön pituudesta riippuvaa maasulkuvirtaa ja suojarеле mittaa näiden kolmen vaiheen summavirtaa. (Lakervi & Partanen, 2012)

Terveiden lähtöjen summavirta on vastakkaisuuntainen viallisten lähtöjen summavirralle (Mörsky, 1992). Voidaan ajatella, että vikavirtaa menee kohti vikapaikkaa ja terveet johtolähdöt syöttävät vikavirtaa kohti asemaa sekä muuntajan tähtipistettä.

Maasulkuvirran suuruutta avojohtoverkossa voidaan arvioida kaavalla

$$I_f \approx \frac{Ul}{300}, \quad (2)$$

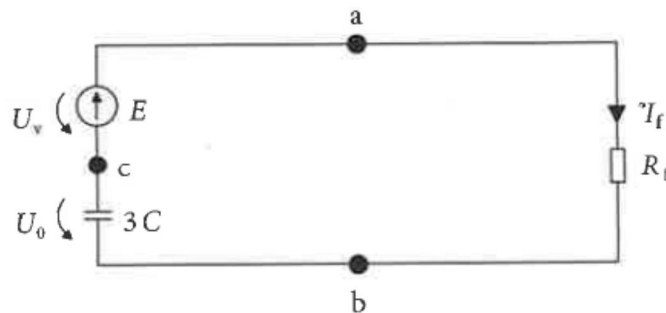
jossa I_f on maahan kulkenut vikavirta, U on pääjännite ja l verkon pituus. Kaavalla 2 saadaan laskettua ilmajohtoverkon koko, eli maakapasitanssien summa. Kaavassa 2 on

käytetty oletusta, että maakapasitanssin arvo on $C_0 = 6,13 \text{ nF/km}$, johon on sisällytetty jakelumuuntajien kapasitanssit (Mörsky, 1992).

Maasta erotetun verkon vikavirran ja nollajännitteen välillä pätee seuraava kaava:

$$\underline{I}_f = -j\omega 3C_0 \underline{U}_0, \quad (3)$$

jossa \underline{I}_f on verkon vikavirta, \underline{U}_0 on nollajännite ja C_0 vaiheen kapasitanssi. Maasulkuvirta on maasta erotetussa verkossa 90 astetta nollajännitettä jäljessä (Mörsky, 1992). Resisttiivinen virta kääntää tätä virtaa nollajännitettä kohti, mutta resisttiivisen virran suuruus on merkityksetön kapasitiiviseen virtaan verrattuna. Maasulku voidaan mallintaa kuvan 5 mukaisella sijaiskytkennällä.



Kuva 5. Yksivaiheinen maasulun sijaiskytkentä Maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)

Kuvasta 5 nähdään, että pisteiden a ja b yli on vaihejännitteen ja nollajännitteen summajännite ($U_v + U_0$), joka on myös vikaresistanssin yli oleva jännite.

Laskuissa vaihejännitteenä voidaan käyttää asemalla mitattua vaihejännitettä, koska jännitehäviö johdolla ei ole merkittävää. Johdon jännitehäviöllä on merkitystä pitkillä tai suurivirtaisilla johdoilla. (Mörsky, 1992)

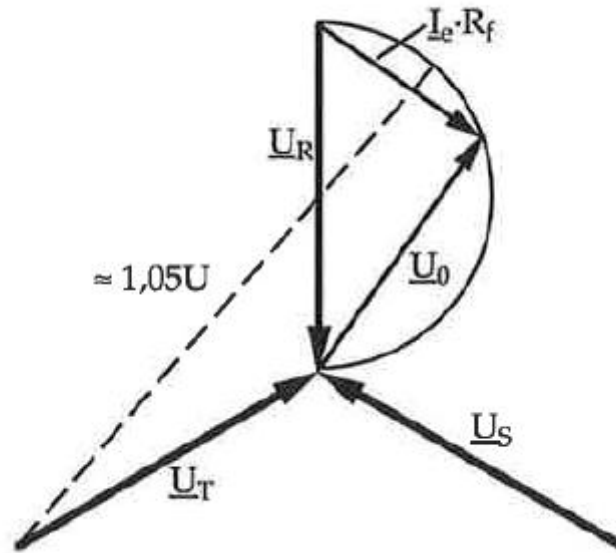
Terveillä lähdoilla releen näkemä vikavirta I_f on terveen johdon maakapasitanssin kautta kulkeva osa vikavirrasta.

$$\underline{I}_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} \underline{I}_f, \quad (4)$$

jossa \underline{I}_v on releen näkemä virta, C_0 koko verkon kapasitanssi ja C_{0j} viallisen vaiheen kapasitanssi. (Mörsky, 1992)

Kuvassa 6 on havainnollistettu jännitteiden käyttäytymistä maasulun aikana. Viallisen vaiheen jännite pienenee sen koskettaessa maata, jolloin nollajännite sekä kahden terveen

vaiheen jännite kasvaa. Viallisen vaiheen jännitteen ja nollijännitteen summa on täysi vaihejännite.



Kuva 6. Maasta erotetun verkon vektorikuva (Mörsky, 1992)

Kuvassa 6 \underline{U}_R , \underline{U}_T ja \underline{U}_S ovat terveen tilan vaihejännitteet. Katkoviiva kuvaa jännitettä \underline{U}_T , joka on kasvanut maasulun seurauksena. I_e on maasulkuvirta.

Nollajännite kulkee osoitindiagrammissa vikaresistanssin funktiona puoliympyrän. Tämän ympyrän halkaisijana on viallisen vaiheen jännitteen osoitin. Nollajännite kasvaa vaihejännitteen suuruiseksi, jos vikaresistanssia ei ole. (Mörsky, 1992) Vikaresistanssi siis pienentää nollijännitteen nousua ja sen piirtämää kaarta, minkä seurauksena suurilla vikaresistansseilla viallisen lähdön tunnistaminen on vaikeaa.

2.5.2 Sammutetun verkon maasulku

Maadoitus- ja vaarajännitteiden syntymiseen vaikuttaa merkittävästi vikapaikassa kulkeva vikavirta. Kaapelien tuottama maasulkuvirta on paljon suurempi kuin vastaavalla pätkällä avojohtoa. Kaapeliverkoilla on huolehdittava kapasitiivisen maasulkuvirran haittavaikutuksien minimoimisesta. Käytännössä tämä tarkoittaa maasulkuvirran pienentämistä. Maasulkuvirran rajoittamiseen on kaksi eri tapaa. Ensimmäinen tapa on jakaa verkko pienempiin osiin lisäämällä päämuuntajien määrää verkossa. Toinen tapa on lisätä verkkoon kuristin, joka tuottaa induktiivista maasulkuvirtaa. Maasulkuvirran rajoittamista kuristimella kutsutaan sammutukseksi. (Mörsky, 1992)

Maasta erotetussa keskijänniteverkossa muuntajissa on harvoin saatavilla tähtipistettä, johon kuristin voidaan asentaa. Näissä tapauksissa tähtipiste on tehtävä erillisellä tähtipistemuuntajalla. (ABB, 2000) Tähtipisteitä esiintyy verkossa yleisimmin päämuuntajien yhteydessä. 110/20 kV päämuuntajia on Suomessa kahta päätyyppiä. Muuntajat voivat olla kytkentäryhmää Ynd11, jolloin tähtipistettä ei ole 20 kV puolella saatavilla ja verkkoon tarvitaan erillinen tähtipistemuuntaja. Toinen yleinen vaihtoehto muuntajan kytkentäryhmäksi on YNyn0, jossa on tähtipiste toisiossa. Tähän muuntajaan sammutuskuristin voidaan kytkeä suoraan. (Mörsky, 1992)

Sammutetussa verkossa yhden tai useamman muuntajan tähtipisteeseen sijoitetaan kuristin ja näiden kuristimien tuottama induktiivinen virta asetellaan vastaamaan kapasitiivista maasulkuvirtaa vikatapauksissa. Käyttäessä sähköasemille kytkettyjä kuristimia, puhutaan keskitetystä kompensoinnista. Verkon varrelle sijoitetut kuristimet ovat hajautettua kompensointia. (Mörsky, 1992)

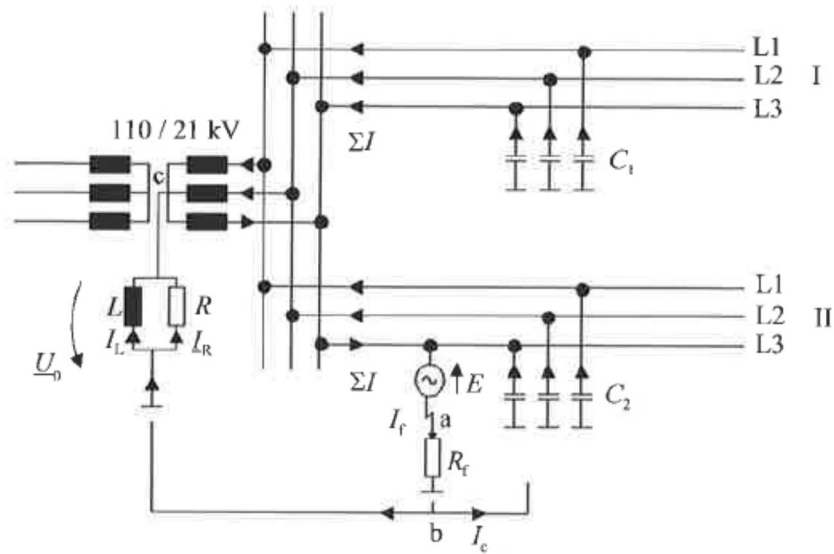
Keskitetyssä kompensoinnissa sähköasemalle sijoitettu kuristin kompensoi koko päämuuntajan alueen verkon kapasitiiviset virrat. Keskitettyä kompensointia rajoittaa tähtipisteen kuormitettavuus, joka on otettava huomioon muuntajaa valittaessa. Lisäksi tulee huomioida, ettei sammutuskuristin ole käytössä silloin, kun kyseinen päämuuntaja ei ole käytössä. (Pesonen, 2015)

Hajautetun sammutuksen periaate on, että verkon varrelle sijoitetaan useita pieniä sammutuskuristimia. Periaate on, että maakaapelin aiheuttama maasulkuvirta kompensoidaan samalla johtolähdöllä sijaitsevalla kuristimella. Tällöin kytkentöjen yhteydessä sammutuskuristin ja kaapeli ovat aina saman päämuuntajan perässä (Pesonen, 2015).

Kuristimen läpi kulkema induktiivinen nollavirta kompensoi verkon synnyttämän kapasitiivisen nollavirran. Tällöin maasulkuvirraksi jää 5 - 10 % vastaavan maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta. (Mörsky, 1992) Mahdollinen vikaresistanssi pienentää jo ennestään pientä vikavirtaa, jolloin suuriresistanssiset viat ovat hyvin vaikeita havaita (Wahlroos, a2016).

Sammutetun verkon etuja ovat valokaarivikojen sammuminen itsestään ja pienempi maasulkuvirta, jonka ansiosta voidaan säästää maadoituskustannuksissa. Kompensoinnin haittapuolina terveen tilan nollajännite kasvaa, vian aikana suhteellisen nollajännitteen muutos pienenee ja maasulkusuojaukseen tarvitaan monimutkaisempi toteutus. (Nykänen, 2009)

Kuten maasta erotetuilla verkolla, sammutetulla verkolla maasulkuvirta muodostuu johtimien kapasitanssista sekä resistiivisistä vuotohäviöistä. Kaaviokuva sammutetun verkon vikavirtojen muodostumisesta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Maasulun aikaiset vikavirrat sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)

Yksivaiheisessa maasulussa suurin osa vikavirrasta kulkee kuristimen kautta maahan, jolloin vastaavasti vikapaikan kautta kulkee maahan vain pieni osa maasulkuvirrasta. Vikapaikan kautta kulkeman virran suuruus riippuu verkon resistiivisestä vuotovirrasta, yli-aalloista ja kuristimen epävireisyydestä, eli sivuunvirityksestä. Verkko halutaan pitää hieinan sivuunvirityttynä, jolloin terveen tilan nollajännite on pienempi kuin resonanssissa. Verkon resistiivinen vuotovirta on kuristimen ja verkon pätöhäviöistä aiheutuvaa virtaa. Verkkoon syntyy yliaalloja kuristimen kyllästyessä U_0 -jännitteen vaikutuksesta. (Mörsky, 1992) Maadoitusjännitteiden takia sammutuskuristin on valittava niin, että sammutuskuristin ei kyllästy. Kuristin on mitoitettava pääjännitteen mukaiseksi. (Virtanen, 2016)

Sammutettujen verkkojen vian havainnointi perustuu nollavirran resistiiviseen osaan. Tyypillisesti tämä resistiivinen osuus on hyvin pieni, noin muutamia ampeereja, vikavastuksen ollessa nolla. Pieni vikavirta aiheuttaa haasteen suojaukselle. Jos suojaukselle halutaan hyvä herkkyys, eli vikalaukaisuja halutaan saada myös suurilla vikavastuksilla, verkkoon tarvitaan tarkasti mittaavat nollajännitemuuntajat ja summavirtamuuntajat. Kun virta on pieni, sen mitattuun arvoon voi vaikuttaa huoattavasti mittalaitteiden tarkkuus. Pientä virtaa voidaan kasvattaa sammutuskelan rinnalle laitettavalla lisävastuksella. (Wahlroos, b2016)

Lisävastus voi olla asennettuna kiinteästi kelan rinnalla, mutta usein käytetään ohjattavaa lisävastusta, jota voidaan ohjata päälle ja pois käyttötilanteen mukaisesti. Verkoissa käytetään ohjattavia lisävastuksia, koska lisävastuksilla ja valokaarien sammumisella itsessään on selkeä yhteys: mitä pienempi virta valokaarissa kulkee, sen todennäköisemmin

se sammuu itsestään, jolloin ei tarvita keskeytystä asiakkaille. Vikavirtaa voidaan pienentää kytkemällä lisävastus pois. Suurempaa virtaa tarvitaan viallisen lähdön paikallistamiseen. (Isomäki, 2010)

Lisävastuksien ohjaamiseen on monta tapaa joista mikään ei ole ylitse muiden. Jakeluverkkoyhtiöt käyttävät sitä tapaa, joka on omien kokemusten perusteella todettu hyväksi. (Isomäki, 2010) Vastuksen käytölle voidaan erottaa kolme eri käyttötapaa:

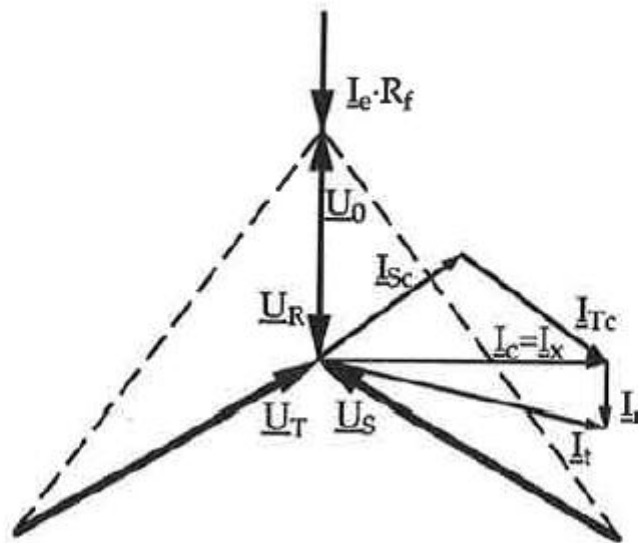
- Vastus on aina kytkettynä
- Vastus kytketään viiveellä maasulun havaitsemisen jälkeen
- Vastus on päällä ja se kytketään maasulun alkamisen jälkeen hetkeksi pois (Isomäki, 2010)

Silloin kun vastus on aina kytkettynä on todennäköistä, etteivät valokaaret sammua itsestään. Kun vastus kytketään päälle viiveellä, valokaari sammuu suuremmalla todennäköisyydellä. Vian erottaminen verkosta voi kuitenkin olla hitaampaa, kun resistiivinen virta kasvaa viiveellä. Jos vastus on päällä ja se kytketään verkosta pois vian havaitsemisen jälkeen, on mahdollista, että valokaari sammuu itsestään. Relesuojaus ehtii kuitenkin haahahtumaan, koska vian alussa on suuri resistiivinen virta. Tässä on yhdistetty edellä mainittujen tapojen hyvät puolet (Isomäki, 2010).

Suuremman resistiivisen virran ansioista releiden on helpompi havaita vika. Lisävastus kasvattaa maasulkuvirtaa ja samalla pienentää nollajännitettä. Tämä nollajännitteen pienentyminen pitää ottaa huomioon releen toimintaa suunnitellessa. (Wahlroos, a2016)

Sammutetussa verkossa vian aikaiset nollajännitteet ovat korkeammat kuin maasta erotetulla verkolla. Sammutetulla verkolla esiintyy nollajännitettä myös terveessä verkossa ilman vikaa. Nollajännite syntyy eri vaiheiden kapasitanssien epäsymmetriasta. Koska kelan ja maakapasitanssin resonanssitaajuus on 50 Hz, voi nollajännite nousta huomattavaksi: 20 kV verkossa nollajännite voi olla kymmeniä prosentteja. Tätä nollajännitettä voidaan pienentää tähtipistevastuksella tai symmetroimalla eri vaiheiden maakapasitanssit. (Mörsky, 1992) Koska maasulun indikaattorina käytetään nollajännitettä, terveen tilan nollajännite halutaan pitää mahdollisimman matalana. Korkea terveen tilan nollajännite pienentää mahdollisuutta huomata suuriresistanssisia maasulkuja, joissa nollajännite ei nouse pienen vikavirran takia. Kaapeliverkoilla nollajännite pienenee nopeammin kuin vastaavalla avojohtoverkolla ja lisävastus pienentää tätä jännitettä entisestään. Lisävastuksen kytkeminen pois nostaa nollajännitettä. (Wahlroos, b2016)

Kuva 8 on kuvaa jännitteiden ja vikavirtojen suhteita sammutetun verkon maasulussa. Kuvan verkko on täysin sammutettu, eli tilanne ei vastaa todellisuutta, koska verkot pyritään pitämään hieman alikompensoituina.



Kuva 8. Vaihejännitteet maasulun aikana sammutetussa verkossa

I_{sc} ja I_{Tc} kuvaavat terveiden vaiheiden kautta tulevaa kapasitiivista maasulkuvirtaa: I_c on kapasitiivinen maasulkuvirta (Mörsky, 1992).

- I_x on kelan virta
 - I_r on resistiivinen maasulkuvirta
 - I_t on kuristimen virta
 - $I_c - I_t$ on maasulkuvirta ($I_c - I_t = I_r$)
- (Mörsky, 1992)

Kapasitiiviset virrat ovat 90 astetta edellä vastaavia pääjännitteitä. I_{sc} on 90 astetta edellä vastaavaa pääjännitettä. Kapasitiivinen maasulkuvirta on 90 astetta edellä nollajännitettä ja resistiivinen maasulkuvirta on samaan suuntaan nollajännitteen kanssa. (Pitkänen, 2016)

Täysin kompensoidussa verkossa, kun kuristin ja on ajettu resonanssiin verkon kapasitanssin kanssa, kaikilla johtolähdöillä näkyy samansuuntaiset ja asemaa kohti kulkevat kapasitiiviset virrat. Summavirran resistiivinen osuus näkyy ainoastaan viallisella johtolähdöllä. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää relesuojauksessa. Sivunviritetyille verkolle viallisen lähdön virran suunta riippuu kompensointiasteesta, joten virran suuntaa ei voida käyttää suojauskarakteristikassa, eli suojausasetteluissa. Imaginäärinen (kap tai ind) vikavirran suunta ja suuruus riippuu kompensointiasteesta. Virran resistiivinen komponentti on kuitenkin aina vikaa kohti, ja tätä voidaan käyttää suojausasettelussa. (Mörsky, 1992)

Kompensoidulle verkolle I_f ja U_0 voidaan laskea kaavoilla:

$$\underline{I_f} = \frac{\underline{U_v}}{R_f + \frac{R_0}{1 + jR_0(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (5)$$

$$\underline{U_0} = \frac{\frac{-R_0}{R_f + \frac{R_0}{1 + jR_0(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}}}{R_f + R_0 + jR_0R_f(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})} \underline{U_v}, \quad (6)$$

jossa R_0 on kelan rinnalla oleva häviöresistanssi, eli lisäresistanssi, ja verkon resistiiviset häviöt (Mörsky, 1992). Täysin kompensoidulle verkon erikoistapaukselle kaavoja voidaan yksinkertaistaa seuraavaan muotoon:

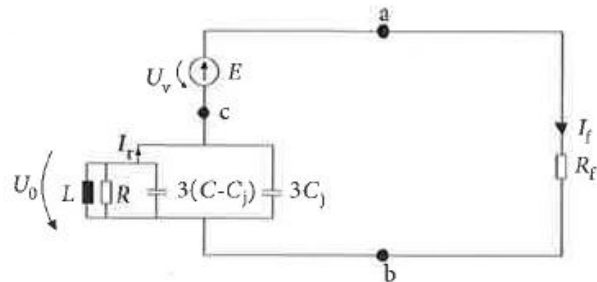
$$I_f = \frac{U/\sqrt{3}}{R_f + R_0} \quad (7)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Sammutetulle verkolle saadaan U_0 ja I_0 välille yhteys:

$$\underline{I_f} = - \left[\frac{1}{R_0} + j \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \underline{U_0} \quad (9)$$

Myös sammutetun verkon maasulkua voidaan havainnollistaa yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Sijaiskytkennässä, joka on esitetty kuvassa 9, verkon kapasitanssien rinnalle on kytketty kela, joka kuvaa sammutuskelaa, sekä kelan rinnalle vastus kuvaamaan resistiivistä maasulkuvirtaa kasvattavaa lisävastusta.



Kuva 9. Yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012)

Kuvasta 9 nähdään, että vikavastuksen yli on summajännite $U_v + U_0$, joka on sama kuin maasta erotetun verkon tapauksessa. Sammutetulla verkolla vikavastuksen kanssa on sarjassa verkon kapasitanssin ja sammutuskelan rinnankytkentä.

Resistiiviseen I_0 -virtaan, eli nollavirran pätökomponenttiin, vaikuttaa verkon johtimien resistanssit, verkon resistiiviset vuotohäviöt, sammutuskuristin sekä sammutuskuristimen lisäresistanssi (Partanen & Lakervi, 2012). Kaapeliverkoissa vuotohäviöt ovat vastaavia

avojohtoverkkoja pienemmät, mikä tarkoittaa myös pienempiä vuotovirtoja ja nollavirran resistiivista komponenttia. Samasta syystä vikojen jälkeiset värähtelyt kestävät kaapeli-verkoissa pidempään. (Wahlroos, b2016) Nollajännitteen ja nollavirran jälkivärähtelyt alkavat verkon maakapasitanssien ja nollapiirin induktanssien, eli sammutuskelojen, resonanssitaajuudella. Värähtelyn taajuus muuttuu, kunnes se on sama kuin verkon perustaa-juus. Ylikompensoiduilla verkoilla resonanssitaajuus on suurempi kuin perustaa-juus. Vastaavasti, alikompensoiduilla verkoilla resonanssitaajuus on pienempi kuin perustaa-juus. (Pitkänen, 2016)

Sammutetuilla verkoilla terveen verkon nollajännite on suurempi kuin maasta erotetuilla verkoilla. Vastaavasti myös maasulun aikana nollajännite on korkeampi. (ABB, 2000) Verkko pidetään hieman alikompensoituna, jotta nollajännite olisi resonanssitilaa pienempi. Näin saadaan parempi herkkyys maasulkusuojille.

3. MAASULKUSUOJAUS, RELEIDEN ASETTE- LUT JA TOIMINTAPERIAATTEET

Tässä luvussa käsitellään maasulun suojausta erilaisten lohkojen toimintaperiaatteiden avulla ja käydään läpi esimerkkiasettelut eri lohkoille. Suojauslohkoille on eri standardien mukaisia nimeämistapoja. Muutaman eri standardin nimeämistavat on koottu liitteeseen 2.

Releissä on mahdollisuus asetella useita eri lohkoja suojaamaan samaa asiaa. Näitä lohkoja kutsutaan portaiksi ja portaat asetellaan usein eri laukaisuajoille. Eri laukaisuajojen käyttäminen mahdollistaa suurivirtaisten maasulkujen nopean laukaisun pois verkosta. Pienivirtaiset maasulut voivat olla päällä pidempään, jolloin vian itsestään sammumisen mahdollisuus kasvaa. Pitkään verkossa oleva maasulku voi muuttua myös oikosuluksi, jolloin sen paikantaminen laskemalla on helpompaa. (Partanen & Lakervi, 2012) Oikosulut rasittavat verkkoa sekä näkyvät koko päämuuntajan alueella jännitekuoppina, jotka ovat haitaksi asiakkaille.

Maasta erotetuilla verkoilla maasulkusuojaus voidaan toteuttaa suunnattomilla nollavirtareleillä tai nollavirtaa ja nollajännitettä mittaavien suuntareleiden avulla. Nollajännitteen ylijänniterelettä käytetään suuntareleiden tapauksessa kiskosuojana sekä varasuojana. Sammutetun verkon maasulkusuojaus toteutetaan suunnatuilla suojilla, joiden toiminta perustuu joko maasulkuvirran pätökomponentin suuntaan ja suuruuteen tai kulmamittausperiaatteeseen, kuten maasta erotetulla verkolla. Sammutetun ja maasta erotetun kulmamittausperiaatteen ero on käytetyissä asetteluissa. (ABB, 2000) Kuitenkin maasulkusuojauksen vikakriteereinä voidaan käyttää lähes kaikkia maasulun aiheuttamia sähköisiä ilmiöitä, kuten:

- Suuritaajuiset tasoitusvirrat
- Maasulkuvirran ja nollajännitteen yliaallot
- Perustaajuinen nollajännite
- Viallisen vaiheen jännitteen pieneneminen
- Terveiden vaiheiden jännitteiden kasvu
- Maasta erotetulla verkolla summavirrat
- Sammutetulla verkolla viallisen johdon nollamuotoinen resistiivinen virta
- Vastavuoroinen virta
- Sammutetulla verkolla vaimeneva tasavirtakomponentti viallisen ja terveiden joihtojen välillä
(Mörsky, 1992)

Lähdöillä voidaan käyttää useampiportaisia suojauksia, jotka asetellaan toimimaan nol-lajännitteen arvon perusteella. Alimmilla portailta voidaan saavuttaa suuri herkkyys ja ylempillä portailta suuri toimintanopeus. Suuret vikavirrat aiheuttavat suuret kosketus-jännitteet ja suuret virrat esiintyvät pienillä vikaresistansseilla, jolloin nollajännite nou-see. (ABB, 2000)

Verkossa käytetään useampaa eri suojaa täydentämässä toisiaan. Esimerkiksi suunnatun suojan rinnalla käytetään suuntaamatonta suojaa, jolla saavutetaan suurempi toimintano-peus suurivirtaisten kaksoismaasulkujen aikana. Suurempaa toimintanopeutta tarvitaan erityisesti silloin, jos kaksoismaasulussa on vikaresistanssia ja vikavirta ei yllä ylivir-tasuojauksen tasolle. Sopivalla asettelulla suuntaamaton suoja saadaan toimimaan vain kaksoismaasulun tapauksessa, jolloin suojan toiminta on selvä indikaatio, eli merkki, vi-katyypistä. Näiden suojien lisäksi tarvitaan vaihekatkosuoja, joka havaitsee katkenneen johtimen niissä tapauksissa, kun maasulkusuojaus ei sitä huomaa. Näitä tilanteita ovat johtimen putoaminen huonosti johtavalle maaperälle tai johtimen putoaminen maahan kuorman puolelta. (ABB, 2000)

Verkoille, joita käytetään sekä sammutettuina että maasta erotettuina, käytetään laajalla toimintasektorilla toimivia kulmamittausreleitä tai releitä, jotka on varustettu automaatti-sella kulmanvaihdolla. Tällöin suojaus toimii halutulla tavalla molemmilla käyttötavoilla. (ABB, 2000)

Suppeilla kompensoiduilla verkoilla pätkökomponentti voi jäädä niin pieneksi, että maa-sulkuvirran suuntaa ei saada määritettyä luotettavasti. Ongelma korostuu, jos nollavirran mittaustapana käytetään summakytkeä tai laskennallista summamittausta. Nollavirran pätkökomponenttia kasvatetaan kompensointikuristimen rinnalle kytketyn lisävastuksen avulla. (Mörsky, 1992)

Herkän maasulkusuojauksen tekeminen laajaan kaapeliverkkoon on vaikeampaa kuin avojohtoverkkoon. Tähän yksi syy on se, että kaapeliverkossa vikatyyppejä on useita. Maasulut usein sisältävät katkeilevaa ja pysyvää vikaa (Wahlroos, b2016).

Suojauksen herkkyys, eli erottelukyky, riippuu käytetystä suojauslohkoista, niiden aset-teluista ja virtamuuntajan tarkkuudesta. Virtamuuntajien kyky erotella pieni resistiivinen virta kapasitiivisen virran seasta näkyy suoraan suojausten tarkkuudessa. Lisäksi verkon symmetrisyys, eli terveen verkon nollajännitteen taso, vaikuttaa siihen, miten suuriresis-tanssiset viat huomataan.

Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla ja suojausten toteuttamiseen löytyy usein eri vaihtoehtoja. Seuraavissa luvuissa on käsitelty eri suojauslohkojen toimintaa tarkemmin. Tarkastelussa on keskitytty suojauskarakteristikoiden toimintaan ja erilaisten toimintalaskureiden toiminta on jätetty tarkastelusta pois.

3.1 Suuntaamaton maasulkusuoja lo>

Suuntaamattoman nollavirtareleen toiminta perustuu asemalle palaavan maasulkuvirran suuruuden mittaamiseen. Maasulun aikana terveet lähdöt syöttävät oman kapasitanssinsa verran virtaa kohti kiskoa ja viallisessa lähdössä muiden johtojen syöttämän virran summa menee asemalta pois päin. (ABB, 2000)

Suuntaamaton maasulkusuoja perustuu ainoastaan nollavirtaan, joka voi olla mitattu summa virtamuuntajalla tai laskettu vaihevirroista. Mikäli nollavirta ylittää asetteluarvon, releen suojauslohko aloittaa laskemisen. Jos vika ei poistu, lohko suorittaa sille asetetun toiminnan, joka voi olla hälytys tai katkaisijan laukaisu. Lohko on tarkoitettu käytettäväksi maasta erotettujen-, sammutettujen-, sekä vastuksella maadoitettujen verkkojen maasulkusuojana. (ABB, b2014)

Suuntaamaton maasulkusuojaus asetellaan toimimaan, kun nollavirta ylittää asetteluarvon. Toiminta-aika voidaan asettaa vakioaikaiseksi tai käänteisellä toiminta-ajalla. Vakioajalla välitön laukaisu saadaan asettamalla toiminta-aika nolnaan. Käänteisellä toiminta-ajalla valitaan suojaus toimintakäyrästä. Käänteisellä toiminta-ajalla voidaan lisäksi asettaa erikseen pienin toiminta-aika. Jos suuntaamatonta maasulun suojaa käytetään muuntajan suojauksessa, kytkentävirtasysäys tulee ottaa huomioon käyttämällä laukaisun estoa tai pitkää toiminta-aikaa. Ilman kytkentävirtasysäyksen huomioimista muuntajan kytkeminen verkkoon voi aiheuttaa suojan ei-toivotun toimimisen. (ABB, b2014)

Vika voi joissain tapauksissa poistua ennen laukaisua, jolloin releen käynnistyssignaali saattaa poistua, riippuen releen valitusta toiminta-ajan asettelusta. Jos toiminta-aikana on vakioaika, resetoitilaskuri (*reset delay time*) käynnistyy, jonka jälkeen käynnistyssignaali poistuu. Mikäli toiminta-aikana on käänteisaika, voidaan resetoitilaskuriksi valita kolmesta eri vaihtoehdosta. Resetointi voi tapahtua välittömästi, vakioaikaisella laskurilla tai käänteisajan laskurilla. Käänteisaikaisella laskurilla resetoitintaika riippuu vikavirrasta ennen vian poistumista. (ABB, b2014)

ABB:n REF 630 releissä on kolmiportainen suuntaamaton maasulkusuoja EfxPTOC. Releen kolme porrasta ovat hidas, nopea ja välitön porras. Hidas ja nopea porras voidaan asettaa mittaamaan tehollisarvoa (*RMS*), diskreettiä Fourierin muunnosta (*DFT*) tai huippuarvoja (*Peak to Peak*). Välitön porras mittaa vain huippuarvoja. Hitaalle portaalille on tarjolla eniten erilaisia suojauskarakteristikoja. Nopeammille portaille nopeus on monipuolisuutta tärkeämpi ominaisuus. (ABB, b2014)

Suuntaamaton suojaus asettaa ehtoja verkolle ja kytkentätilanteille. Suuntaamattomalla suojauksella yhdenkään johtolähdön syöttämä maasulkuvirta ei saa olla yhtä suuri kuin muiden johtojen yhteenlaskettu virta. Lisäksi verkon kytkentätilanne ei saa muuttua huomattavasti, koska jokaiselle releelle syötetään asetteluarvoiksi sen suojaaman johtolähdön

koko. Verkon koon muuttuessa, kytkentätilanteen muutoksen seurauksena, suojaus ei välttämättä enää toimi. (ABB, 2000)

Suoja asetellaan niin, että virran arvo on suurempi kuin suojattavan johtolähdön syöttämä virta. Virran arvon on kuitenkin oltava pienempi kuin taustaverkon maasulkuvirta.

3.2 Suunnattu maasulkusuoja I_0 ->

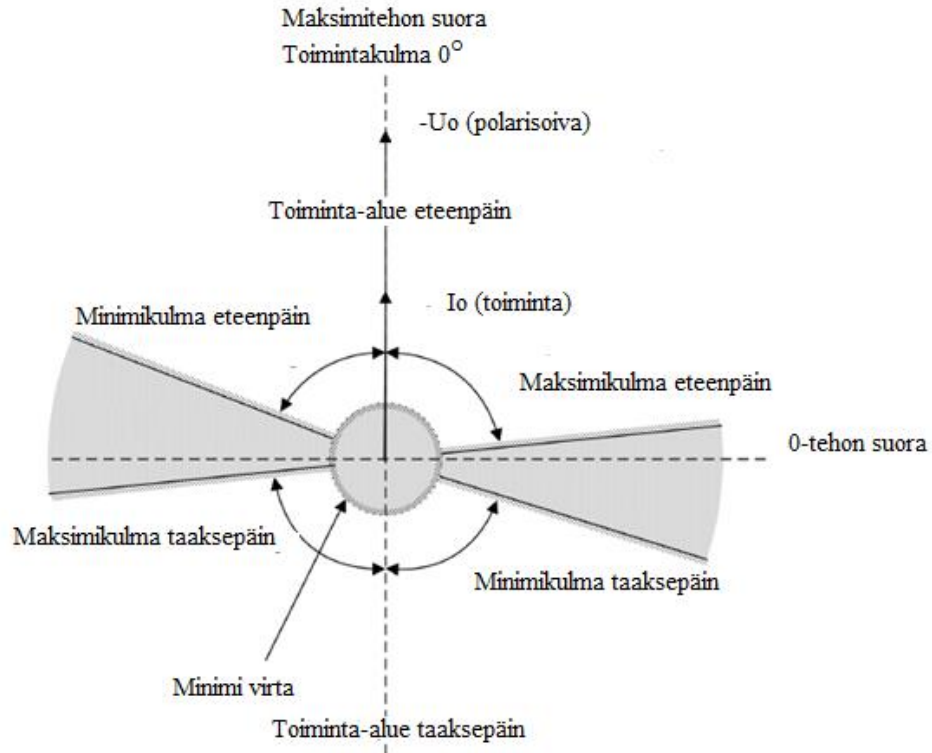
Suunnattu maasulkusuoja käyttää mittausravoina nollajännitettä ja nollavirtaa. Lohkolla voidaan suojata johtolähtöjä, kondensaattoriparistoja, reaktoreita ja muuntajia. (ABB, b2014)

Lohkolla on kaksi eri toimintatapaa, jotka eroavat toisistaan toiminnaltaan merkittävästi: kulmaperiaate ja virtaperiaate. Kulmaperiaate seuraa virran ja nollajännitteen välistä kulmaa ja virtaperiaate laskee virrasta resistiivisen tai kapasitiivisen osan. (ABB, b2014)

Maasulkusuoja havahtuu jos nollajännite ja nollavirta ovat yli asettelutason. Havahduttuaan suoja tarkastelee virtaa toimintakarakteristikan mukaisesti ja tarvittaessa käynnistää toiminta-aikalaskurin. Kuten suuntaamattomalle suojalle, toiminta-aikoina käytetään vakioaikaa tai käänteistä toiminta-aikaa. (ABB, b2014)

Virtaperiaatteella toimiessaan lohko voidaan asettaa toimimaan vapaasti valittavilla tai kiinteillä 80 tai 88 asteen toimintakulmilla. Tällöin myös suojauksen suunta on valittava eteen- tai taaksepäin. Nollajännitteen noustessa yli minimitason, lohko tarkastaa I_0 -virran suuruuden. Jos myös virta on yli minimiasetteluun, verrataan virran ja jännitteen kulmaa. Kun kulma on asetteluarvojen sisällä, vika on releen suojaamalla johtolähdöllä ja suoja toimii toivotusti. (ABB, b2014)

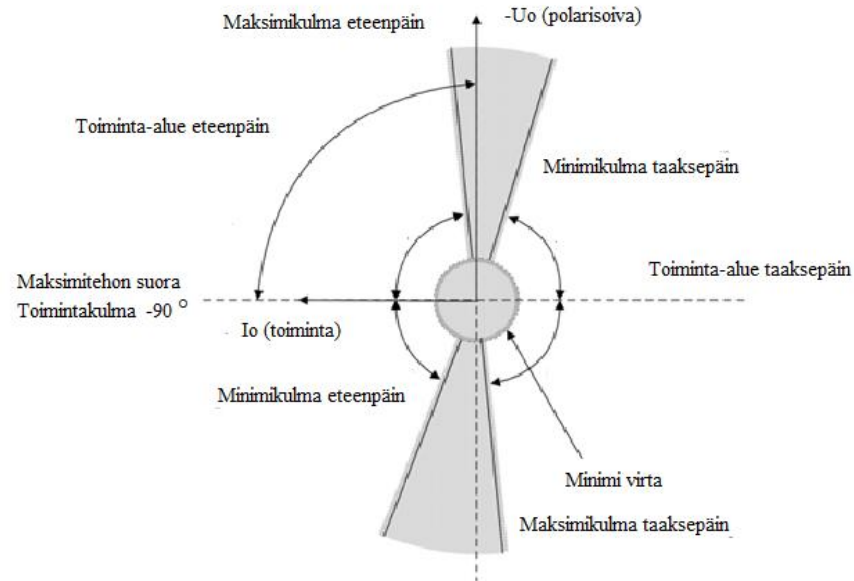
Sammutetun ja maasta erotetun verkon suojaukset saadaan kääntämällä kulman toiminta-alueita 90 astetta. Kuva 10 havainnollistaa sammutetun verkon suunnatusta maasulkusuojusta. Harmailla alueilla suoja ei toimi ja virran siirtyessä valkoisille toiminta-alueille suoja toimii. (ABB, b2014)



Kuva 10. Sammutetun verkon suunnatun maasulkusuojan toiminta-alueet, muokattu (ABB, b2014)

Kuvassa 10 suoja on aseteltu toimimaan sammutetulle verkolle sekä eteen, että taaksepäin. Todellisuudessa valitaan vain toinen toimintasuunta. Kuvan keskellä oleva pyöreä harmaa alue muodostuu virran ja jännitteen minimiasetteluista. Virtamuuntajien virheestä johtuen hyvin pienillä virroilla voi tulla vääriä laukaisuja jos minimiasetteluja ei ole aseteltu. Kuvan 10 tapauksessa suojauskulma on aseteltu noin 85 astetta eteenpäin ja noin 70 astetta taaksepäin.

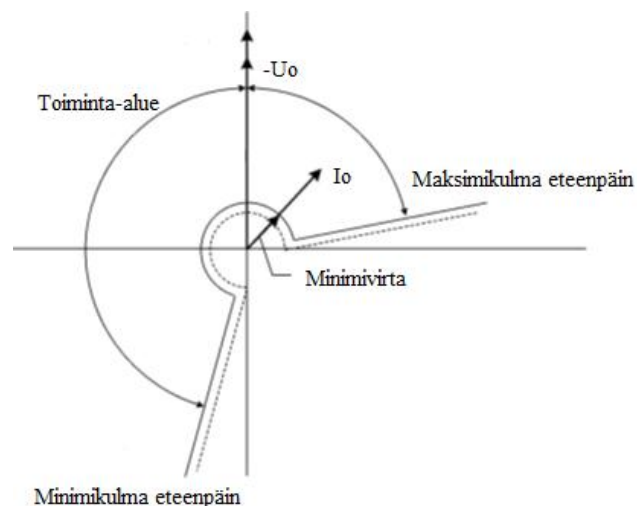
Resistiivinen virta on kuvassa nollavirran suuntaan, eli suoraan ylöspäin. Imaginäärinen virta kääntää nollavirtaa joko vasemmalle tai oikealle. Verkon sivuunvirityksen kasvaessa induktiivinen virta kasvaa ja nollavirta kääntyy yhä enemmän sivuun. Suurella sivuunvirityksellä nollavirta on toiminta-alueen ulkopuolella. Lisävastuksella voidaan kääntää nollavirran suuntaa takaisin toiminta-alueelle. Kuvassa 12 on vastaava esitys toiminta-alueista maasta erotetulle verkolle.



Kuva 11. Suunnatun maasulkusuojan toiminta-alueet maasta erotetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)

Maasta erotetun verkon vikavirta on kapasitiivista, jolloin se on kuvassa vaaka-akselin suuntaisesti vasemmalle. Kuvassa 11 toimintasektoria on käännetty 90 astetta vastaamaan virran uutta suuntaa.

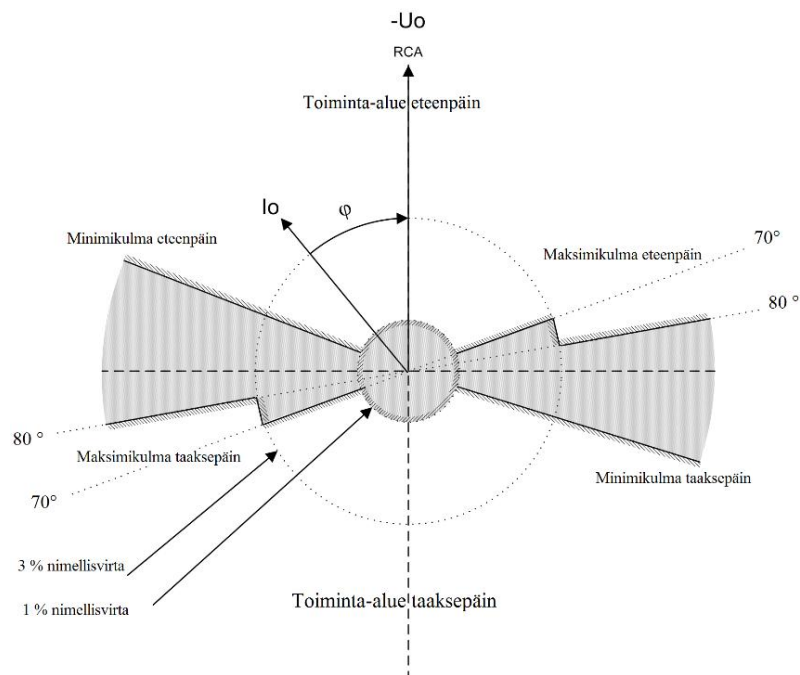
Suojauslohkolle on mahdollista ohjata kulman kääntymistä sammutuskelan tilatiedon perusteella. Sammutetun verkon kulmaa ei käännetä, mutta jos verkko muuttuu erotetuksi, toiminta-alue kääntyy vastaamaan uutta vikavirtaa. Toinen vaihtoehto on asetella suojauslohko niin laajaksi, että se toimii molemmilla verkon toimintatavoilla. (ABB, b2014) Tämä tapa on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Suunnatun maasulkusuojan kulmaperiaatteen universaali asettelu, muokattu (ABB, b2014)

Kuvasta 12 huomataan, että releen toiminta-alue on laajempi kuin kuvissa 10 ja 11. Universaalien asettelun suojassa on yhdistetty sammutetun ja maasta erotetun verkon asettelut. Tällä asettelulla ei tarvitse huomioida sitä, onko sammutuskela verkossa vai ei. Lisäksi suoja toimii myös pahasti alikompensoidussa verkossa. Mahdollisissa ylikompensointitilanteissa suoja menee toiminta-alueen ulkopuolelle. Kuvassa 12 verkko on ylikompensoitu, sillä virta on jännitettä jäljessä.

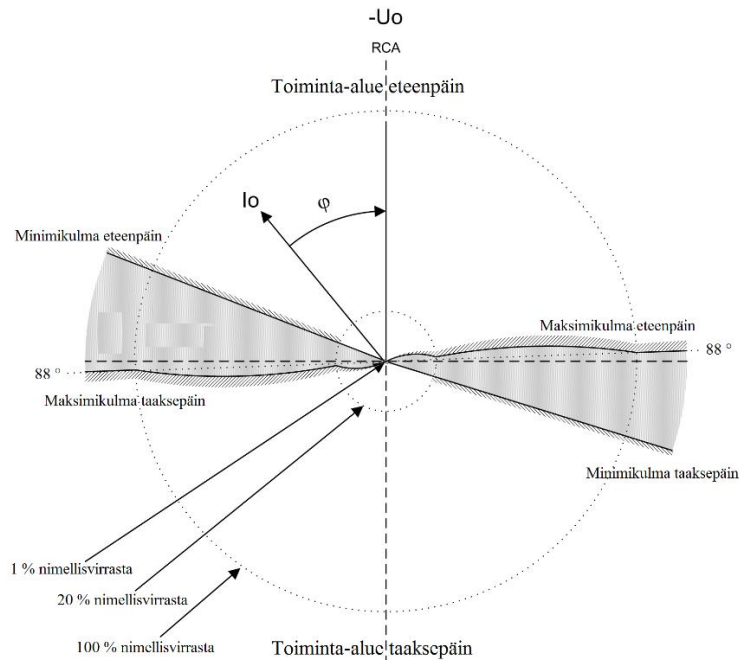
Kulmaperiaatteelle on olemassa valmiit 80 ja 88 asteen asettelut yllä esitetyn vapaan asettelun lisäksi. 80 asteen asetteluissa on virtamuuntajien virhettä varten tehty korjausalue induktiivisen virran puolelle.



Kuva 13. Kulmaperiaatteen 80 asteen asettelut sammutetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)

Kuvasta 13 nähdään 80 asteen kulmaperiaatteen sammutetun verkon asettelut. Induktiivisen virran puolella suojan toiminta-alue on suurella virralla laajempi kuin pienellä virralla. Suoja havahtuu 1 % vyöhykkeessä (min) ja vastapäivään (kap) suoja on aseteltu 70 asteeseen. Myötapäivään, eli induktiivisella puolella, käytössä on kulman 10 asteen laajennus, kun virta on 3 % nimellisestä arvostaan. Tällä mahdollistetaan suojan varmempi toiminta ylikompensointitapauksissa.

88 asteen asetteluissa suojausalue on jaettu kolmeen lohkoksi. Virran ollessa välillä 1 – 20 % nimellisestä arvosta, toiminta-alue kasvaa lineaarisesti 73 asteesta 85 asteeseen. Välillä 20 – 100 % alue kasvaa lineaarisesti 88 asteeseen, joka on toiminta-alueen raja, vaikka virran arvo kasvaisi yli 100 % nimellisestä.

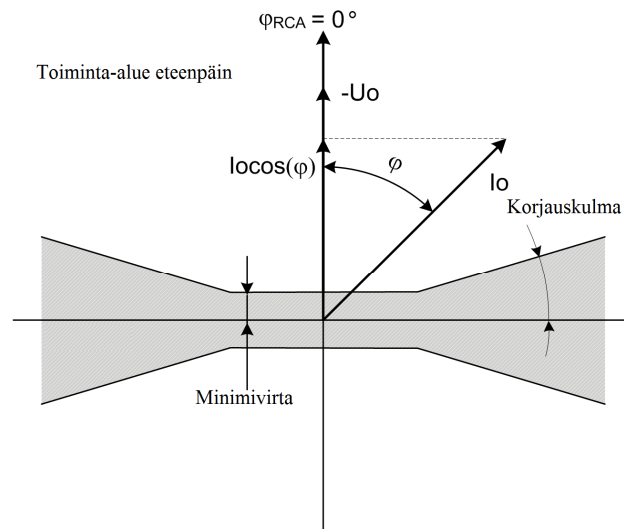


Kuva 14. Kulmaperiaatteen 88 asteen asettelut sammutetulle verkolle, muokattu (ABB, b2014)

Kuvassa 14 on esitetty 88 asteen asettelu. Jos kuvaa vertaa 80 asteen asetteluun, pitää huomata, että kuvien mittakaava ei ole sama. Kuvan 14 mittakaava käsittää virtamuuntajan koko toiminta-alueen, kun aikaisemmat kuvat ovat käsitelleet 5 % muuntajan toiminta-alueesta.

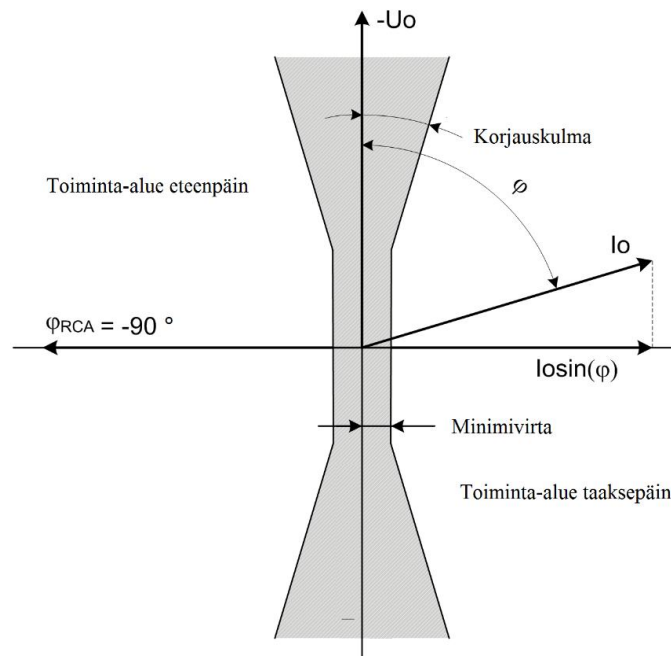
88 asteen asettelun etuna kapeampaan 80 asteen asetteluun on parempi toimintavarmuus yli- ja alikompensoinnilla. Virtojen kasvaessa toiminta-alue kasvaa niin, että suojaus toimii, vaikka kapasitiivista virtaa olisi paljon. (Pitkänen, 2016)

Kulmaperiaatteen lisäksi suunnattu maasulkusuoja voidaan asettaa I_0SIN - tai I_0COS -periaatteella. Periaate toimii muuten vastaavasti kuin kulmaperiaate, mutta siinä seurataan resistiivisen tai kapasitiivisen komponentin osuutta virrasta virran kulman sijaan. Komponentti saadaan ottamalla nollavirrasta SIN tai COS . I_0SIN -periaatetta käytetään maasta erotetuilla verkoilla ja I_0COS -periaatetta sammutetuilla verkoilla (ABB, b2014). Kuvissa 15 ja 16 on esitelty vastaavat toimintakaraktistikat.



Kuva 15. Sammutetun verkon $I_0\text{COS}$ –periaate, muokattu (ABB, b2014)

$I_0\text{COS}$ -periaatteella suoja voidaan asettaa toimimaan eteen tai taaksepäin. Kuvassa 15 on esitetty molemmat suojaustavat, joista yleensä vain toinen on käytössä. Menetelmän etuna sivuunviritys ei vaikuta suojan toimintaan, kunhan resistiivinen virta on mitattavissa (ABB, b2014). Jos nollavirta kääntyy harmaalle alueelle, suoja ei toimi. Kuva 16 on vastaava maasta erotetulle verkolle.



Kuva 16. Maasta erotetun verkon $I_0\text{SIN}$ -periaate, muokattu (ABB, b2014)

$I_0\text{SIN}$ -periaatteella toimintakarakteristikaa on käännetty 90 astetta vastaamaan maasta erotettua verkkoa. Kuten kulmaperiaatteella, myös virtaperiaatteella voidaan toimintakarakteristikan muutosta ohjata kelan asennon mukaan.

$I_0\sin$ - ja $I_0\cos$ -toiminnoissa toiminta-aluetta voidaan tyypistää äärialueilta, jolloin virhelaukaisujen mahdollisuus pienenee. Tällä voidaan kompensoida virtamuuntajien virhettä. Suojien toiminta-aluetta pienennettäessä on mahdollista, ettei suoja toimi kaikissa vi-oissa. Toiminta-alueen pienentäminen johtaa siihen, että riittävän suurella sivuunvirityk-sellä nollavirta on viallisessa lähdössä tyypistetyn suojausalueen ulkopuolella. (ABB, b2014)

3.3 Wattmetric Po>->

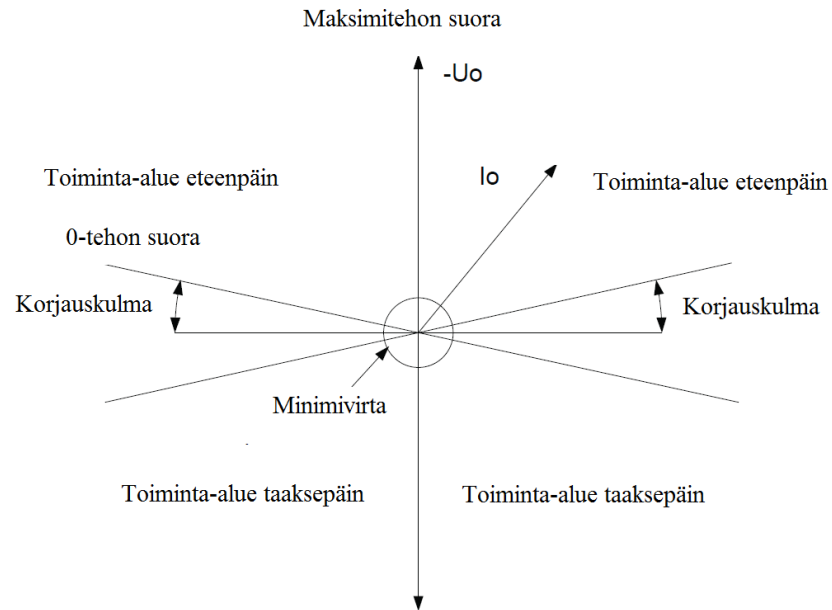
Johtolähtöjen suojaukseen tarkoitettu Wattmetric–menetelmä toimii maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa, joissa sitä voidaan käyttää vaihtoehtona nollavirtaa käyttäville suojuille. Suojaa käytetään yleisesti sammutetuissa verkoissa. Suojan toiminta perustuu nimen mukaisesti maasulkutehon P_0 laskentaan: (ABB, b2014)

$$P_0 = I_0 U_0 \cos\varphi, \quad (10)$$

jossa lasketaan pätöteho nollavirran ja nollajännitteen tulona. Jos teho on yli asetellun, suoja havahtuu ja poistaa viallisen johtolähdön verkosta toiminta-ajan jälkeen. Toiminta-aikana voidaan käyttää vakioaikaa tai erillistä Wattmetric-käänteisaikaa. Suojan toiminta on herkkä mittamuuntajien virheelle, joten virralle tulee asetella minimiarvo, jolla mit-taustulos on luotettava. Vastaavasti nollajännitteelle on minimiarvonsa jonka alapuolella sen mittaus ei ole luotettavaa. (ABB, b2014)

Näiden lisäksi suojan toimintaan vaikuttaa virran ja peruskulman välinen kulma. Jos virta on välillä $-90 - +90$ peruskulmaan nähden, vian suunta on eteenpäin, eli kyseisen releen suojaamalla johtolähdöllä. Jos kulma on suurempi, vika on takanapäin. Nollajännite on aina nollakulmassa. Riippuen siitä käytetäänkö verkkoa sammutettuna vai maasta erotet-tuna, peruskulmaa käännetään maasta erotetun verkon tapauksessa 90 astetta. Tämä joh-tuu siitä, että maasta erotetulla verkolla kapasitiivinen virta on 90 astetta jännitettä edellä. Nollavirran kääntö voidaan toteuttaa ulkoisella ohjaussignaalilla, jolloin karakteristika saadaan toimimaan riippumatta siitä, onko kela verkossa vai ei. Käytettäessä 90 asteen kääntöä, mitattu teho on reaktiivista tehoa. (ABB, b2014)

Mittamuuntajien virhettä voidaan korjata korjauskulmalla, jossa suojan toiminta-aluetta tyypistetään alueilla joissa vian suunta muuttuu. Näin voidaan ehkäistä väärin laukaisujen mahdollisuutta. (ABB, b2014) Pienemmällä toiminta-alueella on riski, että suojaus toimi kaikissa tilanteissa. Kuva 17 havainnollistaa suojan toimintaa.



Kuva 17. Wattmetric-menetelmä, muokattu (ABB, b2014)

Kuvasta 17 nähdään, että suojalle on valittava toimintasuunta eteen- tai taaksepäin. Suojan toiminta-alueeseen vaikuttaa toimintakulma (180 astetta) ja tämän tyypistys. Lohkolle on siis asetettava toimintasuunta, toiminta-aika, peruskulma, I_0 - ja U_0 -minimit, kulman korjaus ja tehon perusarvo sekä haluttu laukaisuteho.

Wattmetric-menetelmän herkkyys riippuu nollajännitteen suuruudesta vian aikana ja terveen verkon vastaavasta jännitteestä. Nollajännitteen minimi on asetettava suuremmaksi kuin mitä terveen tilan jännite voi olla. Toinen herkkyysvaikuttava suure on resistiivisen nollavirran arvo, joka riippuu vikaresistanssista ja verkon koosta. (ABB, b2014)

Taulukkoon 3 on koottu esimerkkiasettelut kaksiportaiselle maasulkusuojaukselle.

Taulukko 3. Wattmetric esimerkkiasettelut

	U_0 (%)	P (%)	Suunta	Toiminta kulma	Toiminta-aika (vakioaika) (s)	Kulman korjaus
Sammutettu 1. Porras	10	1-2	Eteenpäin	180°	1,2	0
Sammutettu 2. Porras	30	4-6	Eteenpäin	180°	0,4	0

Maasta erotetulle verkolle toiminta-alueita on käännettävä 90 astetta vastaamaan verkon kapasitiivista virtaa. Virtamuuntajista johtuvaa virhettä ei ole vähennetty jolloin suojan toiminta-alueita pienennettäisiin tuosta 180 asteesta.

3.4 Admitanssisuojaus

Admitanssisuojausta käytetään maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa maasulkusuojaukseen. Suojausmenetelmässä mitataan poikittaisadmittanssia Y_o .

$$\underline{Y}_o = \frac{I_o}{-U_o}. \quad (11)$$

Kaavasta 11 nähdään, että admitanssi saadaan laskettua summavirran I_o ja nollajännitteen U_o avulla. Suoja käyttää samoja mittauksia, kuin suunnattu maasulkusuojaus. Relesuojauksessa admitanssin yksikkönä käytetään millisiemenssiä (mS). 20 kV verkossa yhden ampeerin virta vastaa noin 0.1 mS admitanssiarvoa. (ABB, 2015)

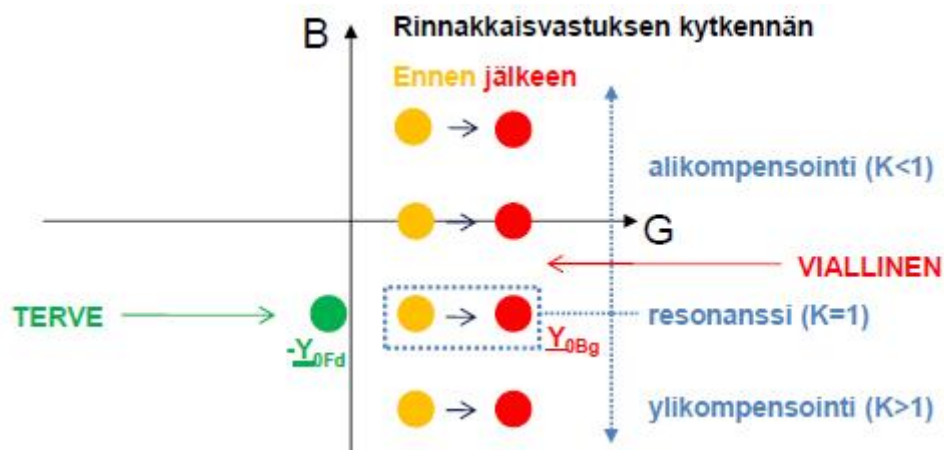
Lähdön resistiivisiä vuotohäviöitä kuvaa konduktanssi G ja johdon maakapasitanssia kuvaa susceptanssi B . Tällöin admittanssi voidaan esittää myös muodossa:

$$\underline{Y}_o = \underline{G} + j\underline{B}. \quad (12)$$

Admitanssisuojaus perustuu admittanssin laskentaan nollajännitteen ja –virran avulla kun rele on havainnut nollajännitteen nousun. Jos admitanssi on sallitun toiminta-alueen ulkopuolella, verkossa on vika. Releelle asetellaan arvot, joiden sisällä terveen johtolähdön admittanssin tulee olla. Jos admittanssi on sallitun toiminta-alueen ulkopuolella, releen suojaamalla johtolähdöllä on vika. (ABB, 2015)

Maasta erotetuissa verkoissa maasulkujen aikana terveet lähdöt mittaavat suojattavan lähdön admittanssin miinusmerkkisenä. Viallinen lähtö mittaa taustaverkon admitanssin positiivisena. Nollavirran reaaliosat ovat hyvin pieniä ja niitä ei välttämättä saada mitattua kuin viallisessa lähdössä, jossa näkyy koko taustaverkon vuotovirta. Virran mittaus vaikuttaa suoraan admittanssin laskentaan. Terveillä lähdöillä nollavirta on negatiivinen ja vialliselle lähdölle positiivinen. Maasta erotetuilla verkoilla viallisen ja terveen johtolähdön erottelu tehdään virran imaginääriosan perusteella, eli kapasitiivisen virran avulla. (ABB, 2015)

Kompensoiduilla, eli sammutetuilla, verkoilla terveen lähdön rele mittaa mitattavan lähdön admittanssin negatiivisena, eli niin sanotusti asemalle päin. Viallisen lähdön rele mittaa taustaverkon admittanssin, jossa on mukana kelan sekä lisäresistanssin admitanssi. Kompensointiasteesta riippuen imaginäärinen osa, susceptanssi, voi olla positiivinen tai negatiivinen. Viallisella lähdöllä konduktanssi on aina positiivinen. Lisävastus kasvattaa mitatun konduktanssin määrää, mitä on selvennetty kuvassa 18. (ABB, 2015)



Kuva 18. Admittanssi sammutetun verkon maasulussa (ABB, 2015)

Kuvasta 18 nähdään, että kompensointiaste vaikuttaa susceptanssin suuntaan, eikä tämän vuoksi voida käyttää suojauksen ehtona. Susceptanssi B on positiivinen alikompensoituna ja negatiivinen ylikompensoituna. Kuvasta voidaan myös huomata, että konduktanssi on positiivinen ainoastaan viallisella johtolähdössä. (ABB, 2015)

Yhdistämällä havainnot maasta erotetusta ja sammutetusta verkosta, admitanssisuojaukselle saadaan universaali toimintakarakteristika, joka pätee silloin kun kela on verkossa ja silloin kun se on irti. Suoja asetellaan suojattavan lähdön admitanssin perusteella sekä riittävien marginaalien kera. Sammutetulla verkolla suoja asetellaan lisävastuksen arvon perusteella. (ABB, 2015) Käytännössä jokaiselle johtolähdölle asetellaan konduktanssin ja susceptanssin avulla laatikko, jonka sisällä terve johtolähtö on. Konduktanssin ja susceptanssin positiiviset reunat asetellaan lähelle nollaa ja negatiiviset reunat asetellaan riittävän suuriksi.

Admittanssimittaus ei vaikutu vikaresistanssista, jolloin kolmiportaisessa suojauksessa voidaan käyttää samoja admitanssikarakteristikan asetteluita kaikissa portaissa. Portaiden herkkyys saadaan U_0 start -asetteluilla ja toiminta-ajoilla. (Wahlroos, 2013)

Admittanssuojauksella voidaan saavuttaa vikavastusmielessä riittävä herkkyys. Herkkyttä rajoittava tekijä on terveen tilan nollajännite. Suojien toiminta pitää asetella riittäväällä marginaalilla terveen tilan nollajännitettä korkeammalle. Admittanssisuojan kanssa pitää käyttää katkeileville maasuluille tarkoitettua suojaa, jolloin suojien oikea toiminta voidaan taata. (Wahlroos, 2013)

Sammutuksen sivuunviritys vaikuttaa terveen- ja vikatilanteen nollajännitteeseen. Admittanssisuojan toiminta havahtuu nollajännitteen noususta, jolloin suojan herkkyys on sivuunvirityksessä tilanteissa huonompi. Sammutetuilla sivuunvirityksillä verkoilla resistanssin kautta tapahtuvissa vioissa nollajännite ei nouse yhtä korkealle, kuin virityksen ollessa lähellä resonanssia. Maasta erotetulla verkolla ilmiö näkyy verkkokoon kasvaessa, jolloin admitanssisuojan herkkyys pienenee. Mikäli useampia admitanssisuojia asetellaan peräkkäin, selektiivisyys saadaan porrastamalla U_0 -arvoja ja toiminta-aikaa (ABB, 2015).

Admittanssisuojan etuja ovat vikaresistanssin suhteen parempi herkkyys ja katkeilevien vikojen aikana terveiden lähtöjen suojien hyvä stabiilisuus. Stabiilisuuden ansioista releiden tekemät väärät laukaisut vähenevät. Lisäksi admittanssisuojauksessa lisävastuksen vaikutus on vakio riippumatta vikavastuksesta. Admittanssisuojauksessa sama karakteristika pätee sekä sammutetulle, että erotetulle verkolle ja suojauksen herkkyys on helppo optimoida, jolloin toiminta on mahdollista ilman kelan rinnakkaisvastusta. (Wahlroos, 2013)

ABB:n uutuus REF 630 releeseen on monitaajuuspohjainen admittanssisuojaus. Lohko havaitsee erityyppiset maasulut ja toimii yksillä asetteluilla. Myös sammutetulle ja maasta erotetulle verkolle käytetään samaa asettelua. Lohkon hyöty saavutetaan erilaisten värähtelyilmiöiden yhteydessä, kun nollasuureissa on paljon yliaaltoja. (ABB, 2016)

Tavallinen admittanssisuoja mittaa vain nimellistaajuuden admittanssia. Monitaajuus-lohkon toiminta perustuu nimen mukaisesti 2., 3., 5., 7., ja 9. harmonisen yliaallon admittanssin mittaamiseen perustaajuuden lisäksi. Näiden eri taajuuksien admittansseista muodostetaan summia, jota käytetään suojauskarakteristikassa. Monia taajuuksia mittaamalla havaitaan erilaiset transientit, jolloin suoja toimii myös katkeilevia vikoja vastaan (ABB, 2014). Suojan toiminta perustuu nollajännitteen nousuun, kuten monien muiden maasulkusuojalohkojen toiminta (ABB Oy, 2014).

3.5 Katkeilevan maasulun suojaus

Katkeileva maasulku on sarja kaapelin eristyksen pettämisistä. Tyypillinen katkeileva maasulku syntyy, kun kaapelin eristyksen jännitelujuus heikkenee materiaalin ikääntymisen ja sähkökentän aiheuttaman rasituksen seurauksena. Mahdolliset mekaaniset rasitukset ja epäpuhtaudet eristeessä nopeuttavat eristeen kulumista. Jossain vaiheessa heikentynyt eriste pettää ja jännite lyö läpi. Katkeilevalle vialle on tyypillistä, että läpilyönti sammuu itsestään luonnollisessa nollakohdassa ja saattaa syttyä uudestaan muutamaa jaksoa myöhemmin. Tämä aiheuttaa nollavirran suuren epäsäännöllisyyden ja piikikkään verhoikäyrän. Läpilyönnin sammuttua, viallisen vaiheen jännite palautuu normaaliksi sekä nollajännite pienenee normaaliin arvoonsa. Useiden peräkkäisten piikkien seurauksena nollajännite säilyy pitkään korkealla. Nollajännitteen muutokset ovat tasaisempia kuin virran tekemät piikit. (Altonen, et al., 2005) Kaikissa sammutetun verkon vikatyypeissä esiintyy katkeilevaa maasulkua riippumatta siitä, onko verkko toteutettu avojohdoilla vai maakaapeloinnilla (Kauppinen, 2017).

Kaapelin eristyksen pettäessä vaihejännite osuu yhteen maan kanssa, jolloin vikaantuneen vaiheen kapasitanssiin varautunut energia purkautuu. Viallisen vaiheen jännitteiden pienentyessä terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat. Jännitteen kasvun myötä terveisiin vaiheisiin varautuu enemmän energiaa. Energian muutokset aiheuttavat varaus- ja purkaustransientit, jotka näkyvät viallista johtoa syöttävällä releellä. Transientit ovat luonteeltaan erilaisia. Purkaustransientti on hyvin jyrkkä ja varaustransientti loivempi. Nämä

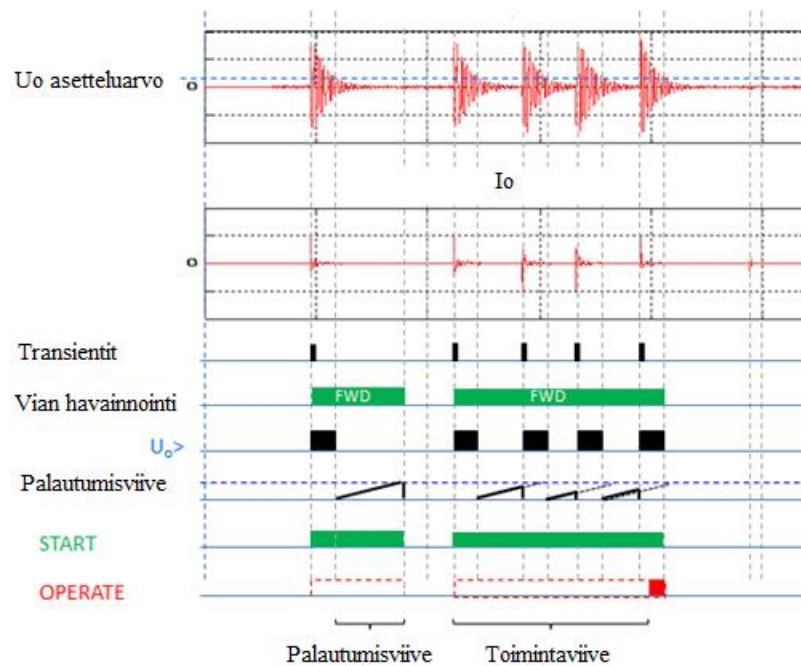
transientit näkyvät myös terveissä johdoissa. Terveiden johtojen vikaantunutta johdinta vastaavassa vaiheessa näkyy varauksen purkaus ja terveissä vaiheissa varauksen kasvu. Terveissä johdoissa nollavirtana nähdään transienttien summa, jossa on terveiden johtimien varaustransientit ja vikaantuneen vaiheen purkaustransientti. Viallisen johdon viallisen vaiheen transientti on terveiden johtojen vikaantunutta vaihetta vastaavien johtimien transienttien summa. Transienttien taajuus on tyypillisesti 200 – 1000 Hz ja purkaustransientin taajuus on tyypillisesti 2 – 20 kertainen varaustransientteihin nähden. (Altonen, et al., 2005)

Katkeileva maasulku on perinteisten suojareleiden toiminnan kannalta haastava, johtuen nollavirran suuresta epäsäännöllisyydestä. Virran epäsäännöllisyys aiheuttaa maasulun suuntareleiden toimimattomuuden, kun taas aseman varasuojana toimiva nollajännitteen ylijännirele havahtuu ja tekee koko aseman jännitteettömäksi. (Altonen, et al., 2005) Katkeileviin maasulkuihin vaikuttaa maadoitusresistanssi vikapaikassa, vikavastus ja vian sijainti. Katkeilevat maasulut vaimenevat kaapeliverkossa riippuen vikapaikan etäisyydestä sähköasemaan. Vaimeneminen on kaapeliverkoilla voimakkaampaa kuin avojohdoverkoilla, koska kaapelin nollapiirin resistanssi on suurempi kuin vastaavan avojohdon. Vaimeneminen vaikeuttaa transienttipohjaisten suojalohkojen toimintaa. (Wahlroos, b2016) Suurimmat ongelmat katkeilevien maasulkujen yhteydessä ovat varasuojan turhat laukaisut (Kauppinen, 2017).

Perinteiset maasulkureleet on suunniteltu toimimaan 50 Hz taajuudella toimivien suureiden kanssa. Suuritaajuiset ja nopeat virrat eivät ole tavallisten suojauslohkojen ymmärrettävissä. Katkeilevilla vioilla perinteisen suojauksen toimivuus riippuu releen analogiasignaalin suodatuksesta, mittaustaajuudesta ja lyhyimmästä ”start” –ajasta. Katkeilevassa maasulussa nollavirran ja jännitteen välinen kulma voi heilahdella ja muuttua nopeasti. Tämän seurauksena, jos virta käy laukaisualueella, terveiden lähtöjen suojaus voi toimia tarpeettomasti. (Altonen, et al., 2005)

Tavallisen maasulkusuojauksen huonosta toimivuudesta johtuen katkeilevien vikojen tapauksessa tarvitaan erillinen katkeilevan vian suoja. ABB:n Relion 630 -releissä katkeilevan maasulun suoja on lohkoissa INTRPTEF. Lohko on tarkoitettu transientti- ja pieniohmisten katkeilevien maasulkujen selektiiviseen havainnointiin ja suojaukseen. Lohkon toimintasuunta voidaan määritellä suuntaamattomaksi sekä eteen-, että taaksepäin. Suunta paikannetaan nollavirran ja nollajännitteen avulla. Katkeilevan maasulun suoja voidaan asetella relettä kohti vain yksi ja lohko on aina vakioaikainen. Lohko voidaan asetella kahdella eri tavalla: Transient EF ja Intermittent EF. Näiden aseteluiden erona Transient EF seuraa nollajännitettä katkeilevan piikin jälkeen, kun taas Intermittent EF seuraa piikkien määrää. Molempien suojien rinnalla on käytettävä myös normaalia maasulkusuojausta. (ABB Oy, a2014)

Transient EF –lohkolle asetellaan nollajännite, suunta ja alkutransientti. Jos nämä kolme aseteltua suuretta täyttyvät, rele havahtuu ja aloittaa laskemisen (START). Jos nollajännite säilyy asetellun toimintaviive-ajan (Operate delay time) yli asetteluarvon, rele tekee laukaisun (TRIP). Laukaisun seurauksena rele voi antaa hälytyksen tai avata katkaisijan. Mikäli U_0 -jännite laskee asetteluarvoa pienemmäksi, rele käynnistää palautumisviiveen (Reset delay time). Jos palautumisviive kuluu loppuun, eikä nollajännite nouse enää asetteluarvon yläpuolelle, releen laskeminen (START) poistuu ja toiminta-aikalaskuri päättyy. Palautumisviiveen avulla mahdollistetaan toiminta-aikalaskurin toiminnan jatkuminen, jos nollajännite nousee palautumisviiveen aikana yli asetteluarvon. (ABB Oy, a2014) Laskurien toiminta-mallit on esitetty kuvissa 19 ja 20.

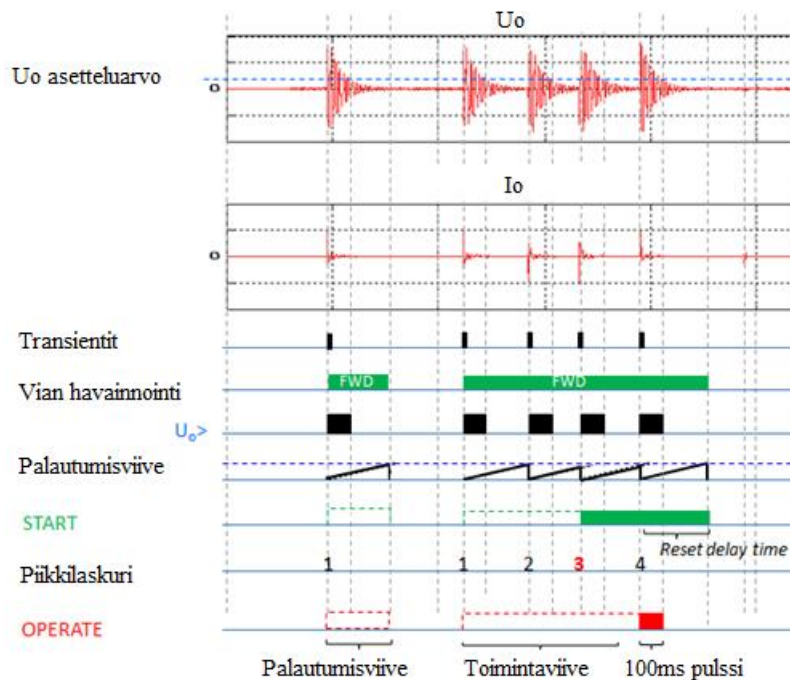


Kuva 19. Katkeilevan maasulun Transient EF-suojan toiminta (ABB Oy, a2014)

Kuvasta 19 nähdään, että nollajännitteen noustessa ensimmäisen kerran, START käynnistyy. Tämän jälkeen U_0 laskee, jolloin palautumisviiveen laskuri käynnistyy. Toista piikkiä ei enää esiinny, joten laskurin käytyä loppuun START poistuu. Toisen piikin jälkeen toimintaviiveen laskuri käynnistyy ja koska piikkejä tulee niin tiuhaan, ettei palautumisviive ehdi kulua loppuun, rele tekee TRIP:n toimintaviiveen kuluttua loppuun.

Intermittent EF –toimintatavalla rele laskee transientteja ja START aktivoituu kun transientteja on tullut aseteltu määrä ja transienttien suunta on valitun suuntainen. U_0 -jännitteen suuruus ei vaikuta suojauslohkoon. Toimintaviivelaskuri käynnistyy ensimmäisen transientin kohdalla ja laskurin aikana on tultava vähintään valittu määrä transientteja. Laskurin käytyä loppuun rele antaa TRIP-käskyn seuraavasta transientista. Jokainen piikki käynnistää palautumisviiveen laskurin. Palautumisviivelaskurin käytyä loppuun rele lopettaa piikkien laskemisen ja seuraavan piikin kohdalla aloittaa jälleen alusta. Tämä

tapahtuu riippumatta siitä, missä vaiheessa toimintaviivelaskuri on. Piikkien välinen aika saa olla korkeintaan palautumisviiveen suuruinen. Intermittent-lohkossa on mahdollista lukita rele jos se havaitsee aseteltuun toimintasuuntaansa nähden vääräsuuntaisen transientin, eli jos vika on jossain muussa johtolähdössä. Lukitus tapahtuu aikaperusteisesti ja tätä aikaa kutsutaan lukitusajaksi (*Block EF reset time*). Lukitusajan aikana katkeilevan maasulun lohko ei havaitse vikoja. (ABB Oy, a2014) Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu Intermittent EF -lohkon toimintaa.



Kuva 20. Katkeilevan maasulun Intermittent-suojan toiminta (ABB Oy, a2014)

Kuten kuvasta 20 nähdään, Intermittent-lohko toimii yksittäisten piikkien kohdalla samoin kuin Transient EF -lohko. Suoja havahtuu piikkiin, mutta koska palautumisviive ehtii kulua, suoja ei laukea. Seuraavan piikin käynnistämän toimintaviiveen aikana tulee kolme piikkiä, jolloin toimintaviiveen jälkeen seuraavasta piikistä tulee laukaisu (*TRIP*).

Kokemusperäisesti on opittu, että katkeilevan maasulun suojien on oltava käytössä ennen verkon muuttamista sammutetuksi (Kauppinen, 2017). Esimerkkiasettelut katkeilevalle suojaukselle on esitetty luvussa 4.

3.6 Varasuojat

Maasulku ilmenee aina nollajännitteen nousuna saman päämuuntajan alueella. Jännitteen nousu on sama koko päämuuntajan syöttämän alueen sisällä. Sähköasemilla voidaan käyttää maasulkujen varasuojana U_0 -jännitteeseen perustuvaa ylijännitesuojaa. Ylijännitesuoja mittaa verkon nollajännitettä ja nollajännitteen noustessa asetteluarvoa suuremmaksi, varasuoja toimii ja avaa päämuuntajan katkaisijan. Selektiivisyys varsinaisten

maasulkusuojiin suhteen toteutetaan aikaporrastuksella. Mikäli minkään johtolähdön suojaus ei poista vikaantunutta osaa verkosta, varasuojat toimii pudottaen kyseisen päämuuntajan verkosta. (ABB, 2000)

Standardi SFS 6001 vaatii kahdenkertaisen maasulkusuojaus, joka on Jyväskylän Energiassa toteutettu erillisellä Trench Earth fault detection device (EFD) -laitteistolla. EFD pystyy havaitsemaan ja laukaisemaan tavallisten maasulkujen lisäksi katkeilevia sekä suuriresistanssisia maasulkuja. Laite havaitsee maasulut admitanssi- ja Wattmetric-menetelmillä, sekä katkeilevat viat transienttimenetelmällä. (Maviko, 2016) Laite on samalta toimittajalta kuin sammutuskelojen säätäjä ja toimii releiden rinnalla täysin omana yksikönään. Kaikki laitteen laskentamenetelmät eivät ole käytössä laukaisevina, vaan osa aiheuttaa hälytyksen. EFD:n lisäksi JE:llä on käytössä kiskokohtaiset U_0 -ylijännitesuojat, jotka suojaavat kiskostovaurioita vastaan.

Useampiportaisella nollajännitesuojalla voidaan toteuttaa selektiivinen syöttöhaaran ja kiskoston suojaus. Tällöin alin portas hälyttää ja ylemmät portaat laukaisevat. Usealla portaalla varasuojaus voidaan toteuttaa moniportaisesti niin, että nollajännitteen nousua lähtöä karsitaan kriittisyyden mukaan pois. Näin toimimalla vian vaikutusalue jää mahdollisimman pieneksi. Mikäli kaikki johtolähdöt on karsittu pois ja nollajännite jää korkeaksi, on ilmeistä, että vika on sähköaseman kiskostossa ja kiskosto otetaan jännitteettömäksi päämuuntajan katkaisijalla. (ABB, 2000)

4. JE-SIIRTO OY:N SÄHKÖVERKKO JA SEN SUOJAUSASETTELUT

Tässä luvussa käsitellään Jyväskylän Energian sähköverkkoa, vianhoitoa ja johtolähtöjen maasulkusuojausten toteutusta. JE-Siirto vastaa sähkön jakelusta Jyväskylän kantakaupungin alueella ja on Jyväskylän Energian omistama tytäryhtiö. Jyväskylän Energia tuottaa vettä, sähköä ja kaukolämpöä Jyväskylässä ja on täysin Jyväskylän kaupungin omistama osakeyhtiö. (JE-Siirto, b2016)

JE-Siirron vuosittainen liikevaihto on noin 18 M€ ja vuosittaiset verkkoinvestoinnit ovat noin 3,6 M€. Sähkönkäyttöpaikkoja on 52 000 ja vuosittain siirretty energia on noin 630 GWh. Sähköverkon pituus on 1300 km josta 20 kv verkkoa on 376 km. Keski-jänniteverkon kaapelointiaste on 85 %. Keski-jänniteverkon keskeytyksiä on vuosittain noin 18, joista 40 % on lyhyitä keskeytyksiä, jotka poistuvat ilman kytkentätoimenpiteitä ja loput 60 % ovat pysyviä keskeytyksiä. (JE-Siirto, b2016)

Päämuuntajia on 10 kpl ja näiden yhteenlaskettu nimellisteho on 270 MW. (JE-Siirto, c2016) Kapasitiivista maasulkuvirtaa on 1200 A ja tästä syystä verkkoa käytetään sammutettuna. Taulukkoon 4 on koottu sammutuskelojen koot ja verkon koko elokuussa 2016.

Taulukko 4. JE-Siirto OY:n kapasitiivisen verkon koko päämuuntajittain (JE-Siirto, a2016)

	I_c (A)	I_v (A)	I_d (A)	I_{kok} (A)
KJO PT1	172,4	-3,6	6,4	7,3
KJO PT2	148,2	-3,0	6,7	7,3
KJO PT3	172,4	-3,6	6,4	7,3
TOU PT1	80,8	-2,0	2,3	3,0
TOU PT2	77,0	-2,1	2,3	3,1
HML PT1	92,0	-3,1	7,7	8,3
HML PT2	69,0	-2,6	5,9	6,4
KG V PT1	102,0	-1,6	7,2	7,4
KG V PT2	195,0	-1,0	10,2	10,2
EPI PT1	97,0	-3,4	6,1	7,0
SAV L1	43,0	-3,6	6,4	7,3
SAV L2	45,0	-3,0	6,7	7,3

Yllä olevassa taulukossa I_c on verkon kapasitiivinen koko, I_v on verkon sivuunviritys, I_d verkon resistiivinen maasulkuvirta ja I_{kok} verkon maasulkuvirta. Arvot on saatu EFD-laitteelta, jonka jälkeen I_{kok} on laskettu laskemalla sivuunvirityksen ja resistiivisen virran

neliöllinen summa. Tourulan asemalla lisävastus ei ollut mittaushetkelle kytkettynä. Tästä syystä maasulkuvirrat ovat selkeästi pienemmät kuin muualla verkossa.

Verkon rungon muodostaa viisi sähköasemaa ja kolme keskijänniteverkon kytkinasemaa. Näitä kolmea kytkinasemaa syötetään tilanteesta riippuen joko Keljosta tai Tourulasta, mutta myös Kangasvuoresta syöttäminen on mahdollista. Asemien välillä on varayhteydet 20 kV johtoina, jolloin sähköasemaa voidaan syöttää myös toisen aseman päämuuntajalla. Tässä kaapeleiden tehonkestoja suurempi rajoittava tekijä on maasulkuvirran kompensointi. (Kauppinen, 2016)

Päämuuntajien kytkentäryhmä on tähti-tähti, jolloin sammutuskelan tarvitsema tähtipiste löytyy muuntajasta itsestään. Tällöin ei tarvita erillisiä tähtipistemuuntajia, mutta sammutuskela on käytössä vain jos päämuuntaja on verkossa. Tästä syystä asemien korvauksessa on oltava tarkkana juuri kelojen riittävyyden suhteen, vaikka siirtoyhteyksien tehonkeston puolesta asemien korvaus onnistuisi. (Kauppinen, 2016)

JE:n sähköverkko tulee muuttumaan lähivuosina, kun kytkinasemia saneerataan sähköasemiksi ja sammutuskeloille rakennetaan erilliset tähtipistemuuntajat, jolloin verkon varasyöttömahdollisuudet paranevat. Sammutuskelojen muutokset on tehtävä 110 kV verkossa tapahtuvien kytkentäilmöiden aiheuttaman värähtelyilmön poistamiseksi. Värähtely nostaa 20 kV verkossa nollajännitettä ja aiheuttaa maasulun varasuojan toimimisen. (Kauppinen, 2017)

4.1 Vianhoito Jyväskylän Energian sähköverkossa

Keskijänniteverkon keskeytyksiä on kaapeloidulla kaupunkialueella vuositasolla hyvin vähän. Nykyään KJ-sähköverkon vikatapauksissa vika etsitään käyttämällä apuna verkostoon asennettuja kaukokäytettäviä erottimia, vianilmaisimia, käyttöhenkilökunnan asiantuntemusta sekä asiakkaiden ja urakoitsijoiden yhteydenottoja.

Oikosulkuvioista DMS osaa laskea mahdolliset vikapaikat kyseiselle oikosulkuvirralle, joita käytetään vianhoidon tukena.

Riippuen vian luonteesta ja vikaantuneen johtolähdön rakenteesta käyttökeskuspäivystäjä voi tehdä lähdön lauettua käsin aikajälleenkytkennän ohjaamalla katkaisija kiinni. Aikajälleenkytkentöjä tehdään maasulkuvikojen tapauksessa sellaisille johtolähdöille, joiden varrella on ilmajohtoja. Kokemus on osoittanut, etteivät kaapeliverkon maasulut ole ohi meneviä, vaan verkossa on lähes aina pysyvä vika. Lisäksi, koska kaapeliverkossa kaihinkoneet ovat yksi suuri maasulkujen aiheuttaja, halutaan välttää tilanteita, joissa kuluttajat, kaivinkoneen kuljettaja tai lapiomies altistuu kosketusjännitteelle maasulun aikana.

Verkossa ei tehdä aikajälleenkytkentöjä oikosulkuvioille niiden aiheuttamien jännitekuoppien sekä komponentteja kuormittavan luonteen takia.

Sammutuskelan säädölle on valittu 3 minuutin säätöviive. Tästä viiveestä johtuen verkolle voidaan tehdä yleensä yksi aikajälleenkytkentä. Kokeilukytkennän jälkeen kela ehtii säätää itsensä uuteen arvoon, joten toisen kokeilukytkennän kohdalla sammutus on vikaantuneen johtolähdön verran sivuunviritytty. Sivuuunviritys aiheuttaa jopa 50 A suuremman maasulkuvirran, kuin on alkuperäisen vian tai ensimmäisen kokeilukytkennän aikana.

Pysyvät viat haarukoidaan kokeilukytkennöillä noin kilometrin pätkissä sähköasemalta aloittaen. Verkon kytkentämuutosten välillä odotetaan, että sammutuskela ehtii säätää itsensä vastaamaan uutta verkkoa. Kun vika haarukoidaan riittävän lyhyissä pätkissä, maasulkuvirta ei kasva niin suureksi, että se voisi aiheuttaa vaarallisia kosketusjännitteitä.

Lisäapua haarukointiin saadaan tutkimalla, onko kyseisen johtolähdön varrella olevat vianpaikantimet havahtuneet. Vianpaikantimina käytetään pääsääntöisesti Horstmann Compass B –ilmaisimia. DMS:n tarjoama tieto johtotyypeistä sekä käyttöhenkilökunnan hyvä verkoston tuntemus helpottavat vianhoitoa. Tuulisella säällä viat sattuvat usein avojohtojen varsille, ja mikäli ilmeistä vikapaikkaa ei ole, vikapaikka etsitään usein aloittamalla tunnetuista vikaherkistä kaapelipäätteistä tai eristimistä.

Asiakkaiden soitot helpottavat vikojen paikannusta. Usein kaivinkoneurakoitsijat ilmoittavat itse osuneensa kaapeliin, jolloin vikapaikka saadaan selvitettyä nopeasti, vikaantunut pätkä erotettua verkosta ja sähköt palautettua asiakkaille.

4.2 Suojasasettelut

Jyväskylän Energialla on käytössä kolmenlaisia releitä keskijänniteverkon johtolähtöjen maasulkusuojauksessa:

- ABB Relion 630 (REF 630)
- ABB Relion 543 (REF 543)
- ABB Spacom

Käytetty rele riippuu pääasiassa aseman iästä. Viime vuosina asemille on päivitetty uusia REF 630 -releitä.

Koko Jyväskylän Energian keskijänniteverkkoa käytetään sammutettuna. Maasulkusuojauksen toimivuuden takaamiseksi kuristimien rinnalla on lisävastukset. Lisävastuksien ohjaus on toteutettu Jyväskylän Energialla niin, että lisävastukset ovat aina verkossa. Vian sattuessa lisävastukset kytkeytyvät hetkeksi pois ja tämän jälkeen kytkeytyvät takaisin verkkoon. Kaikkien päämuuntajien yhteydessä olevilla keloilla on lisävastus kytkettynä. Savelan kytkinasemalla on sammutuskelat, joissa ei ole lisävastus päällä, koska lisävastus on aina syöttävän päämuuntajan kelan yhteydessä.

Lisävastukset lisäävät 4 A resistiivistä maasulkuvirtaa. Neljän ampeerin vastuksia käytetään, koska admitanssisuojat on aseteltu toimimaan 3 A resistiivisellä maasulkuvirralla.

Tarkempaan tarkasteluun on valittu Eteläportin asema, koska siellä tullaan tekemään maasulkukokeita tämän työn yhteydessä. Eteläportin asemalla lisävastusta ohjataan niin, että jos vian aikana nollajännite on yli 20 %, kytkeytyy lisävastus pois 0,2 s kuluttua vian alkamisesta. Maasulkusuojaus on aseteltu 2 A herkkyteen, koska normaalilla 100 A taustaverkolla verkon vuotohäviöt ovat niin suuret, että maasulkusuojaus toimii ilman lisäresistanssia.

Lisävastusten ohjaus tullaan tulevaisuudessa toteuttamaan niin, että jos verkossa on itsessään vähintään 12 A resistiivistä nollavirtaa, lisävastus kytkeytyy pois pudottaen resistiivisen virran kahdeksaan ampeeriin. Lisävastus kytkeytyy takaisin päälle, jos resistiivinen virta tippuu alle kuuden ampeerin. Näin saadaan pienennettyä maasulkuvirtaa ja kosketusjännitteitä kuitenkin vaarantamatta maasulkusuojauksen selektiivisyyttä. Ohjaustapa ei myöskään vaikuta maasulkusuojauksen herkkyteen, koska admitanssisuojan toiminta ei vaikuta vikavastuksesta. (Kauppinen, 2017)

Jyväskylän Energialla käytetään maasulkusuojauksen mitoitusperusteena suoraan Utp:n taulukkoarvoja ilman kertoimia. Maasulkusuojauksen on suorissa maasuluissa havahduttava 0,4 sekunnissa, tämän lisäksi suojaukseen tulee katkaisijan toiminnasta noin 50 ms viive. Syy tähän on puhtaasti henkilöturvallisuuteen liittyvä. Pienillä lapsilla sydämen lyöntitiheys on 100 – 125 lyöntiä / min, jolloin lyöntien välinen aika on 0,48 s – 0,6 s. (Jalanko, 2017) Jännitteen ollessa korkeintaan 230 V, sydämen läpi kulkeva sähkövirta ei aiheuta hengenvaarallista kammiovärinää, jos virran kesto-aika on lyhyempi kuin sydänjakson pituus. Sähkövirran kulkiessa sydämen läpi useamman sydänjakson ajan, kammiovärinään on suurempi todennäköisyys. 0,4 s suojausaikaan on päädytty, koska maasulkujen ei ole havaittu poistuvan tai sammuvan pidemmällä ajoilla. Valitun 0,4 s suojausajan on todettu riittävän maasulun sammumiselle itsestään, jos maasulku on sammuakseen.

Ihmiskehon impedanssi pienenee jännitteen noustessa yli 230 V. Tällöin vikatilanteessa ihmisen läpi kulkeva sähkövirta kasvaa ja muuttuu nopeasti hengenvaaralliseksi. (SESKO RY, 2015) Ihmisen läpi kulkevan virran kasvaessa yli 200 mA, virran kesto-aikaa lyhentämällä ei voida estää sydämen kammiovärinää.

Jyväskylän Energian verkossa normaaleilla käyttötilanteilla maasulkuvirtaa on korkeintaan 12 A. Tällöin resistiivistä maasulkuvirtaa on korkeimmillaan 11 A ja kapasitiivista virtaa 4 A. Muuntajien resaltoiva maadoitusimpedanssi on 10 Ω. Tästä voidaan laskea maadoitusjännite:

$$12 \text{ A} \cdot 10 \text{ } \Omega = 120 \text{ V}.$$

Maasulkutilanteessa maadoitusjännite on 120 V, joka on U_{tp} käyrän sisäpuolella käytettyllä 0,4 s laukaisuajalla. Muuntajien resuloiva maadoitusimpedanssi sallii sen, että maasulkuvirta voi olla korkeintaan:

$$\frac{230 \text{ V}}{10 \Omega} = 23 \text{ A.}$$

Laskettu 23 A virtaa vastaa 11 A resistiivistä ja 20 A kapasitiivista virtaa. Sivuunviritys voi olla korkeintaan 20 A, joka on otettava huomioon tehdessä maasulkujen aikaisia kokeilukytkentöjä. Verkko on normaalisti 4 A alikompensoitu, joten kerralla lisättävän verkon koko voi olla korkeintaan 16 A, eli 4 km maakaapelia. Käytännössä yhdellä kytkennällä lisättävän maakaapelin määrä saa olla korkeintaan 2 km, jotta pysytään verkon käytölle asetettujen turvallisten käyttöarvojen rajoissa myös poikkeavien kytkentätilanteiden aikana. Kokeilukytkentöjen kytkentöjen välillä on kelan annettava säätää aseteltuun 4 A viritysteeseen.

Välillä toinen sähköaseman päämuuntajista on otettava pois verkosta huoltotoimenpiteiden ajaksi. Tällöin verkon resistiivinen virta kasvaa huomattavasti ja suurimmillaan se on 20 A. Tällöin verkko ei saa olla yhtään normaalia 4 A enempää sivuunviritetty, että pysyttään turvallisen käytön rajoissa. Tämän takia muuntopiirien resuloiva maadoitusimpedanssi olisi hyvä saada noin 6 Ω tasoon, jolloin verkon käyttö olisi varmasti turvallista kaikkien poikkeavien kytkentätilanteiden aikana.

4.2.1 Relion 630-releiden maasulkusuojausasettelut

ABB:n valmistamat Relion sarjan 630-releet ovat käytössä Hämeenlahden ja Kangasvuoren sähköasemilla sekä Savelan kytkinasemalla. Asemilla on käytössä kolmiportainen ylivirtasuojaus, sekä ensisijaisena maasulkusuojana releen admitanssilohko. Nollajännite, suunnattu nollavirta ja suuntaamaton nollavirta toimivat varasuojina maasuluissa. Releissä on käytössä myös muita suojauslohkoja, joita ei käsitellä tämän työn yhteydessä. Toisena maasulun varasuojana käytetään EFD-laitteita. Seuraaviin taulukoihin on koottu keskeiset suojausasettelut ja niiden käyttötarkoitukset. Taulukossa 5 on admitanssisuojausasettelut.

Taulukko 5. Relion 630 -releen admitanssisuojausasettelut

Admitanssi	Aika (s)	Toiminta-tapa	Suunta	Uo (%)	G eteen (S)	G taakse (S)	B eteen (S)	B taaksepäin (S)	G °	B °
1. Porras	0.9	Go, Bo	suuntaamaton	0.09	0.26	-8	0.09	-8	0	0
2. Porras	0.7	Go, Bo	suuntaamaton	0.25	0.26	-8	0.09	-8	0	0
3. Porras	0.4	Go, Bo	suuntaamaton	0.45	0.26	-8	0.09	-8	0	0

Admitanssisuojaus on aseteltu kolmiportaisena, jossa kaikki kolme porrasta suojaavat johtolähtöä. Suojausasettelut on esitelty taulukossa 5. Suojaus on aseteltu laatikkokarakteristikan mukaan (*Go*, *Bo*), jossa kaikkien kolmen portaan laatikko on samankokoinen. Laatikolle on määritelty rajat susceptanssin ja konduktanssin suhteen. Eri portaiden erot

on saatu nollajännitteen avulla. Nollajännitteen noustessa korkealle, suoja toimii nopeammin kuin nollajännitteen noustessa vain vähän. Käytössä on siis käänteisaika-admitanssisuoja.

Admitanssisuojauksen lisäksi releille on aseteltuina suuntaamattomat ja suunnatut Io-suojat. Suuntaamattomia Io-suojia käytetään, koska ne toimivat ilman nollajännitettä. Suojia ei ole aseteltu kovin herkiksi, mutta ne voivat toimia jos sammutuskuristin on jostain syystä irronnut verkosta. Ajatuksena on ollut, että jos verkossa kulkee suuria nollavirtoja, ne ovat varmasti ei-toivottuja ja tällöin suojauksen on syytä toimia. Suunnattu maasulkusuoja käyttää rengasvirtamuuntajaa, joka on aseteltu toimimaan 80 asteen asetteluilla. Suojaa on aseteltu admitanssisuojan varalle. Asettelut näille suojauslohkoille on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Io ja Iodir asetellut Jyväskylän Energialla

	EFLTOC I0>	EFLTOC I0>>	DEFLPDEF1 I0DIR>	DEFLPDEF2 I0DIR>>
Aika	2,5	0,25	1	1,5
Summavirtamuuntaja	150	150	150	150
Virtamuuntaja	200	200	200	200
Virta(IN)	0,33	1,5	min 0,005	min 0,005
Suunta	Suuntaamaton	Suuntaamaton	Eteenpäin	Taaksepäin
Mittaus	DFT	DFT	DFT	DFT
Aika	vakio-aika	vakio-aika	käänteinen IEC ext. Inv.	vakioaika IEC def time
resetointi	välitön	välitön	välitön	välitön
Toimintamoodi	-	-	Kulma 80 astetta	Kulma 80 astetta
Kulma		-	-90°	-90°

Katkeileva maasulkusuojaus toimii Intermittant EF –toimintamoodilla, jossa piikkimääräksi on aseteltu 3 piikkiä, resetointiajaksi 0,3 s ja toiminta-ajaksi 0,8 s.

Maasulkusuojien lisäksi releellä on suojauskäytössä ylivirtasuojaus ja kytkentävirtasysäys. Erovirtasuojaa ja virran epäsymmetriasuojaa käytetään häiriötallenteiden liipaisussa.

Releen asetteluissa on käyttövarmuusmielessä tietty epäloogisuus, kun kaikki suojauslohkot käyttävät rengasvirtamuuntajaa. Varasuojana käytetty suunnattu Io-suoja voitaisiin asetella käyttämään vaihevirtojen summakytKentää, jolloin kaikki maasulkusuojaukset eivät olisi riippuvaisia rengasvirtamuuntajan toiminnasta. Lisäksi kaapelipääte saataisiin suojattua.

4.2.2 Relion 543-releiden maasulkusuojausasettelut

ABB:n Relion 543 -releet ovat käytössä Kirkkopuiston, Eteläportin, Tourulan ja Nisulan asemilla. Asemien maasulkusuojaus on toteutettu suunnatun maasulkusuojan avulla, jossa on käytetty I₀COS-asetteluja. Suojat on aseteltu toimimaan eteenpäin, eli suojaamaan johtolähtöä. Releet on aseteltu sekä maasta erotetulle, että sammutetulle verkolle ja

näitä asetteluita ohjataan kelan asennolla. Sammutetun verkon alemman portaan maasulkusuoja on aseteltu toimimaan 2 A resitiivisellä virralla silloin, kun nolajännite on yli 10 %. Ylempi porttas on aseteltu toimimaan kun resitiivinen virta ylittää 40 A ja nolajännite on yli 10 %. Ylemmän suojausportaan vaativia tilanteita ei käytännössä esiinny verkossa. Kakasoimaasululla ylemmän suojausportaan vaativien tilanteiden esiintyminen on kuitenkin mahdollista. Tarkemmat asetellut on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Relion 543 -releen maasulkusuojasasetellut

Maasulku	DEF2LOW 2	DEF2LOW 1	DEF2HIGH 2	DEF2HIGH 1
Toiminta-aika (s)	0.4	0.3	0.1	0.1
Summavirtamuuntaja (A)	100	100	100	100
Sensori (A)	240	240	240	240
Virta (Io)	2 %	6 %	40 %	40 %
Suunta	Eteenpäin	Eteenpäin	Eteenpäin	Eteenpäin
Jännite % * Uo	10	5	10	5
Toimintakriteeri	Iosin/locos & Uo	Iosin/locos & Uo	Iosin/locos & Uo	Iosin/locos & Uo
Toimintakarak.	locos	Iosin	locos	Iosin
Vaihekulman korjaus (°)	2	2	2	2

Asemalla on lisäksi käytössä katkeilevan maasulun suoja. Suojan palautumisajaksi on aseteltu 0,3 s ja toiminta-aika on 0,4 s, johon tulee vielä lisäksi seuraavasta piikistä tuleva viive. Suoja toimii siis hitaimmillaan 0,7 s viiveellä. Lisäksi käytössä on erovirtasuoja.

4.2.3 Muut asemat

Keljon sähköasemalla yhdessä hallissa on vielä käytössä Spacom-releet. Asema saneerataan lähivuosina ja asemalle asennetaan uudet releet. Aseman releisiin on jälkikäteen asennettu katkeilevan maasulun suojakortit 2D26. (Kauppinen, 2017) Aseman suojausasettelua ei käsitellä tarkemmin.

5. HÄIRIÖTALLENTIMET

Oikosulkuvikoja paikannetaan johtimien impedanssiin perustuvalla laskennalla, jonka avulla voidaan selvittää kaikki verkon varrella olevat mahdolliset vikapaikat. Maasulkujen paikannukseen ei kuitenkaan ole käytettävissä laskennallisia menetelmiä. Monet DMS toimittajat eivät tarjoa maasulkuvikojen paikannusominaisuutta. (Kauppi, 2014) Reletoimittajilta on saatavilla suojareleisiin maasulkuja paikantava lohko (ABB, b2014).

Tehokas vianpaikannus sähkönjakeluverkossa on tärkeää, koska Energiaviraston asettamat verkkoyhtiön sallitut tuotot ja asiakkaalle maksettavat korvaukset riippuvat vikojen määrän lisäksi vikojen kestosta. Laskennallisella vianpaikannuksella voidaan vähentää tarvittavien kokeilukytkentöjen määrää. (Kauppi, 2014)

JE-Siirrolla oli ongelma, kun sähköasemilla maasulun U_0 -varasuojat toimi ilman merkittävää syytä. Vika löydettiin häiriötallennuksilla, joilla nähtiin nollajännitteen nousevan varasuojan toimintarajan yli jopa minuutin ajaksi. (Kauppinen, 2016) Verkko simuloitiin, ja tuloksista havaittiin, että 110 kV alueverkon päämuuntajien kytkentä aiheuttaa pääjännitteiden notkahduksen 110 kV verkossa. Voimalaitoksella kytketyn 90 MVA:n muuntajan kytkentä aiheuttaa pääjännitteiden notkahduksen ja virroissa kytkentävirtasysäyksen, joka näkyy 20 kV verkossa nollajännitteen nousuna. Kytkennässä nollajännite nousee niin korkealle, että jännite vastaa 20 kV verkon maasulkuja. Tällöin maasulkusuojaus havahtuu ja toimii tarpeettomasti. (Mäkinen, 2015)

Syy kytkentäilmiöön on se, että YNyn0 –kytkentäisillä muuntajilla ei ole toision tähtipisteessä vaimentavaa komponenttia. Tämä aiheuttaa sen, että ensiöpuolen kytkentäilmiöt näkyvät myös toision puolella, joka aiheuttaa haasteita relesuojaukselle. Ilmiötä ei esiinny YNyn0d-kytkentäryhmissä muuntajilla, koska muuntajan tasauskäämi vaimentaa värähtelyn. (Mäkinen, 2015)

5.1 Tallenteiden käyttötarkoitus

Häiriötallentimilla on tarkoitus saada tietoa verkossa tapahtuvista ilmiöistä sekä selvittää, mikä on aiheuttanut suojauksen havahtumisen. Lisäksi tallennuksilla voidaan suorittaa kunnonvalvontaa sekä sähkön laadun analysointia. Suojauksen havahtumisia tarkastelemalla voidaan seurata relesuojauksen toimivuutta sähköverkossa.

JE-Siirrossa tutkitaan häiriötallennuksia sekä tapahtuneista vioista, että suojauksen havahtumisista. Vikojen jälkeen tutkitaan missä vika on ollut. Erityisen hyödyllisiä häiriötallentimet ovat silloin, kun vika on ohimenevä ja vian syytä ei tiedetä. Tällöin voidaan tutkia, onko verkossa ollut todellinen vika vai onko joku muu ilmiö aiheuttanut suojauksen havahtumisen, jolloin suojaus on mahdollisesti toiminut väärin.

Jyväskylän Energialla häiriötallentimien asettelufilosofian mukaan kaikista verkon vikatilanteista pitää saada tallenteet. Tällöin tallennetta voidaan käyttää vianhoidossa, jälkeenpäin voidaan tarkastella suojauksen toimivuutta sekä tutkia miten vika on kehittynyt ja mahdollisesti määrittellä mikä on aiheuttanut vian. Lisäksi tallenteita voidaan käyttää varmistamaan standardinmukainen toiminta asiakkaiden korvausvaatimusten käsittelyssä ja käyttötoiminnan oikeusturvana mahdollisten sähkötapaturmien tapauksessa. (Kauppinen, 2017) Nykyään on asemakohtaisia eroja häiriötallentimien asetteluissa. Näitä eroja yhdenmukaistetaan releiden koestuskierron yhteydessä.

Jyväskylän Energian asetteluperiaatteet eivät toimi kaikilla verkkoyhtiöillä, sillä suurilla verkkoyhtiöillä tallennuksia voi tulla vuositasolla valtavia määriä. Esimerkiksi Eleniällä tulee vuositasolla 190 000 tallennetta laukaisuun asti menneistä vikatilanteista. Suurista tallennusmääristä on priorisoitava tallenteita, jotta niiden käsittely on helpompaa (Hälvä, 2013). Suurten verkkoyhtiöiden vikamäärillä tulee miettiä tallenteiden liipaisuperusteita käytettävien resurssien mukaisesti. Häiriötallenteet ovat kuitenkin yksi ainoita keinoja selvittää, mitä verkossa on todellisuudessa tapahtunut vian aikana.

Häiriötallenteiden avulla voidaan ymmärtää, mistä verkon häiriöt johtuvat. Syiden ymmärtäminen ja analysointi on edellytys häiriöiden poistamiselle. Analysoinnin avulla opitaan myös verkon käyttäytymistä vikatilanteiden aikana. (Lehesvuo, 2012) Verkon käyttäytymistä voidaan hyödyntää releiden suojausasetteluiden määrittelyssä.

5.2 Releet häiriötallentimina

Nykyaikaiset johtolähtöjen suojareleet mittaavat monia asioita. Yksi näistä ominaisuuksista on häiriöiden tallentaminen. (Hälvä, 2013) Rele voidaan asettaa suoraan releen etutausta, releen web-liittymästä tai releiden asetteluohjelmalla. ABB:n releille asetteluohjelma on PCM 600.

Liipaisuperusteisten häiriötallenteiden kanssa oleelliset asiat ovat:

- Tallenteiden pituus
- Liipaisua edeltävä aika
- Tallennettavat kanavat
- Liipaisutekijä

Edellä esitellyistä neljästä oleellisesta asiasta ensimmäiset kolme vaikuttavat suoraan tallennukseen ja neljäs vaikuttaa tallenteiden määrään. Mikäli käytetty tekniikka ei aseta rajoituksia, tallenteiden suhteen hyvänä periaatteena voidaan pitää sitä, että tietoa ei saa hukata. Tällöin kaikki käytetyt kanavat tallennetaan ja tallenteista tehdään niin pitkiä kuin on teknisesti mahdollista.

Tallennuksen pituutta määritettäessä tulee valita, kuinka pitkä aika tallennetaan ennen releen liipaisua ja kuinka pitkä aika tallennetaan liipaisun jälkeen. Tallennukset halutaan asetella mahdollisimman pitkiksi, jotta tallennukseen saadaan mukaan koko ilmiö tai ainakin suurin osa. Käytettävästä releestä riippuen releen oma muisti saattaa rajoittaa tallennuksien pituuksia. Myös tiedonsiirtokapasiteetti voi olla tallennuksien pituutta rajoittava tekijä, sillä tallenteiden pituus vaikuttaa suoraan siirrettävän datan määrään.

Jos tallenne on riittävän pitkältä ennen liipaisua, on mahdollista nähdä mistä vika on muodostunut. Esimerkiksi linjaan kaatuva puu voi painaa vaiheet yhteen aiheuttaen oikosulun. Ennen oikosulkua puu aiheuttaa ensin suuriresistanssisen vian, johon maasulkusuoja ei välttämättä havahdu. Vian päättymisen jälkeen ja tilanteen normalisoituessa verkossa on erilaisia värähtelyilmiöitä, jotka halutaan saada myös tallenteelle. Sopivan tallennuskesto häiriön poistumisen jälkeen on siihen saakka, kunnes varasuojan tulisi toimia. Tällöin saadaan kaikki tapahtumat samalle tallenteelle ja nähdään verkon tila sillä hetkellä kun varasuojan tulisi toimia.

Rele voidaan asetella tekemään häiriötallennus kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla. Ensimmäinen tapa on liipaista muutoksesta tallennus ja toinen tapa on liipaista aikaperusteisesti tallennus. Aikaperusteista tallennusta voidaan käyttää sähkön laadun seurannassa. JE:n verkossa ei ole käytössä aikaperusteisia liipaisuja, eli kaikki tallennukset liipaistaan verkossa tapahtuvasta muutoksesta. Releelle tuleville analogiasignaaleille ja releeltä lähteille digitaalisignaaleille voidaan asetella raja-arvot, joiden ylityksestä tallenteen liipaisu tapahtuu. (Pitkänen, 2016)

Digitaalisignaalit, eli suojauslohkojen toiminta ja katkaisijan tilatiedon muutokset, ovat hyviä tallenteiden liipaisuperusteita. Asettamalla suojauslohkot liipaisemaan häiriötallenne, saadaan tieto siitä, millaisissa tapauksissa suojaus toimii. Katkaisijan tilatieto on hyvä peruste häiriötallenteen liipaisulle, koska se ei riipu suojauslohkoista. Tällöin saadaan häiriötallenne, vaikka katkaisija tulisi vahingossa auki asemalla tehdyn saneeraustyön yhteydessä. Verkossa on kuitenkin vikatilanteita, joihin suojaus ei reagoi. Näiden tallentamiseen voidaan käyttää analogiakanavia, eli releen mittaamia jännitteitä ja virtoja.

Kun maasulkuja havaitaan releen analogiakanavista, tärkeimpiä mitattavia suureita ovat nollajännite ja nollavirta. Suuren vikaimpedanssin kautta tapahtuvat maasulut eivät välttämättä näy vaihejännitteissä tai vaihevirroissa. Nollajännitteessä taas näkyy maasulkujen aiheuttama vaihejännitteiden epäsymmetria, joten se sopii tallenteiden liipaisuun. U_0 on aseteltava niin, ettei resonanssipisteen etsiminen aiheuta häiriötallennusta. Mitä lähemmäs resonanssipisteen nollajännitettä häiriötallentimet asetellaan, sitä suuremman vikaimpedanssin kautta tapahtuvista vioista saadaan tallenne. Sammutetulla verkolla sopiva asettelu on 5 – 10 % ja maasta erotetulla verkolla 1 – 3 % nimellisarvosta.

Toinen maasulkujen kannalta tärkeä suure on nollavirta. Kun nollavirtaa asetellaan häiriötallenteen liipaisevaksi tekijäksi sammutetulle verkolle, voidaan vikaimpedanssin ja nollavirran välillä noudattaa seuraavaa periaatetta:

- $10 \text{ k}\Omega \rightarrow 1 \text{ A}$
- $5 \text{ k}\Omega \rightarrow 2 \text{ A}$

Laajoissa lähdöissä kapasitiivinen virta kasvaa, jolloin asetteluarvoa pitää kasvattaa 3 – 5 A, että vältetään turhilta tallennuksilta.

Häiriötallennusten asettelussa on tärkeää saada yksilöityä kaikki tallenteet. Tätä varten releet kannattaa nimetä niin, että häiriötallenteille tallentuu aseman nimen lisäksi kenno-numero. Nimeämisissä kannattaa välttää erikoismerkkejä, koska ne eivät välttämättä näy oikein häiriötallenteiden tulkintaohjelmilla. Selvästi nimettyjen tallenteiden tutkiminen on helpompaa jälkeenpäin.

ABB:n releiden tekemät häiriötallenteet ovat siitä hankalia, että käyttäjä ei voi vaikuttaa tiedoston nimeen. Nimeäminen tapahtuu releellä juoksevana numerointina. Sen sijaan, että tallenne olisi nimeltään drec_192.dat, olisi paljon kuvaavampaa, jos tallenteen nimi muodostuisi aseman nimestä, kennonumerosta ja aikaleimasta.

5.3 Relion 630 -releiden häiriötallentimien asettelu

REF 600 -sarjan releet ovat ABB:n uusimpia relesarjoja. Releet sisältävät kattavat suojaus- ja mittausoiminnot, jotka on osittain nimetty uudestaan edeltävän 500-sarjan releiden jälkeen. 500-sarjan releisiin verrattuna 600-sarja on suunniteltu käyttämään IEC 61850 tiedonsiirtoprotokollaa ja releissä on entistä enemmän älyä. (Laikola, 2010)

600-sarjan releillä asettelu tehdään valitsemalla käytettävät analogikanavat sekä valitsemalla suojauslohkot, joiden start- tai trip-signaalista tallenne liipaistaan. Lisäksi analogiakanaville voidaan valita rajat, joiden ylityksestä tai alituksesta liipaistaan signaali. Suojauslohkojen havahtumistasot määritetään suojausasettelun yhteydessä.

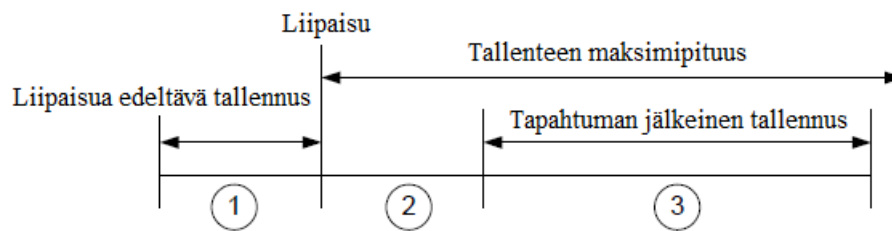
Häiriötallentimet voidaan asettaa WEB-käyttöliittymällä. Käyttöliittymän käyttäminen vaatii, että releelle on sallittu WEB-käyttö. Asetusten muuttaminen tapahtuu valitsemalla enable write kuvan vasemmasta yläreunasta.

WEB-käyttöliittymässä häiriötallennuslohkot löytyvät ”configuration”-kansioista ja sieltä valittavasta alikansioista ”Monitoring”. ”Monitoring” -kansiossa on omat kansionsa analogiakanaville (A1RADR) sekä digitaalikanaville (B1RBDR). Samassa kansiossa on lohko DRRDREC, jossa voidaan asettaa häiriötallennus päälle sekä valita tallenteiden pituus. Tämä tehdään asettamalla parametrin taulukon 8 esittämällä tavalla.

Taulukko 8. Häiriötallennusten sopiva pituus

Parametri	Asettelu
Operation	On
Pre-trigger time	2
Post trigger time	2,5
Recording time limit	8

Operation kuvaa koko häiriötallennuslohkon toimintaa ja sen on oltava päällä, jotta lohko toimii. *Pre-trigger time* on ennen häiriötä tallennettavan osuuden kesto, joka on tässä aseteltu kahteen sekuntiin. *Post trigger time* on häiriön jälkeen tallennettava aika, joka on aseteltu 2,5 sekuntiin. *Recording time limit* rajoittaa tallenteen pituuden. Tallenteen pituutta rajoitetaan sellaisissa tilanteissa, jolloin joku häiriötallenteen liipaiseva parametri on aktiivinen. Tätä on selvennetty kuvassa 21. Tilanteita, joissa tallenteiden pituutta tulee rajoittaa, on kahdenlaisia. Häiriötallennin voi olla aseteltu liian herkäksi esimerkiksi nollajännitteen suhteen, jolloin terveen tilan nollajännite liipaisee tallenteita ja tallenteiden tulo loppuu vasta kun verkko muuttuu. Toinen vaihtoehto maksimitallennusajan täyttymiselle on, että verkossa on vika, jota relesuojaus ei havaitse. Tällainen voi olla esimerkiksi katkeileva maasulku, joka pitää nollajännitteen korkealla.



Kuva 21. Relion 630 releiden häiriötallenteiden pituuden määrittäminen, muokattu (ABB, b2014)

Kuvassa 21 on esitetty yksi ehdotus tallenteiden pituudeksi. Käyttäjän on määriteltävä tallenteiden pituus huomioiden käyttötarkoitukset ja tiedonsiirtoyhteydet. Jyväskylän Energiassa on valittu pitkät tallenteet, joista nähdään mahdollisia ennen vikaa tapahtuneita ilmiöitä, jotka eivät ole aiheuttaneet tallenteen liipaisua. Liipaisun jälkeen tarvitaan pitkä tallennusaika, jotta voidaan nähdä mahdollisia jälkivärähtelyitä sekä verkon tilanne silloin, kun maasulun varasuojien tulisi toimia.

Analogiakanavat asetellaan A1RADR-välilehdellä. Alla on kuva diplomityön yhteydessä tehdystä häiriötallentimen asetteluohjeesta, jossa näkyy patkä välilehden sisältöä.

A1RADR(ACH):1>General
7. syyskuuta 2016 10:52

Under trig. Lev ja Over trig. Level eli liipaisurajat asetellaan prosentteina, eli suhteessa nimellisarvoon.

Arvojen muuttamiseksi painetaan Enable write

Configuration -> Monitoring

Lohkon nimi, tässä tapauksessa analogiakanavat

Nimi, joka näkyy häiriötallenteessa. Konfigista täytyy tarkistaa mikä signaali on kytketty mihinkin kanavaan ja nimetä sen mukaan

Päällä / Pois, eli näkyvä tallenteella

Nimellisarvo: Virralle saadaan virtamuuntajasta ja jännitteelle ja jännitteelle nimellisarvo on 20000V tai 11547V

Jos halutaan, että analogiakanava liipaisee tallenteen ne voidaan asettaa tässä. Jos ei ole käytössä

Parameter Name	Current Value	Unit	Min	Max	Scale
NAME1	IL1				
Operation CH 1	On				
Normal value CH 1	200.0	%	0.0	999999.9	0.1
Under trigger CH 1	Off				
Under Trig Lev CH 1	50	%	0	200	1
Over trigger CH 1	Off				
Over Trig Lev CH 1	200	%	0	20000	1
NAME2	IL2				
Operation CH 2	On				
Normal value CH 2	200.0	%	0.0	999999.9	0.1
Under trigger CH 2	Off				
Under Trig Lev CH 2	50	%	0	200	1
Over trigger CH 2	Off				
Over Trig Lev CH 2	200	%	0	20000	1
NAME3	IL3				
Operation CH 3	On				
Normal value CH 3	200.0	%	0.0	999999.9	0.1
Under trigger CH 3	Off				
Under Trig Lev CH 3	50	%	0	200	1
Over trigger CH 3	Off				
Over Trig Lev CH 3	200	%	0	20000	1
NAME4	IL0				
Operation CH 4	On				
Normal value CH 4	200.0	%	0.0	999999.9	0.1
Under trigger CH 4	Off				
Under Trig Lev CH 4	50	%	0	200	1
Over trigger CH 4	Off				
Over Trig Lev CH 4	200	%	0	20000	1

Kuva 22. Häiriötallentimen analogiakanavien asettelu Relion 630 -releillä

Jyväskylän Energialla Relion 630 –releiden häiriötallentimien analogiakanaviin on valittu vaihevirratt $IL1$, $IL2$ sekä $IL3$ ja nollavirta I_0 . Lisäksi vaihejännitteet $U1$, $U2$ ja $U3$ sekä nollajännite U_0 on valittu häiriötallennuslohkolta tallentavaksi. Analogiasignaaleille ai-noastaan nollajännitteen ylityksestä liipaistaan tallenne. Nollajännitteen ylitystä käy-tetään tallenteiden liipaisuun koska suojauksessa käytetty 15 % U_0 -jännitteestä ei havaitse suuren impedanssin kautta tapahtuvia vikoja. Muita analogiakanavia ei tarvitse käyttää tallentavana, koska suojauslohkojen funktiot, kuten kytkentävirtasysäys, erovirta ja vir-taepäsymmetria on aseteltu niin herkiksi, että ne liipaisevat tallenteen.

Analogiakanavien lisäksi myös digitaalikanavat, eli tässä tapauksessa suojauslohkojen havahtumiset, voidaan asettaa liipaisemaan tallenne. Digitaalikanavat ovat BxRBDR-vä-lilehdillä, joita voi olla useita riippuen releelle asetelluista suojauslohkoista. Välilehdillä on listattu kaikki releen suojauslohkot ja asettelu tehdään yksinkertaisesti valitsemalla *Trigger operation xx on*. Asettelytyökalu on esitelty kuvassa 23.

B1RBDR(BHC):1>General
7. syyskuuta 2016 10:53

Binääri-input 1, välilehti
Tällä sivulla asetellaan mitkä releen suojauslohkojen startit ja tripit liipaisevat häiriötallenteen

Lohkon nimi (B1RBDR)

Suojauslohkon nimi: tässä tapauksessa B-Start, eli 1. portaan ylivirtastartti

On/Off - Liipaisee/ei liipaise

Trig on 1-liipaisaanko kun toiminto käynnistyy, eli muuttuu arvosta 0 arvoon 1, vai tapahtuman päättyessä eli kun muuttuu arvosta 1 arvoon 0.

Show indication - Näytetäänkö Scadassa teksti.

Parameter Name	Current Value	New Value
NAME1	B-Start	B-Start
Trigger operation 1	On	On
Trigger level 1	Trig on 1	Trig on 1
Show indication 1	Hide	Hide
Set LED 1	Off	Off
NAME2	B->Start	B->Start
Trigger operation 2	On	On
Trigger level 2	Trig on 1	Trig on 1

Kuva 23. Relion 630 -releen digitaalisignaalien asettelu häiriötallenteelle

Taulukkoon 8 on kerätty Jyväskylän Energialla Relion 630 -releillä häiriötallenteen lii-paisevat digitaalikanavat. Kaikki käytetyt kanavat liipaisevat tallenteen aktivoituessaan.

Taulukko 9. Jyväskylän Energian REF 630-releen häiriötallenteen liipaisevat digitaali-signaalit

Lohko	Liipaisu
I>Start	Trig on 1
I>>Start	Trig on 1
I>>>Start	Trig on 1
Iodir> Start	Trig on 1
Iodir>> Start	Trig on 1
Intef_Start	Trig on 1
I>Trip	Trig on 1
I>>Trip	Trig on 1
I>>>Trip	Trig on 1
Iodir Trip	Trig on 1
Iodir>>Trip	Trig on 1
Intef_Trip	Trig on 1
Adm> Start	Trig on 1
Adm>> Start	Trig on 1
Adm>>> Start	Trig on 1
Io>Start	Trig on 1
Io>>Start	Trig on 1
Io>Trip	Trig on 1
Io>>Trip	Trig on 1
I2/11 Start	Trig on 1
I2/11 Trip	Trig on 1
I2> Start	Trig on 1
3I2If> Trip	Trig on 1
I2> Trip	Trig on 1

Taulukosta 8 huomataan, että lähes kaikki releelle käyttöön asetelluista suojauslohkoista on käytössä liipaisemassa tallenteita. Lisäksi taulukosta 8 on syytä huomata, että esimerkiksi katkaisijan toiminta ei liipaise tallennetta. Tällöin verkon tavallinen käyttö ei aiheuta turhaan tallenteita, vaan häiriötallenteita syntyy ainoastaan suojauslohkojen havahtumisista.

Tallenteen liipaiseminen käsin tehdään *disturbance records* -kansiossa, joka löytyy releen hakemiston juuresta. *Disturbance records* -kansiossa on erillinen painike *Manual trig*, josta tallenne saadaan liipaistua. Samassa kansiossa näkyy releen tekemät häiriötallenteet, mikäli niitä ei ole poistettu releen muistista.

5.4 Relion 543 -releiden häiriötallentimien asettelu

500-sarjan releet on aseteltu Scada-järjestelmään upotetun releiden asettelutyökalun, *relay setting tool* avulla. Häiriötallennus on MEDREC 16 -lohkossa, joka löytyy mittausvälilehden alta. MEDREC-lohkossa on 8 välilehteä, joilla voidaan vaikuttaa häiriötallennuksen asetuksiin ja sisältöön. Näiden kahdeksan välilehden otsikot ovat:

- Ohjausasettelu
- Liipaisuasettelu
- Liipaisurajat
- Yleistä tietoa
- Tapahtumamaskit
- Lähtötiedot
- Analogiakanavat
- Digitaalikanavat

Työn aikana on tehty erillinen ohje tallenteiden asettelusta, tästä ohjeesta on kuva alla.

Ohjausasettelu
17. elokuuta 2016
10:16

Tietojen tallennus releelle
Releeltä tietojen luku
MEDREC16 -lohko on häiriötallennuslohko
Tästä saa liipaitua käsin tallenteen, esimerkiksi kokeilumielessä.

Tallennuksen pituus, 50 jaksoa tavalliselle johtolähdölle ja 90 PM-kentille. 1 jakso 50 Hz järjestelmässä on 20ms, eli 50 jaksoa tuottaa sekunnin mittaisen tallenteen. Tässä mitä pidempi on parempi, mutta releen muistin koko rajoittaa tallennusten määrää. Lyhyitä tallennuksia mahtuu useampia ja pidempiä vain muutama.

Kuinka monta tallennusta mahtuu releelle. Valittujen kanavien määrä ja tallenteen pituus vaikuttaa tallenteen pituuteen.

Kuinka monta tallennetta releen muistissa on

Liipaisu edeltävä aika, eli kun jokin määrätty suure ylittää liipaisurajan kuinka suuri osa tallenteesta on liipaisua edeltävä aika. Päämuuntajalle 10% ja johtolähdöille 20%. Ilmoitetaan prosentteina koko tallenteen pituudesta.

Toimintamoodi, **ylikirjoitus** kirjoittaa vanhimman tallennuksen päälle jos tallennusten maksimimäärä täyttyy. Saturaatio ei anna tallettaa vanhojen päälle uusia, eli uudet eivät jää muistiin.

Rajoitus aika kuvaa sitä miten pitkän ajan jälkeen voidaan liipaista tallenne uudestaan samasta syystä.

Description	DB Name	Present Value	New Value	Range
Käsiohjaus	F225M001		0	
Tyhjennä muisti	F225M002		0	
Tallent. pituus	F225M011	90	90	cyc. (10 ... 65535)
Suurin tal. ilm.	F225M003	2		(0 ... 65535)
Tallenne ilm.	F225M016	0		(0 ... 65535)
Liip.edelt. aika	F225V005	10	10	(0 ... 100)
Toimintamoodi	F225V003	Ylikirjoitus	Ylikirjoitus	
Rajoitus aika	F225V002	0	0	(0 ... 86400)

REF543 | Uploaded: 2016-08-16 13:38

Kuva 24. REF 500 -häiriötallennusten asetteluohje

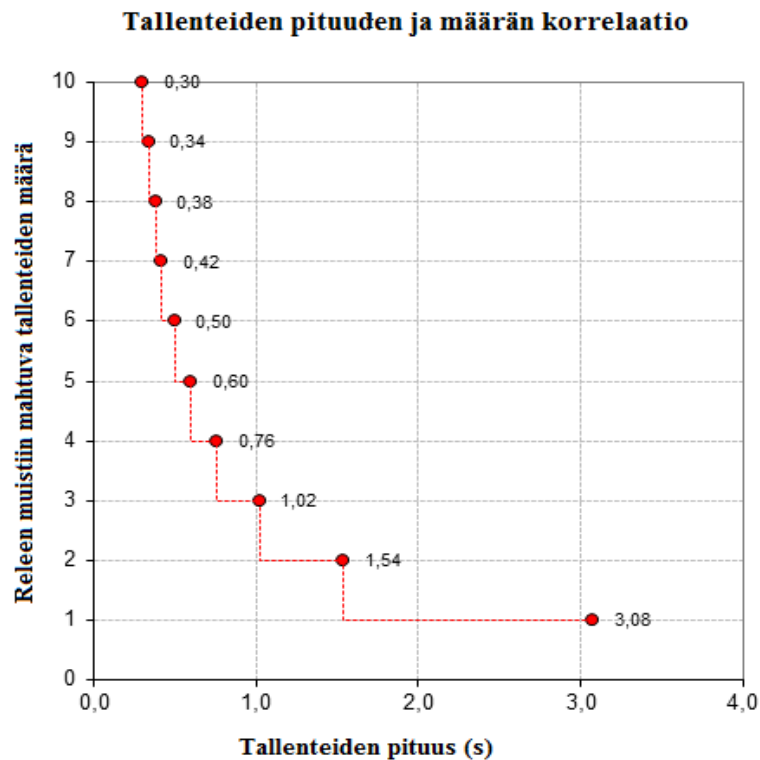
Yllä olevassa kuvassa päävalikon vasemmalla puolella on kaksi painiketta, joilla saadaan luettua ja tallennettua releelle asetellut. Oikeanpuolimmainen painike lukee releeltä asetellut työkalun muistiin ja vasemmanpuolimmainen painike vie työkalun muistissa olevat asetellut releelle. Tiedot eivät siis päivyty releelle automaattisesti, vaan ne on luettava sinne erikseen. Tiedot eivät päivyty myöskään asetellutyökalulle, joten releeltä on aina haettava käytössä olevat asetellut ennen asetusten muuttamista.

Käsiohjausvalikossa on vaihtoehto ”1”, joka liipaisee häiriötallenteen. Näin saadaan tallenne, josta voidaan tarkistaa, että kaikki tarvittavat tiedot näkyvät tallenteilla. Liipaisu tapahtuu muuttamalla ”0” liipaisuksi ja tallentamalla asetellut releen muistiin. Liipaisu tekee yhden tallenteen ja tämän jälkeen liipaisun voi ottaa pois.

Tallenteen pituus asetellaan 500-sarjan releisiin sykleinä. Yksi sykli on 50 Hz järjestelmässä 20 ms, joten 90 syklin tallenne on kestoaltaan 1,8 s. Tästä 30 %, eli 540 ms, on valittu liipaisua edeltäväksi ajaksi (Liip. edelt. aika). Tallenneaika voisi olla pidempikin,

mutta releelle mahtuu näillä asetuksilla vain 2 tallennetta, jolloin pidemmälle tallennukselle ei ole tilaa. Toimintamoodi kuvaa releen toimintaa, jos tallenteita tulee useampia. Ylikirjoitus kirjoittaa muistin täytyttyä vanhimman tallenteen päälle uuden. Vaihtoehto ylikirjoitukselle on saturaatioasetus, joka säilyttää vanhimmat tallenteet eikä tallenna uusia kunnes muisti on tyhjennetty. Ohjausasettelu-välilehdeltä nähdään muistissa olevien tallenteiden lukumäärä ja tarvittaessa voidaan ohjata rele poistamaan muistissa olevat tallenteet. Tallenteita ei tarvitse poistaa, jos releellä on käytössä ylikirjoitus.

Kuten yllä todettiin, 500-sarjan releillä häiriötallennusten pituutta rajoittaa releen muisti. Alla on taulukko, joka kuvaa releelle mahtuvien tallenteiden pituutta lukumäärää, kun tallennetaan kahdeksan analogiakanavaa.



Kuva 25. Tallenteiden pituuden ja määrän korrelaatio (Lehesvuo, 2016)

Kuvasta 25 nähdään, miten tallenteen pituus vaikuttaa muistiin mahtuvien tallennusten määrään. Jos tehdään 50 jakson tallennuksia, niitä mahtuu releen muistiin kolme kappaletta. Kolme tallennetta on hyvin vähän varsinkin jos asemalla on käytössä pika- ja aikajälleenkytkennät. Mikäli jälleenkytkennät ovat käytössä, on tallenteiden pituutta syytä lyhentää niin, että releelle mahtuu mahdollisen kokeilukytkennän tallenteet. Releiden pieni muisti on yksi syy, miksi tarvitaan nopeaa häiriötallenteiden luentaa.

500-sarjan releillä ei voi valita suoraan käytettäviä kanavia, vaan halutut kanavat syötetään releelle numeroarvona. Numeroarvot löytyvät ABB:ltä saatavan erillisen excel-taulukon avulla. Jokaiselle kanavalle on annettu lukuarvoksi joku kahden potenssi, jotka yhteen laskemalla saadaan muodostettua releelle syötettävä numero. Esimerkiksi, jos releellä halutaan tallentaa virrat, nollavirta, nollajännite ja vaihevirrat, kanavien summa on 463. (Lehesvuo, 2016)

Liipaisuasettelut-välilehdellä määritetään mitkä analogia- ja digitaalikanavat liipaisevat häiriötallenteen. Analogiakanavien ylityksille ja alituksille asetellaan liipaisevat kanavat erikseen. JE:llä ylityksestä liipaisevat analogiakanavat ovat *IL1, IL2, IL3, Io, Uo, U12, U23* sekä *U31*. Näitä kanavia vastaava releelle syötettävä numero on 3623. Analogiakanavien *U12, U23* ja *U31* alitus liipaisee tallenteen ja näillä kanaville releelle syötetään arvo 3584. DI-asetus kertoo minkä digitaalikanavien liipaisusta tehdään tallenne ja DI-tila kertoo, tehdäänkö tallenne digitaalisignaalin nousevasta vai laskevasta reunasta. DI-sallittu ja DI tila on aseteltava vastaamaan toisiaan. JE:llä DI-sallitulle ja DI-tilalle syötettävä numero on 2559, joka vastaa kanavia BI1-BI9 ja BI12. Digitaalikanavat käsittävät maasulku- ja oikosulkusuojauksen sekä erovirta- ja kytkentävirtasäyssi-suojan. Taulukon 10 on koottu Relion 543 -releen digitaalisignaalit.

Taulukko 10. Relion 543 -releen digitaalisignaalit

Digitaalikanava	Suojauslohko
BI1	Ylivirta Start Low ja High
BI2	Ylivirta Trip High
BI3	Ylivirta Trip Low
BI4	Start: Io High, Io>-> High ja low
BI5	Io>-> High Trip
BI6	Io>-> Low Trip
BI7	Io High Trip
BI8	CUP3Low Start
BI9	CUP3Low Trip
BI10	JKLLA auki
BI11	JKLLA kiinni
BI12	Inrush3 Start
BI13	DEF2 Inst Start
BI14	DEF2 Inst Trip
BI15	Katk. Auki
BI16	Katk. Kiinni

Suodatusaika kertoo, kuinka pitkään analogiakanavan on oltava yli tai ali asetteluarvon, jotta se liipaisee tallenteen. JE:llä on käytetty 50 ms arvoa. Liip. jakson kestoa käytetään, jos halutaan liipaista tallenne määrääjain, eikä minkään suureen muutoksesta.

Seuraava välilehti käsittelee liipaisurajoja. Tässä voidaan asetella, kuinka suuria analogiakanavien muutosten on oltava, jotta ne liipaisevat tallenteen. Vain ne kanavat täytyy

asetella, jotka on valittu liipaisuasettelut-välilehdellä liipaisemaan häiriötalenne. Taulukossa 11 on esitetty liipaisurajat REF 543 –releelle.

Taulukko 11. Analogiakanavien liipaisurajat REF 543 -releellä

Suure	Asettelu	
ILX	2	xIn
U _{xy}	1,1	xUn
I _o	0,05	xIn
U _o	0,07	xUn

Eteläportin asemalla, jossa maasulkukokeet tehtiin, on käytössä 1/240 virtasensorit ja 1/100 kaapelivirtamuuntajat. Tällöin häiriötalenne liipaistaan ylivirrasta, jos *ILX*, eli mikä tahansa vaihevirta, on yli 480 A, *U_{xy}*, eli mikä tahansa pääjännite on yli 22 kV, *I_o* on yli 5 A tai *U_o* on yli 800 V. Analogiakanavista ainoastaan vaihejännitteet voivat liipaista häiriötalenteen jännitteen alituksesta. Liipaisuraja on 0,9 *U_n* eli 10,3 kV.

Yleistä tietoa -välilehdellä valitaan tallennettavat analogiakanavat. Releelle annetaan numerokoodi 3623 ABB:n Excel-*taulukon* mukaan. Samalla välilehdellä annetaan releelle Pääotsikko, joka tulee näkyviin häiriötalenteille. Pääotsikon kannattaa sisältää aseman nimi ja releen numero (EPI J15), jolloin tallenteiden tutkiminen on jälkikäteen helpompaa kun tiedetään varmasti miltä laitteelta tallenne on peräisin.

Tapahtumamaskit -välilehdellä on aseteltu tapahtumamaski 1 nollassi ja tapahtumamaskit 2, 3 ja 4 arvoon 2147484299. Nämä liittyvät tapahtumatietojen lähettämiseen valvoon. Tapahtumamaskilla voidaan peittää sellaiset turhana pidetyt tapahtumat, joita ei haluta raportoida. (Lehesvuo, 2016) Seuraavalla Lähtötiedot -välilehdellä on molemmat arvot aseteltu nollassi.

Analogiakanavat -välilehdellä voidaan nimetä käytetyt analogiakanavat. Esimerkiksi Analogiakanava AL1, jossa on vaihevirta, voidaan nimetä IL1. Kanavajärjestys riippuu releen asettelusta. Digitaalikanavat-välilehdellä on myös mahdollisuus nimetä kanavia kuvaamaan niiden todellista sisältöä.

5.5 Releiden kellojen synkronisointi

Eri häiriötalenteiden vertailun mahdollistamiseksi, releiden on oltava samassa ajassa, jolloin eri tallenteiden aikaleimat ovat keskenään vertailukelpoisia. Tätä varten JE:llä on oma NTP-palvelin, joka ylläpitää järjestelmän aikaa. Scada-järjestelmänä käytetään ABB:n MicroSCADA Pro SYS 600:sta. Scada on kahdennettu kahdella palvelimella. Toinen palvelin on käytössä ”kuuma” ja toinen valmiina, eli niin sanotussa ”standby” –tilassa. (Moisio, 2016)

Kuuma palvelin hakee NTP-palvelimelta järjestelmän ajan tunnin välein ja asettaa sen jokaiselle ala-asemalle. Näitä ala-aseimia ovat COM 500 ja COM 600, sekä kaukokäytettävät erotinasemat. COM 500 ja 600-koneet toimivat sähkö- ja kytkinasemien ala-asemakoneina kooten aseman laitteilta saatavat tiedot yhteen paikkaan. Asemalla toimilaitteet hakevat aikansa ala-asemakoneilta. Näin kaikkien aseman toimilaitteet ovat samassa ajassa. Myös kaikki ala-asemat ovat samassa ajassa, jolloin eri asemien releiden tuottamia tallennuksia voidaan verrata keskenään. (Moisio, 2016)

5.6 Tallenteiden siirtäminen releeltä käyttöön

Nykyään kaikilla verkkoyhtiöillä ei saada tallenteita releiltä automaattisesti, vaan häiriötallenteet on haettava manuaalisesti, mikäli niitä halutaan tarkastella. Luenta vaatii aikaa ja taitoa, eikä ole käytettävissä vikaa hoidettaessa, vaan tallennuksia käytetään jälkeempään suojauksen analysoimiseen. (Kauppi, 2014)

JE:llä häiriötallenteet saadaan kaikilta sähkö- ja kytkinasemilta automaattisesti verkkolevylle käytettäväksi. Tässä prosessissa kuluu 2 – 8 min riippuen asemasta ja siitä, millä ajanhetkellä vika tapahtuu. Nopeuden pohjana on yhtiön oma valokuituverkko, johon kaikki sähkö- ja kytkinasemat ovat liittyneet. Tällöin siirtoyhteydet ovat nopeita ja niissä ei ole datarajoituksia. (Hakonen, 2016)

JE:llä häiriötallennuksia saadaan kahdenlaisista releistä: REF 543 ja REF 630. Tallenteiden lukutapa riippuu siitä, miten ala-asema on toteutettu. 500-sarjan releet on päivitetty asentamalla REF 543 releisiin ABB:n ZC-40x protokollamuunnin (*communication adapter*). REF 600 -sarjan releissä käytetään releen ethernetporttia. (Hakonen, 2016)

Asemat joissa on COM 500 -ala-asema, on häiriötallenteiden siirto toteutettu 543-releiltä ZC-yksiköiden kautta. ZC-yksikkö muuttaa releen liikenteen IEC 61850 –liikenteeksi, ja mahdollistaa häiriötallenteiden FTP-luvun suoraan käyttökeskukseen. Näillä asemilla muu tietoliikenne kulkee LON protokollalla starcoupler-laitteen kautta ala-asemakoneelle. Kaikki aseman releet on yhdistetty valokuidulla starcoupler laitteeseen. (Hakonen, 2016)

Asemilla, joissa on COM 600 -ala-asema ja REF 500 -sarjan releet kulkee kaikki releen ja ala-aseman välinen tietoliikenne ZC-lisäosan ethernet-portin kautta. Tällöin asemien tiedonsiirtoprotokolla on IEC 61850. (Hakonen, 2016)

Häiriötallenteet luetaan käyttämällä ZC -yksikköä FTP-palvelimena, jonne rele siirtää tallenteen automaattisesti. Siirrossa kestää muutamia minutteja ja viive johtuu huoltoväylän hitaasta tietoliikenteestä, eikä siihen voida vaikuttaa. ZC-yksikön muistiin mahtuu muutamia tallenteita riippuen tallenteiden koosta. ZC-yksiköstä tallenne saadaan eteenpäin FTP-siirrolla. Siirron toteuttaa käyttökeskuksen prosessiverkossa oleva työasema, joka käy läpi ajastetun ohjelman, jolla haetaan jokaisen ZC-yksikön muistista tallenteet

ja poistetaan ne siirron jälkeen. (Hakonen, 2016) Alla on esitetty ohjelman koodi, josta IP-osoite, käyttäjätunnus ja salasana on poistettu.

```
open XXX.XXX.XXX.XX1
user käyttäjätunnus salasana
cd comtrade
lcd J01Varas
mget *.*
mdelete *.*
lcd ..
close
```

(Hakonen, 2016)

Ohjelma on tehtävä jokaiselle releelle erikseen, koska jokaisella releellä on oma IP-osoite. 543-releissä tallenteet löytyvät ZC-yksikön comtrade-kansiosta, jonne mennään cd komennolla. Tämän jälkeen vaihdetaan paikallinen hakemisto siihen kansioon, jonne tallenteet halutaan kopioida. JE:n kansiorakenne on toteutettu niin, että jokaisella releellä on oma kansio, jonne releen tuottamat tallenteet siirretään. Kun paikallinen kansio on vaihdettu halutuksi, kopioidaan kaikki tiedostot releen comtrade-kansiosta ja poistetaan kaikki tiedostot mdelete *.* -komennolla. Kopioinnin valmistuttua, siirrytään paikallisessa kansiossa takaisin asemakansioon ja suljetaan yhteys. Tämän jälkeen haetaan seuraavan releen tallenteet. (Hakonen, 2016)

Mikäli rele ei ole tehnyt ainuttakaan tallennetta, releen muistista ei löydy comtrade -kansiota. Tällöin ohjelma ei voi mennä kyseiseen kansioon ja komento mget kopioi ylemmän kansion sisällön. Vastaavasti mdelete poistaa koko yläkansion. Tästä syystä ohjelma kannattaa koeajaa ilman poistokomentoja ja varmistaa, että jokaisesta releestä on tullut häiriötalenne. (Moisio, 2016)

Uusilla asemilla on COM 600 -ala-asetat ja REF 630 -releet. Näissä releissä on itsessään ethernet-portit ja kaikki releiden tietoliikenne kulkee näiden porttien kautta. (Hakonen, 2016) Alla on koodi, jolla tallennukset haetaan prosessiverkkoon ala-asetilta.

```
open XXX.XXX.XXX.XX2
user käyttäjätunnus salasana
binary
cd drec
lcd J02
mget *.*
mdelete *.*
lcd ..
close
bye
```

(Hakonen, 2016)

Koodi on muuten vastaava kuin 543-releillä, paitsi tallenteet haetaan drec -kansiosta, eikä comtrade-kansiosta. Lisäksi 630-releillä siirto on toteutettu binäärimuotoisena, koska häi-

riötallenteet ovat pakatussa muodossa. Jos samalta asemalta haetaan usealta eri tyyppiseltä releeltä tallenteita, 600-sarjan releiden tallenteet tulee hakea binäärimuodossa ja 543-sarjan releiltä ASCII –muodossa. (Hakonen, 2016)

Käyttökeskuksessa prosessiverkon kone kopioi tallenteet toimistoverkon verkkolevylle käytettäväksi. Näin tallenteet saadaan helposti käytettäväksi kaikille loppukäyttäjille eikä loppukäyttäjän tarvitse ottaa yhteyttä prosessiverkkoon. Tietoturvan kannalta toiminta on sen turvallisempaa, mitä vähemmän toimistoverkosta on yhteyksiä prosessiverkkoon. (Hakonen, 2016)

Tulevaisuudessa tallenteiden luku aiotaan muuttaa niin, että tallenteet siirtyvät releeltä suoraan ala-asemakoneelle ja valvomon kone ottaa yhteyden ala-asemakoneeseen yksittäisten releiden sijaan. Tällöin selvittää yksinkertaisemmalla siirto-ohjelmalla ja valvomosta tarvitsee ottaa yhteys vain ala-asemakoneelle.

5.7 Häiriötallennusten jatkokäsittely

Perinteisesti sähköverkon käyttötoiminnassa on käytetty paljon valistuneita arvauksia. Nykyisin verkosta saatavan tiedon määrä on kasvanut roimasti. Kaiken tiedon prosessointi on vaikeaa ja se vie työaikaa jostain muusta. Kuitenkin verkosta saatavalla tiedolla voidaan tukea ja auttaa sähköverkon käyttöä. (Hälvä, 2013)

Häiriötallennuksilla saadaan tietoa verkossa tapahtuvista ilmiöistä. Jyväskylän Energialla ei ole tähän mennessä käytetty häiriötallenteita suunnittelutoiminnassa. Tulevaisuudessa häiriötallennuksista saatavaa tietoa tullaan käyttämään myös suunnittelun apuna. Häiriötallennuksilla nähdään esimerkiksi kuinka suuria kytkentävirtasysäykset ovat kun johtolähtöjä kytketään takaisin verkkoon vian jälkeen. Kytkevävirtasysäyksiä kasvaessa liian suuriksi, varasyöttötilanteissa voi tulla tilanteita, jolloin johtoa ei saada kytkettyä verkkoon. Kytkevävirtasysäysten suuruutta seuraamalla voidaan määrittää maksimikoot johtolähdöille.

Häiriötallennuksia käytetään myös vianhoidon apuna. Tieto katkon todellisesta syystä auttaa vian hoitamisessa. Esimerkiksi muuntajan käyttöönoton yhteydessä katkaisija tuli auki ylivirrasta. Ensiajatus tilanteessa oli, että muuntajan magnetoinnin aiheuttama kytkentävirtasysäys aiheutti ylivirtareleen toimimisen. Häiriötallennukselta kuitenkin selvisi, että kyseessä oli todellinen kolmivaiheinen oikosulku. Vian aiheuttajaksi löydettiin väärin nimetyt kennot ja kaapelipäätteellä olleet maadoitukset. Nykyään häiriötallennusten tutkiminen vie häiriönhoidossa työaikaa itse häiriön hoitamiselta. Paras hyöty tallenteista saataisiin niin, ettei niiden tutkiminen vaatisi suurta työpanosta. Tähän tarvitaan automaattista häiriötallennusten tulkintaa.

Nykyään osa häiriötallennuksista tulee pakattuina ja osa pakkaamattomina. Ero johtuu 543- ja 630- releistä. Tallennusten siirtoa tullaan muuttamaan niin, että kaikki tallennukset puretaan valmiiksi, jolloin niiden käyttäminen nopeutuu. Tämä vie lisää levytilaa, mutta tallennukset vievät kokonaisuudessaan niin vähän tilaa, ettei sillä ole merkitystä. Yhden pakatun tallennuksen koko on noin 80 kt ja pakkaamattoman noin 150 kt.

Häiriötallenteiden liipaisuperusteet tulevat muuttumaan niin, että määräajoin kaikkiin johtolähtöihin liipaistaan tallenteet. Näitä tallenteita voidaan käyttää verkoston tilan seuraamiseen. Mikäli järjestelmä saadaan automaattisesti, tallenne tullaan liipaisemaan kuu-kausittain. Tallenteiden manuaaliliipaisut tehdään vuosittain, jos järjestelmää ei saada automaattiseksi.

Tämän diplomityön pohjalta aloitettiin automaattisen järjestelmän suunnittelu. Tavoite on, että häiriötallenne avautuu automaattisesti valvomoon näkyville. Tällöin vaaditaan vielä työtunteja tallenteen tutkimiseen, mutta aikaa ei kulu tallenteiden etsimiseen ja avaamiseen. Automaattinen järjestelmä tehdään Scada-pohjaiseksi. ABB:n MikroScada Pro:ssa on mahdollisuus upottaa komentoriviltä ohjattavia ohjelmia Scada-ruutujen sisään ja tarkoitus on hyödyntää tätä ominaisuutta. Häiriötallenne on saatava liipaistua ja haettua releeltä Scadan käyttöön. Tämän jälkeen häiriötallennetiedosto voidaan avata Scadaan upotetulla ohjelmalla. Haasteita tulee olemaan siinä, miten tallenne saadaan haettua välittömästi Scadan käyttöön. Järjestelmästä halutaan sellainen, että sillä päästään käsiksi ohimeneviin vikoihin. Tulevaisuuden tavoite on huomata vika ennen katkaisijan toimintaa ja erottaa vikapaikka verkosta ennen suojauksen toimimista.

Alustavan selvityksen mukaan Wavewin-ohjelmaa ei voi ohjata komentoriviltä, jolloin sen käyttö Scadaan upotettuna ei onnistu. Työn ulkopuolella tutkitaan mahdollisuutta tehdä MatLab-ohjelmalle sopiva ohjelma, joka avaisi tallenteen. Tällöin myös erilaisten laskuoperaatioiden tekeminen onnistuu helposti.

Työn aikana huomattiin, että alijännitteistä ei tullut häiriötallennuksia, vaikka scadaan tuli hälytyksiä. Syyksi tähän paljastui, että alijännitteistä ei ollut aseteltu liipaisua häiriötallenteille. Toimintaehdotuksena esitetään, että häiriötallenne liipaistaisiin myös alijännitteistä, jotta scadaan tulleille hälytyksille voitaisiin tarvittaessa löytää selitys. Häiriötallennusten liipaisuperusteet kannattaakin miettiä niin, että tallenteiden liipaisut asetellaan scadaan aseteltuihin hälytyksiin sopiviksi.

Muuntajien keskikoon kasvettua myös muuntajien PJ-kiskostossa tapahtuvien oikosulkujen vikavirrat ovat kasvaneet. Kaksivaiheisista PJ-oikosuluista tulee tallenteita erovirtasuojan havahduttua, mutta kolmivaiheiset oikosulut eivät välttämättä aiheuta minkään suojan havahtumista. Toinen toimenpide-ehdotus on, että mietitään millaisista PJ-puolen oikosuluista halutaan tallenne ja asetellaan häiriötallenteet liipaisemaan sellaisista.

6. MAASULKUKOKEET

Tässä työssä maasulkukokeilla tarkoitetaan sähköverkossa tehtäviä ensiökokeita, joissa käytössä olevaan verkkoon tehdään keinotekoisesti vikoja. Kokeet tehdään usein uudelle sähköasemalle, jotta saadaan varmuus aseman suojauksen sekä sammutuksen toimimisesta suunnitellusti. Tämän työn toteutuksen aikana tehdään maasulkukokeet. Kokeille on kaksi tavoitetta: luoda datapankki erilaisista vioista sekä tarkastella releiden toimintakykyä. Datapankin tuloksia voidaan käyttää myöhemmin muussa tutkimustoiminnassa.

6.1 Aikaisemmin tehdyt maasulkukokeet

Jyväskylän Energian verkossa on tehty maasulkukokeita lähes jokaisella asemalla. Kokeet on tehty aseman rakentamisen tai relevaihdon jälkeen jotta on saatu varmuus aseman sammutuksen ja suojauksen toimivuudesta. Tehtyjä kokeita on suoritettu:

- Eteläportti 2010
- Hämeenlahti 2013
- Savela 2014
- Kangasvuori 2015

Kokeilla on varmistettu, että asema toimii halutulla tavalla. Lisäksi on saatu tutkimusaineistoa todellisten vikojen lisäksi. Kokeiden tuloksena on havaittu rengasvirtamuuntajien epätarkkuus ja tästä aiheutuva virhelaukaisujen mahdollisuus. Tulosten seurauksena uusien hankittavien virtamuuntajien tarkkuus tulee olemaan vähintään 0,2S/5P25.

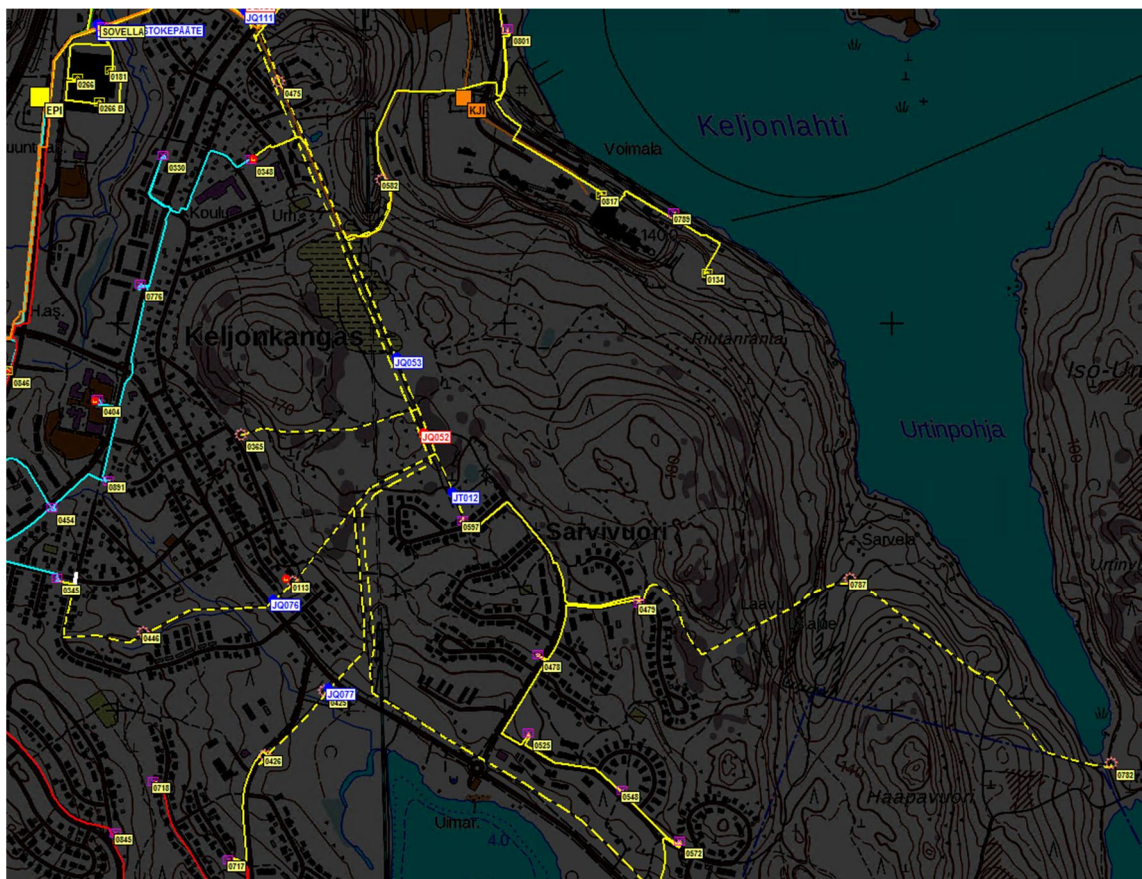
Osa kokeista on ollut suppeita ja osa laajempia. Laajimmat kokeet on tehty kesällä 2013 Hämeenlahden aseman saneerauksen jälkeen. Kokeet tehtiin yhteistyössä ABB:n kanssa. Hämeenlahden kokeissa testejä tehtiin sekä maasta erotetulle että normaaliin tapaan sammutetulle verkolle. Näiden testien tallennuksia verrattaessa huomattiin 3 A ero resistiivisissä vikavirroissa. Testien välillä verkko pysyi muuttumattomana ja ainoa ero oli sammutuskelan kytkeminen verkkoon. Tämän perusteella vikavirtojen eron täytyy johtua kelan läpi vuotavasta resistiivisestä virrasta.

6.2 Eteläportti 2016

Sarvivuoren asuinalue sijaitsee Jyväskylän keskustan eteläpuolella. Aluetta syötetään Eteläportin sähköasemalta, joka on rakennettu vuonna 2010. Eteläportin asemalle asennettiin yksi Suomen ensimmäisistä EFD-laitteista. Eteläportin sähköasemalla on kaksikiskojärjestelmä ja yksi päämuuntaja, jolla normaalitilassa syötetään molempia kiskoja. Aseman päämuuntaja on YNyn0d –kytkentäinen, jonka tähtipisteeseen on kytketty sammutuskela. Päämuuntajan kapasitiivisen verkon koko on normaalitilassa noin 100 A.

6.2.1 Testien suunnittelu

Kokeet tehtiin Sarvivuoren alueella Jyväskylän Keljonkankaalla. Tämä alue valittiin, koska se on maakaapeloitu taajama jota syötetään ilmajohdoilla. Syöttötavasta johtuen alueen maadoitukset ovat oma ryppäänsä, eivätkä ne ole mistään pisteestä kiinni muissa JE:n maadoituksissa. Kyseistä aluetta syöttää Eteläportin sähköasema, jossa syöttävä johtolähtö on EPI J09. Sähköaseman kapasitiivisen verkon koko on noin 80 A ja vikalähdön EPI J09 koko on 28,5 A (JE-Siirto, c2016). Kuvassa 26 on kartta alueesta, jolla testit tehtiin.



Kuva 26. Maasulkukokeiden alue

Kuvassa 26 keltaisella näkyvä johtolähtö on EPI J09. Testit tehtiin muuntamoilla M597 (kuvassa keskellä) ja muuntamolla M572 (kuvassa alhaalla). Kartasta näkyy, miten vika-alue on ilmajohdoilla syötetty, jotka on merkitty katkoviivoin.

Testisuunnitelma laadittiin yhdessä kehitysasiantuntija Risto Pitkäsén kanssa. Testejä oli tarkoitus tehdä erilaisilla vikavastuksilla sekä eri kompensointitilanteilla. Näiden eri tilanteiden avulla on mahdollista tutkia, miten aseman relesuojaus toimii ja minkälaisia vikoja releet havaitsevat. Testit päätettiin tehdä kolmella eri kompensointiasteella. Yksi kompensointiasento oli normaaliasento, johon kela itsensä säätää. Kaksi muuta asentoa

olivat 30 A alikompensoitu ja 30 A ylikompensoitu. 30 A alikompensoinnilla mallinetaan tilannetta, jossa kela on ehtinyt katkaisijan aukeamisen jälkeen etsiä uuden resonanssipisteen ja säätänyt sen mukaan. Tällöin, kun vikaantunut johdonpätkä kytketään takaisin verkkoon kokeilukytkenällä, verkko on vikaantuneen johtolähdön verran sivuunvirritettynä.

Kapasitiivisten maasulkuvirtojen suunta käännettiin kokeessa ylikompensoinnilla, jolloin vian aikana rele mittaa induktiivista virtaa. Alikompensoinnilla rele mittaa maasulun aikana viallisen lähdön resistiivisen resistiivisen virran lisäksi kapasitiivista virtaa.

Mahdollisiin ongelmiin varauduttiin kartoittamalla testien riskit. Riskeiksi listattiin:

- Vikapaikan kosketusjännitteet
- Jännitteelle osalle altistuminen testin aikana
- Releiden virhetoimintojen aiheuttamat sähkökatkot
- Ylijännitteiden aiheuttamat eristysvauriot ja näistä johtuvat katkot
- Testin aikainen kaksoismaasulku

Kosketusjännitteiltä suojauduttiin maadoittamalla vikakärri, eli laite jolla viat tehtiin, muuntamon maadoituksiin. Maadoittamalla vikakärri varmistettiin, ettei testialueen lähellä synny vaarallisia kosketus- tai askeljäännitteitä. Lisäksi vikojen kytkentäajat pidettiin lyhyenä, jolloin kammiovärinän mahdollisuus on pienempi kuin pidempikestoisilla vioilla.

Testeissä kaikki jännitteelle alttiit osat, eli kaapelipääte ja vikavastus, aidattiin. Aitojen sisäpuolelle mentiin vain maadoittamisen jälkeen ja jännitteelle alttiiden osat todettiin jännitteenkoettimella jännitteettömiksi ennen kuin vikavastus vaihdettiin. Vikakärriä operoi vain yksi henkilö, jolloin mahdollisuus siihen että joku menisi maadoittamattomien vikavastuksien luo oli pieni.

Releiden asettelut tarkastettiin ennen kokeita ja viallisen johtolähdön toiminta-aikaa pidennettiin testien ajaksi. Aseman releet on koestettu kesäkuussa 2015, joten releiden uskottiin edelleen olevan toimintakykyisiä, eikä uudelle koestamiselle ennen kokeita ollut tarvetta. Jos edellisestä koestuksesta olisi ollut pitkä aika, olisi aseman johtolähdöt pitänyt koestaa ennen kokeita.

Mahdollisia eristysvaurioita varten testeihin oli varattu riittävästi sähköverkon käyttöhenkilökuntaa. Mikäli vikoja olisi tullut, vianhoitoon tarvittavaa henkilökuntaa olisi ollut jo valmiiksi oikealla alueella. Testien aikana Eteläportin sähköaseman alueella ei ollut työmaita tai poikkeavia käyttötilanteita, jolloin kaikki rengassyöttömahdollisuudet olivat käytettävissä. Vian sattuessa mahdolliset vialliset verkon osat olisi voitu rajata pois nopeasti.

Testien ajaksi alueella toimivaa teollisuuslaitosta syöttävä johto siirrettiin yksinään aseman toiselle kiskolle, jota syötettiin varayhteydellä toiselta sähköasemalta. Tällä varauduttiin siihen, että asema olisi saattanut tulla testien aikana varasuojalla alas verkosta. Varasuojan toimimisen olisi voinut aiheuttaa tilanne, jossa nollajännite jää värähtelemään. Tällöin olisi varayhteydellä syötetyssä kiskossa säilynyt sähkö, ja asiakkaille olisi saatu palautettua sähköjä varasyöttöyhteydellä, jos päämuuntajaa ei olisi jostain syystä saatu takaisin verkkoon. Tämän takia kokeet tehtiin hieman pienemmällä verkolla kuin mitä Eteläportin alueella normaalisti on.

6.2.2 Vikakärri

Viat tehtiin tyhjiöeristeisellä katkaisijalla, joka oli sijoitettu peräkärriin yhdessä jännite- ja virtamuuntajien kanssa. Laitteisto oli Maviko Oy:n, jossa kärri on tehty insinööryönä. Laite on suunniteltu erityisesti maasulkukokeita varten, mutta laitteistolla voidaan toteuttaa myös oikosulkukokeita. (Toivonen, 2016)

Peräkärriin sisälle oli asetettu Siemens 8DJH –kojeisto. Kojeisto koostui syöttävästä kaapelikojeistolähdöstä, ilmaeristeisestä laskutusmittauskennosta ja katkaisijalähdöstä. Rakennus oli toteutettu niin, että jännitemittaus tapahtuu ennen katkaisijaa. Tämän rakenteen avulla jännitemittaus saadaan sekä ennen vikaa, että vian jälkeen, ja vian jälkeiset värähtelyilmiöt voidaan havainnoida (Toivonen, 2016). Kojeiston keskeiset tiedot on koottu alla olevaan taulukkoon (Siemens, 2016).

Taulukko 12. Maasulkukoejärriin keskijännitekojeiston keskeiset tekniset tiedot (Siemens, 2016) ja (Toivonen, 2016)

Laite	Tyyppi
Virtamuuntajat	400 A/ 5A, 5P/10
Kaapelivirtamuuntaja	4MC4_30 100 A/1 A 5P25
Jännitemuuntaja	4MR14
Jännitemuuntajan toisio	100/ 3V, 20VA / CI. 0.2
Avokolmiokäämin toisio	100 / 3V, 25VA / 3P
Nimellisjännite	24 kV
Laitteiston nimellisvirta	630 A
Kaapeleiden liityntätapa	Liitintyyppi C (EN 50181) ruuviliitoksella M16 (630A)

Kärriössä oli ABB:n REF 630 -rele, jolle tehty logiikka ohjasi katkaisijan auki halutun ajan jälkeen sen sulkemisesta. Maasulkukokeissa käytettyjen vikojen kesto oli noin 300 ms. Tällöin johtojen varaus ehti tasoittua, mutta varalaukaisujen toimintaan oli vielä aikaa. Toinen syy lyhyeen aikaan oli mahdollisten kaksoismaasulkujen aiheuttama vaara. Kaksoismaasulun aikana lähin suojaava laite olisi ollut sähköasemalla, koska releessä ei ollut suojauslohkoja aseteltuina. Tässä tilanteessa verkon suojaus olisi ollut sähköaseman releiden varassa.

Katkaisijan toiminta-ajan pystyi asettelemaan 100 ms välein. Katkaisijan toiminnassa on aina pieni viive, joten vikojen todellinen kesto verrattuna asetteluaikaan mitattiin etukäteen. Mittauksen tulokset on esitelty taulukossa 12.

Taulukko 13. Vikakärryn katkaisijan toimintanopeus eri asetteluarvoilla
(Toivonen, b2016)

Asettelu näytöltä (s)	Mitattu Sverkerillä (s)	
	Testi 1	Testi 2
0	0,054	0,055
0,1	0,157	0,156
0,2	0,257	0,256
0,3	0,356	0,365
0,4	0,455	0,455
0,5	0,55	0,551
0,6	0,65	0,65
0,7	0,751	0,751
0,8	0,856	0,855
0,9	0,961	0,96
1	1,055	1,055

Ennen testien aloitusta JE:n asentajat tarkistivat kärryn virtamuuntajien toiminnan. Tarkastus tehtiin syöttämällä virtamuuntajan läpi tunnettu virta ja tarkastamalla näyttääkö rele samaa lukemaa. Jos kärryn releessä olisi ollut suojauslohkot käytössä, ne olisi koestettu ennen testien aloittamista.

6.2.3 Releasettelut

Testejä varten Eteläportin häiriötallennusten liipaisuasettelua herkenettiin laskemalla nollajännitteen liipaisuraja viiteen prosenttiin.

JE-Siirrolla on kokeiltavana ABB:n REF 630 -monitaajuusadmitanssirele. Rele on ollut toisella asemalla koekäytössä varsinaisen johtolähtöreleen rinnalla tekemässä vioista häiriötallennuksia. Maasulkukokeiden ajaksi rele siirrettiin Eteläportin asemalle vikalähdön releen rinnalle, jolloin voitiin vertailla REF 543 -releen ja uuden REF 630 -releen toimintaa.

Alkuperäinen suunnitelma oli laittaa rele vikalähdön käytössä olevan releen rinnalle ja monistaa mittaussignaali käytössä olevalta releeltä monitaajuusreleelle. Asemalla käytössä olevista vaihevirtasensoreista johtuen, vaihevirtasensoreihin voi kytkeä kerrallaan vain yhden releen. Aseman päämuuntajakennossa virtamuuntajia voitiin käyttää, jolloin monitaajuusreleelle vietiin päämuuntajakennon vaihevirratt. Viiallisen lähdön summavirtamuuntajasta sai useamman virtasignaalin, joten monitaajuusreleelle vietiin viiallisen lähdön nollavirta. Monitaajuusrele mittasi aseman kiskon jännitettä, päämuuntajan vaihevirtoja ja viiallisen lähdön summavirtaa.

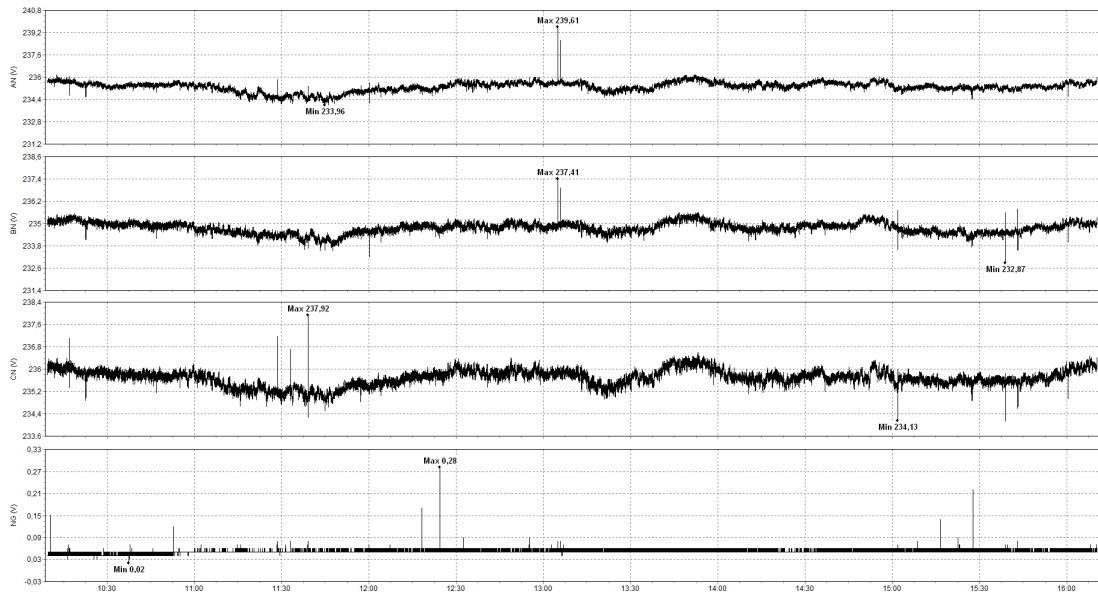
Asemien suojausarvoja muutettiin vikojen ajaksi hieman. Viallisen johtolähdön aika pidennettiin arvoon 2,5 s, jolloin saatiin pienennettyä virhelaukaisujen todennäköisyyttä ja ajettua pidempiä vikoja. Lisäksi varasuojien asettelut tarkastettiin, että ne olivat dokumentoiduissa arvoissaan.

Automaattiset häiriötallenteiden luvut keskeytettiin testien ajaksi. Jokaiselle testille sekä jokaiselle releelle luotiin omat kansiot. Häiriötallenteet luettiin jokaisen testin jälkeen suoraan testikansioon. Näin tekemällä testidata saatiin valmiiksi oikeisiin kansioihin ja datan löytäminen sekä tulkitseminen on jälkikäteen helpompaa.

6.2.4 Muut mittalaitteet

Kokeiden aikana mitattiin PJ-puolen sähkön laatua sekä maadoitettujen osien jännitteitä vikapaikan lähistöltä. Mittaukset toteutettiin kahdella erillisellä mittarilla, joista toisella mitattiin PJ-sähkön kuoppia ja nousuja. Toisella mittarilla mitattiin maadoitusjännitteitä maasulkupaikan läheltä metallisen lyhtypylvään sekä viereisen talon ulkopistorasian maadoituksen jännitteitä. Lyhtypylvään vertailumaa oli pylvään vieressä ja pistorasian vertailumaa oli aluksi maassa pistorasian juurella ja tämän jälkeen se siirrettiin talon tontin rajan takana sijaitsevalle metsäalueelle. Siirto tehtiin, koska haluttiin tietää maasulun aikaisia jännitteitä eri maapotentiaaleilla.

Laatumittaukset toteutettiin Fluke-435 –mittarilla, joka oli aseteltu mittaamaan kuoppia ja kohoumia (*Dips and swells*). Tällä asettelulla johtojen asettelutapana käytettiin kolmivaiheista Y-kytkentää. Mitattuja suureita muuntamon PJ-kiskosta olivat vaihejännitteet ja PEN-kiskosta mitattu PE-johtimen jännite. Kuvassa 27 on yhden päivän mittaus tulokset.



Kuva 27. Fluke-435 mittarilla mitatut PJ-puolen jännitteiden huippuarvot 9.11.2016

Kuvasta 27 nähdään, että oletetusti PJ-puolen jännitteet säilyivät testien aikana normaalilla tasolla. Flukin mittarin yhteenveto on esitetty kuvassa 28.

Instrument Information		General Information			
Model Number	435-II	Recording location	M579		
Serial Number	261331111	Client	JE-Siirto Maasulkukoeket		
Firmware Revision	V05.00	Notes			
Software Information					
Power Log Version	5.2				
FLUKE 430-II DLL Version	1.2.0.12				
Measurement Summary		Recording Summary		Events Summary	
Measurement topology	Wye mode	RMS recordings	87810	Dips	0
Application mode	Dips & Swells	DC recordings	0	Swells	0
First recording	9.11.2016 10:09:31 441msec	Frequency recordings	0	Transients	0
Last recording	9.11.2016 16:15:23 691msec	Unbalance recordings	0	Interruptions	0
Recording interval	0h 0m 0s 250msec	Harmonic recordings	0	Voltage profiles	0
Nominal Voltage	230 V	Power harmonic recordings	0	Rapid voltage changes	0
Nominal Current	300 A	Power recordings	0	Screens	0
Nominal Frequency	50 Hz	Power unbalance recordings	0	Waveforms	0
File start time	9.11.2016 10:09:31 191msec	Energy recordings	0	Intervals without measurements	0
File end time	9.11.2016 16:15:23 691msec	Energy losses recordings	0	Inrush current graphics	0
Duration	0d 6h 5m 52s 500msec	Flicker recordings	0	Wave events	0
Number of events	Normal: 4 Detailed: 6	Mains signaling recordings	0	RMS events	0
Events downloaded	No				
Number of screens	3				
Screens downloaded	No				
Power measurement method	Unified	Scaling			
Cable type	Copper	Phase:			
Harmonic scale	%H1	Current Clamp type	i430TF		
THD mode	THD 40	Clamp range	N/A		
CosPhi / DPF mode	Cos Phi	Nominal range	300 A		
		Sensitivity	x10 AC only		
		Current ratio	1:1		
		Voltage ratio	1:1		
		Neutral:			
		Current Clamp type	i430TF		
		Clamp range	N/A		
		Nominal range	300 A		
		Sensitivity	x10 AC only		
		Current ratio	1:1		
		Voltage ratio	1:1		

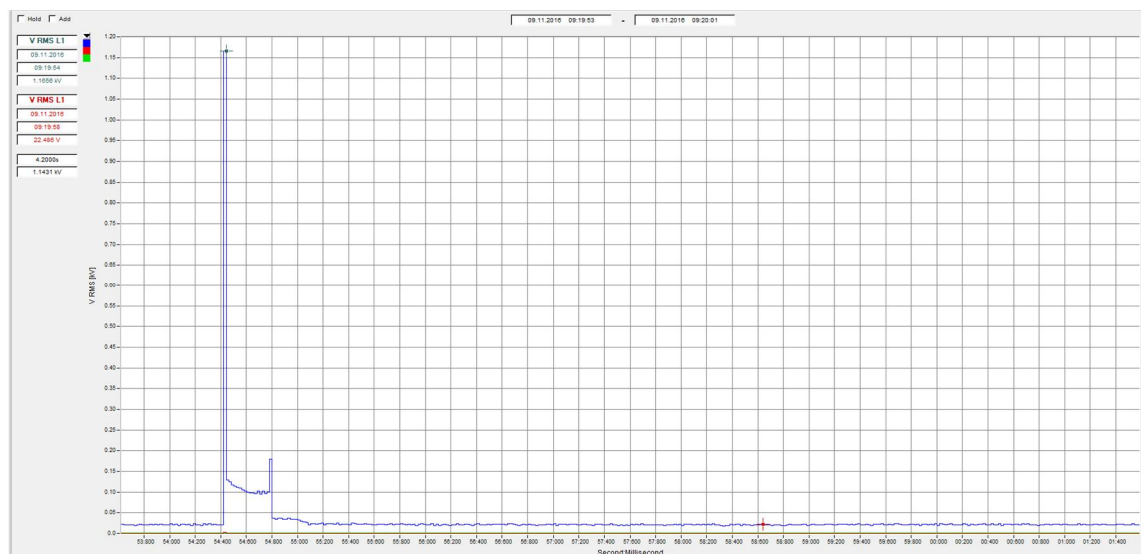
Kuva 28. Fluke M453 mittarin tekemä yhteenveto ja mittarin asetellut

Maadoitettujen osien jännitemittaukset toteutettiin TOPAS-1000 –mittarilla. Topasin tallenteen liipaisun rajana käytettiin nollajännitettä. Nollajännite saatiin maasulkuvaunun jännitemuuntajien avokolmiokytkennästä. Liipaisurajana oli 5 V, jolloin mittauksista tuli tallentua sekä RMS-arvot, sekä jännitteen käyrämuodot. (Pellonpää, 2016) Topas-mittarin mittakanavien tiedot on koottu taulukkoon taulukkoon 13.

Taulukko 14. Topas-1000 mittarin kanavien asettelu

Kanava	Mittauspiste	Kanavan vertailumaa
1	Lähitalon pistorasian maadoitus	Aamupäivä talon pensasaidassa noin 2 m pistorasiasta. Iltapäivä talon takana metsikössä
2	Katuvalopylväs	Pylvään viereinen maa, etäisyys noin 1 m
4	Uo-jännite maasulkukokeäkärlyltä	
5	Maasulkuvirta Pen-kiskoon	

Maasulun aikana vian alussa tapahtuva johtimen varauksen purkautuminen näkyy mitatuissa maadoitusjännitteissä. Testien aikana mitattiin yli 1 kV piikkejä kosketusjännitteessä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 29.



Kuva 29. Testi 17 pistorasian maaliuskan jännite

Kuvasta 29 nähdään, että testien aikana mitattiin yli 100 V maadoitusjännitteitä. 100 V jännite voi olla ihmiselle hengenvaarallinen, jos ihminen altistuu jännitteelle niin, että virta kulkee sydämen läpi. Topas-mittarin liipaisutapa ei ollut toimiva joten kaikista testeistä ei nollajännitteen nousu liipaisut tallennetta. Jatkuva tallentaminen olisi ollut parempi mittaustapa maadoitusjännitteelle.

6.2.5 Vikavastukset

Eri vikavastuksilla tehtävät kokeet toteutettiin käyttämällä vastustornia. Vastustorni koostuu vastuskiekoista, joiden välille on kytketty alumiiniekkoja tasaamaan lämpöä.

Lisäksi alumiinikiekkoihin on porattu reiät kierteineen, jotta niihin voi kiinnittää kaapelipäätteen pultilla. Vikavastuksia on 500 Ω ja 100 k Ω välillä useita eri arvoja. Testeissä käytettiin 500 Ω , 1 k Ω , 3 k Ω , 5 k Ω , 10 k Ω ja 20 k Ω vastuksia. Kaikkia vastuspakan arvoja ei koettu tarpeelliseksi käyttää, sillä maasulun luonne ei merkittävästi muutu vikavastuksen muutoksen ollessa pieni. Vastustornit on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Maasulkukokeissa käytetyt vastustornit

Vasemmanpuolimmainen torni kattaa vastusarvot väliltä 10 k Ω – 100k Ω ja oikeanpuoleinen torni kattaa vastusarvot väliltä 500 Ω – 10 k Ω . Kuvasta poiketen vastuskiekkojen välille oli tehty alumiinistä tuuletusrimoja, jotka keräsivät osan lämmöstä ja luovuttivat sen ulkoilmaan. Vastusten suuren lämpenemän takia viimeiselle mittauspäivälle tehtiin uusi 1 k Ω vastuspakka, jossa kytkettiin rinnan kaksi 2 k Ω vastusta. Uudella vastuspakalla saatiin puolittettua vastusten läpi menevä virta ja lisättyä vastuskiekkojen lukumäärää. Puolittuneesta virrasta johtuen vastuksiin kohdistuu pienempi rasitus. Lisäksi vastuksien massa oli kasvoi, jolloin niiden kyky absorboida lämpöä myöskin kasvoi.

6.2.6 Lämpökamerakuvaus

Testien aikana käytetyn vikavastuksen lämpötilaa seurattiin lämpökameran avulla. Vastuskiekkojen valmistajan mukaan vastusten lämpötila ei saisi jatkuvassa käytössä olla yli 150° C, eikä hetkellisessä käytössä yli 300° C. Suosituslämpötilojen ylityksestä voi seurata vastuskiekkon vaurioituminen tai sen ominaisuuksien muuttuminen. (HVR International, 2013) Käytetty lämpökamera oli Flir Systems Therma Cam p65, jonka mittausalue on -40° C – +120° C.

Kokeiden aikana vastusta kuvattiin lämpökameralla ja lämpötilatietoa käytettiin vikojen keston suunnittelussa. Erityistä huomiota kiinnitettiin pieniresistanssisten testien aikaiseen vastuspakan lämpenemään, jolloin vastuspakka oli pieni. Suurella resistanssilla tehdyissä kokeissa käytetty vastuspakka oli isompi, jolloin lämpöä keräävää massaa oli

enemmän. Vaikka virta on suuriresistanssisilla testeillä pieni, vastuksen yli oleva jännite on lähellä nimellistä arvoa ja vastusten lämpenemä tulee huomioida kaikissa kokeissa.

Jälkeenpäin lämpökameran kuvia tutkittaessa havaittiin, että kameran kelloa ei muistettu asettaa oikeaan aikaan ja tämän takia testiohjelman kellonajoilla ei suoraan löydetä vastaavaa kuvaa. Kun tiedetään suurivirtaisimmat testit ja testissä käytettyjen vastuspakkojen koko, lämpökameran kuvat ja testiohjelma saadaan yhdistettyä.

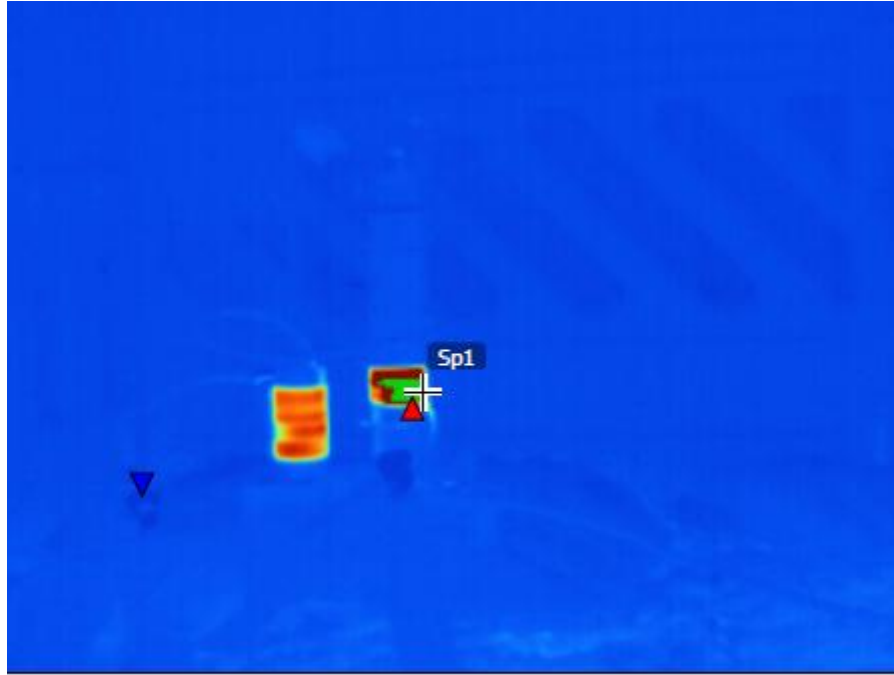
Kameran kuvat syötettiin kameran mukana tulleeseen analysointiohjelmaan, jossa jokaiselle kuvalle saatiin suurin kameran löytämä lämpötila. Ohjelman skaalaus loppui 130°C , joka huomattiin $1\text{ k}\Omega$ vikaresistanssin kokeessa, joka on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. $1\text{ k}\Omega$ testin vastusten lämpenemä.

Kuvasta 32 voidaan erottaa kaksi $500\ \Omega$ vastuskiekkoa, jotka ovat väriltään vihreät. Kuvan punaisesta kolmiosta lämpökamera havaitsi yli 130°C lämpötilan. Myös $1\text{ k}\Omega$ koetta seuranneessa $500\ \Omega$ kokeessa vastus lämpeni yli 130°C .

Kuten edellisessä luvussa todettiin, testien viimeiselle päivälle tehtiin uusi $1\text{ k}\Omega$ vastustorni. Tässä vastuskiekon läpi menevä virta puolittui alkuperäiseen verrattuna. Vastusten lämpenemää rajoitettiin myös lyhentämällä vikojen kestoja 100ms :n arvoon aikaisemmasta 250ms :sta.



Kuva 32. Uuden 1 k Ω vastuksen lämpeneminen

Kuvan 32 kuumin piste on 51 °C, kun alkuperäisellä 1 k Ω vastustornilla lämpötila nousi yli 130 °C. Uutta kahden vastustornin rinnankytkentää voidaan pitää parempana kuin alkuperäistä, yksittäistä tornia.

6.2.7 Turha laukaisu

Testin 11 yhteydessä tapahtui turha laukaisu, kun vikapaikan johtolähtöä syöttänyt katkaisija aukesi sähköasemalla. Testissä tehtiin suora maasulku ilman kelan rinnalla olevaa lisäresistanssia. Turhan laukaisun syitä tutkittaessa häiriötallenteilta havaittiin, että vika oli jo poistunut ja verkko palautunut normaaliksi kun vikakärryn katkaisija aukesi. Vian alusta suojauksen havahtumiseen kului melkein 3 s. Häiriötallenteen digitaalikanavista nähtiin, ettei releen maasulkusuojaus ollut havahtunut.

Laukaisun aiheutti asemalla maasulun varasuojana toimiva EFD-laitteisto. EFD-laitteisto on aseteltu taulukon 14 mukaisesti.

Taulukko 15. EFD- laitteiston asettelut (TRENCH, 2010)

Control		Detection	
Compensation	-2A	Admittance method	0.5s signal delay
Trigger threshold	15%	- Alarm	$Z_f < 25 \text{ k}\Omega$
Trigger delay	60s	- Use of ECI	$V_o < 15\%$
		- Fault	$Z_f < 5 \text{ k}\Omega$
Threshold for R_p	$U_o = 20\%$	Wattmetric method	0.5s signal delay
Home position	ON	- Thresholds	$V_o > 8.5\%$ $I_w_feder > 1A$
Switch off delay	0s	Intermittent method	>0.05s signal delay
Switch off time	0.5s	Additional contact delay	2.5s (trip signal)

EFD-laitteelle on aseteltu kaksi eri suojauslohkoa: admitanssi ja wattmetric. EFD:n admitanssisuoja on aseteltu hälyttäväksi, jolloin katkaisijalle ei välity laukaisukäskyä. Wattmetric-menetelmä on aseteltu laukaisevaksi, jolloin se toimii yksittäisten johtolähtöjen maasulkusuojana (TRENCH, 2010). Näin on saatu releen rinnalle toinen laite joka toimii, mikäli rele ei havahdu vikaan. Toiminta-ajaksi on aseteltu 0,5 s ja tämän lisäksi signaalille on aseteltu erillinen 2,5 s viive.

Selektiivisyys on varmistettu toiminta-ajoilla. Maasulkusuojauksen toiminta-ajaksi on aseteltu johtolähdöillä 0,4 s ja johtolähdöillä, jotka toimivat myös varayhteyksinä, toiminta-aika on 1,2 s. Johtolähtöjen varasuojat on aseteltu 3 s toiminta-ajalle ja aseman varasuojat on aseteltu 5 s. Ennen kokeita ajateltiin, ettei 350 ms kestoilla vioilla voida aiheuttaa varasuojan laukeamista suhteellisen suuren turvamarginaalin takia.

Vastaava suora maasulku samalla verkolla oli tehty viidennessä testissä lisävastuksen kanssa ja tällöin ei ollut ongelmia. Lisävastuksen kanssa tehdyssä kokeessa U_o -jännite tippui nopeammin kuin kokeessa joka tehtiin ilman lisävastusta. Ilman lisävastusta U_o jää värähtelemään ja lisävastuksen kanssa jännite purkautuu vastuksen kautta maahan.

EFD-laitteisto on aseteltu toimimaan niin, että mikäli U_o tippuu alle 15 % EFD selvittää verkon tilan virtainjektiolla, joka vaatii aikaa noin 30 sekuntia (TRENCH, 2010). Tavallisilla releillä vian poistuminen havaitaan U_o -jännitteen laskuna, mutta EFD:llä on laitteen oman laskennan huomattava, että vika on poistunut. Tämä laskenta vaatii virtainjektiota, jonka vaatima aika on suurempi kuin maasulkusuojauksen toiminta-aika. Turhan laukaisun aikana laite aloitti virtainjektiot, mutta ei ehtinyt päätellä onko verkossa vikaa vai ei. Mittauksien aikana maasulun toiminta-aika tuli täyteen ja johtolähtö poistettiin verkosta. Tilanne korjattiin muuttamalla vian poistumisen havainnointi suoraan nolajännitteen laskuun, eikä siihen näkekö EFD vikaa vai ei. (Kaunismäki, 2016)

7. HÄIRIÖTALLENNUSTEN ANALYSOINTIOHJELMA WAVEWIN

Tässä luvussa käsitellään Wavewin-analysointiohjelmistoa. Ohjelman käsittely on jaettu kolmeen osaan: Ensin käydään läpi ohjelman tarjoamia ominaisuuksia, tämän jälkeen määritellään mitä haluttiin saada ohjelman avulla selville ja viimeisenä esitellään toteutustapa siihen, miten ohjelmaan muodostettiin laskentakaavoja.

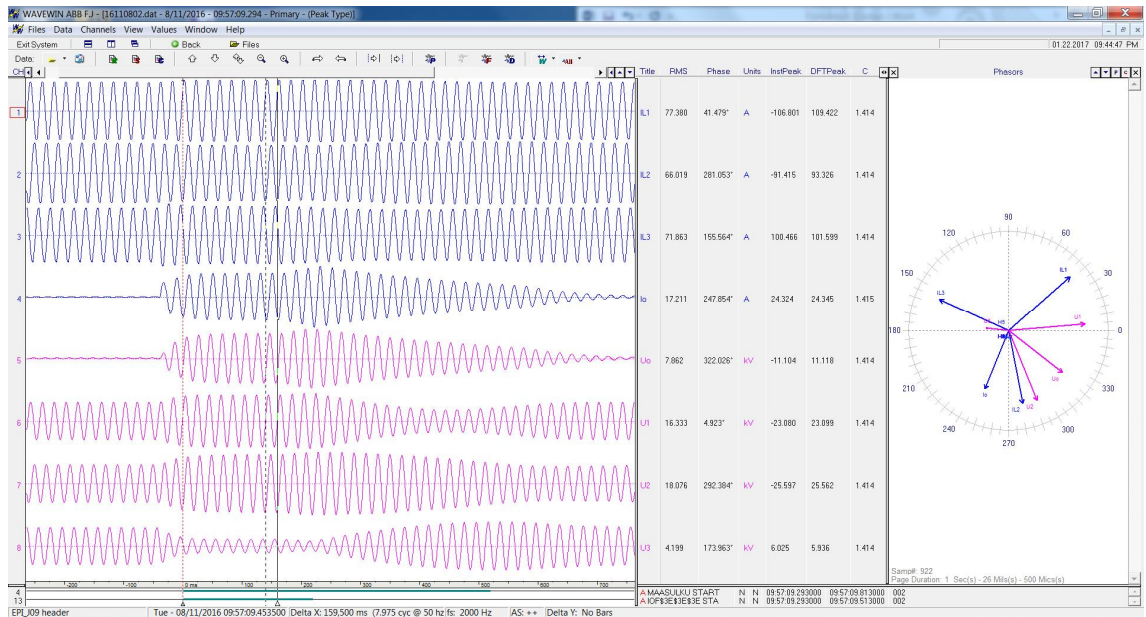
Wavewin-ohjelma tulee ABB:n tuotepaketin mukana. Ohjelma antaa selkeän kuvan häiriötallennuksesta yhdellä silmäyksellä. Ohjelmassa on myös mahdollisuus tehdä pieniä laskentatoimituksia analogiakanavilla.

Työn teon aikana on seurattu Jyväskylän Energian verkossa syntyneitä häiriötallennuksia Wavewin-ohjelmalla. Syntyneiden häiriötallennusten lisäksi on seurattu scadan tapahtumalokia. Tapahtumalokin kautta on helppo päästä selville jos verkossa on tapahtunut jostain mitä tulisi tutkia tarkemmin. Kuitenkin huomattiin, että scadan hälytykset ja häiriötallenteiden liipaisut eivät olleet aseteltu koordinoitusti vaan scada saattoi hälyttää ja tapahtumasta ei ikinä saatu häiriötallennetta.

7.1 Ohjelman ominaisuudet

Wavewin-ohjelma on tarkoitettu tiedostojen hallintaan ja analysointiin. Tässä työssä keskitytään häiriötallennusten analysointiin ja tutkitaan Wavewin-ohjelman analogiakanavien laskentaa (Softstuf, 2013)

Wavewin on ohjelma, jolla voidaan avata comtrade-muodossa olevia häiriötallenteita. Ohjelma piirtää pätkän analogiakanavien verhoikäyrää, erilaisia laskettuja suureita ja vektorikuvan analogiakanavista. Analogiakanavien verhoikäyrän alla on digitaalisignaalien havahtumiset, joista nähdään mitkä suojauslohkot ovat havahtuneet. Kuvassa 38 on kuvankaappaus ohjelmasta.



Kuva 33. Kuvankaappaus Wavewin -ohjelmasta

Ohjelmalla voidaan muokata sekä analogiakanavia, että digitaalikanavia. Analogiakanavien laskennalla voidaan korvata puuttuva kanava tai suureet eivät muuten ole vertailukelpoisia keskenään. Esimerkiksi toisiosuureet voidaan skaalata ensiosuureiksi. Analogiakanavien laskennalla voidaan erotella tietoa mitatuista kanavista ja käyttää tätä tietoa laskentaan. Analogiakanavaoperaattoreita on useita erilaisia, yksinkertaisimmat ovat kanavien yhteen ja vähennyslaskuja ja monimutkaisemmat taas laskevat suoraan jotain tiettyä kuten reaaliarvoja. Ohjelman käyttöohje ei näiden laskentojen suhteen ole kovin laaja jolloin monimutkaiset laskentaoperaattorit jäävät käyttämättä koska ei tiedetä miten ne toimivat. Kuvassa 34 on esimerkkejä analogiakanavien laskentasyntakseista. Syntaksien tarkempi sisältö käydään myöhemmin läpi.

Chan	Titles	Operators
9	lr	+4d/-5d/c/*4@^+88/u=A/
10	lrm	+9m/:^1.41/u=A/
11	lc laskettu	+5*^2.7366/u=A/
12	lf	+9/+11@^+90/u=A/
13	Uvaihe laskettu	-5m/:^1.41/+^11.7/u=V/p=k/
14	VikaZ	+13/:12m/*^1420/u=ohm/

Kuva 34. Wavewin-ohjelman laskentakaavat

Taulukkoon 16 on koottu tässä työssä käytettyjä laskentaoperaattoreita. Lisää operaattoreita ja esimerkkejä löytyy Wavewin-käyttöohjeesta.

Taulukko 16. Wavewin-ohjelmassa käytetyt laskentaoperaattorit

Syntaksi	Selitys
+4	Kanava neljä
-4	Kanava neljän käännettynä
d	Kulma
c	Cosini
s	Sini
@	Kulman kääntö
^4	Reaaliluku 4
+4m/	Laskee kanavan 4 magnitudin
+	Yhteenlasku
-	Vähennyslasku
*	Kertolasku
:	Jakolasku
u=A	Yksikkö on A
p=k	Etuliite on k

Laskennassa ei ole käytössä sulkuoperaattoreita, mikä tekee syntaksien tekemisestä monimutkaista. Syntaksit on kirjoitettava vasemmalta oikealle, mikä estää monimutkaisten kaavojen tekemisen. Lisäksi laskenta ei voi alkaa reaalityylillä, vaan ensimmäisenä on viitattava kanavaan.

Laskennassa on mahdollisuus viitata suureeseen, jota ei ole vielä laskettu. Tällöin laskenta ei anna haluttuja tuloksia. Tähän ongelmaan auttaa samojen kaavojen laskeminen uudelleen. Syy tähän on laskentajärjestyksessä, jossa ohjelma laskee kanavat ylhäältä alaspäin. Esimerkiksi jos laskettavassa kanavassa 9 viitataan kanavaan 10, ei laskenta toimi, koska kanava 9 lasketaan ennen kanavaa 10. Laskemalla uudestaan kanava 9 käyttää ensimmäisen laskennan tuloksia. (Softstuf, 2013)

Monissa maasuluissa näkyy tasakomponentti, joka johtuu kaapelien varauksien muutoksesta. Tämä tasakomponentti aiheuttaa laskennalle ongelmia. Wavewin-ohjelmassa magnitudi-työkalulla voidaan poistaa tasavirtakomponentti. Magnitudi-työkalu muuttaa sini-muotoisen osuuden omaan kanavaansa tasakomponentiksi. Tasakomponentin suuruus on sinisuureen huippuarvon suuruinen.

Wavewin-ohjelma laskee ilmoittamansa RMS-arvot kahden mittausviivan väliseltä alueelta. Maasuluissa on usein katkeilevaa maasulkua, joka näkyy suurina piikkeinä. Piikit haittaavat laskentaa jolloin ohjelma antaa kummallisia RMS-arvoja. Wavewin-ohjelmassa voi muuttaa laskettavan alueen leveyttä. Tällöin yksittäiset piikit eivät haittaa niin paljoa kun laskettava ikkuna on levennetty 3 – 5 sykliin. Ohjelman etuja on, että muokatut kanavat voidaan tallentaa uudeksi tiedostoksi comtrade-muotoon.

7.2 Mitä suureita halutaan saada selville

Tavoite on saada helposti käytettäviä ja maasulun tyyppiä kuvaavia laskentakaavoja Wavewin-ohjelmalle. Käyttötoiminnassa riittää ratkaistun suureen suuruusluokka on oikea, joten työkalun matemaattinen tarkkuus ei ole ratkaisevaa. Laskukaavojen haluttiin antavan tieto vikaantuneesta vaiheesta, todellinen maahan mennyt maasulkuvirta ja arvio vikaimpedanssista.

Työn alussa ajateltiin, että olisi tärkeää tietää, mikä vaihe on viallinen. Ohjelman laskenta toimii niin, että sille on ilmoitettava mitä kanavia lasketaan yhteen. Tällöin tehdessä vaihesuureista riippuvia kanavia, kaavat pitää tehdä kolmeen kertaan. Yksi kaava kullekin vaiheelle. Työssä haluttiin välttää valtavan laskentakaavakokoelman tekemistä, ja kaavat haluttiin mahdollisimman universaaleiksi. Vaihejännite ratkaistiin muodostamalla nollajännitteen avulla laskennallinen vaihejännite.

Maahan mennyt virta, eli todellinen vikavirta I_f koostuu resistiivisestä osasta ja imaginäärisestä osasta. Tämä vikavirta esiintyy vain viallisessa vaiheessa. Terveissä vaiheissa on asemaa kohti suuntautuva reaalivirta ja imaginäärisen virran suunta riippuu viritysteesta. Nämä kaksi terveen vaiheen virtaa haittaavat vikavirran mittaamista. Näistä virroista johtuen releen mittaama nollavirta ei ole sama kuin maahan mennyt vikavirta. Verkon käyttöön halutaan saada selville todellinen maahan mennyt vikavirta. Vikavirta voidaan laskea, jos tiedetään resistiivinen vikavirta ja sammutuksen sivuunviritys.

Maasuluilla vikaimpedanssi rajoittaa maasulkuvirtaa tehden maasulkujen havaitsemisesta vaikeita. Sammutetulla verkolla maan ja vikaimpedanssin yli on vaihejännite, kuten todettiin luvussa 2. Vikaimpedanssi voidaan laskea kun tiedetään vaihejännitteen suuruus vian aikana ja todellinen vikavirta. Tässä käytetään hyväksi laskennallista vaihejännitettä.

7.3 Toteutus

Tässä luvussa esitellään laskentakaavat resistiiviselle virralle, laskennalliselle vaihejännitteelle, arvioidulle kapasitiiviselle virralle, todelliselle vikavirralla ja vikaimpedanssille. Kaavojen luotettavuutta arvioidaan vertaamalla niitä todellisiin tuloksiin.

Häiriötallennusten analysoinnista todettakoon, että mittaustarkkuus vaikuttaa tuloksiin paljon. Lisäksi aaltomuotojen sinimuotoisuus on ratkaisevaa tuloksia laskiessa. Kokeissa, joissa ei ole käytetty vikaresistanssia, aaltokäyrät eivät ole kovin sinimäisiä. Tämä johtuu siitä, että verkossa tapahtuvalle värähtelylle ei ole vaimentavaa resistanssia.

7.3.1 Resistiivisen virran laskenta

Resistiivinen virta on se osuus nollavirrasta, joka on samaan suuntaan nollajännitteen kanssa. Virta on tärkeä, koska moni releen suojauslohko käyttää juuri resistiivistä virtaa vian havaitsemiseen. Resistiivinen virta on laskettu kaavalla:

$$I_R = I_o \cdot \cos\varphi, \quad (13)$$

jossa $\cos\varphi$ on nollajännitteen ja nollavirran välinen kulma. Tämä on muokattu Wavewin-ohjelman ymmärtämään muotoon:

$$+4d/-5d/c/*4@^+88/u=A/$$

Kaavassa lasketaan kanavien 4 ja 5 kulmien erotus (+4d/-5d/) ja otetaan siitä kosini (c/). Tämän jälkeen kulman kosini on kerrottu nollavirralla, eli kanavalla 4, jonka kulmaa on käännetty 88 astetta eteenpäin. Kulmaa on käännettävä, koska muuten resistiivinen virta olisi samansuuntainen nollavirran kanssa. Kulman kääntö on todettu hyväksi +88 asteessa. Kulma ei ole tarkka vaan, on suunnilleen samaan suuntaan nollajännitteen kanssa. Tämä jäljittelee tapaa jolla suunnattu maasulkusuoja I_o laskee resistiivisen virran.

Ires magnitudi -operaattori muodostaa magnitudikuvaajan resistiivisestä virrasta. Operaattori on suoraan Wavewin-ohjelman työkalu, mutta kuvaaja tulee jakaa luvulla 1,41, eli kahden neliöjuurella, jotta suuruus saadaan tehollisarvoina. Magnitudissa kulma ei näytä enää mitään, mutta kuvasta on helppo nähdä resistiivisen virran muutokset, esimerkiksi lisävastuksen kytkeminen.

Taulukossa 10 on vertailtu MatLab-ohjelman antaman resistiivisen virran ja WW:n laskeman resistiivisen virran suuruutta. MatLabilla on laskettu U_o :n ja I_o :n välisestä kulmasta resistiivinen virta. Taulukossa 17 on esitetty 8 eri mittaustulosta erilaisista maasuluista. Taulukkoon on koottu käytetyt nollajännitteen ja nollavirran arvot sekä tiedot MatLabin laskemasta resistiivisestä virrasta. Lisäksi taulukossa on Wavewin-ohjelman laskema resistiivinen virta (Wavewin Ir) ja virrasta muodostettu magnitudi (Irm).

Taulukko 17. Eri testeillä laskennan vertailu

Testi	nro.	Lisävastus	Uo (kV)	Io (A)	Matlab Ir (A)	Wavewin Ir (A)	Irm (A)
Suora maasulku	5	Pois	11,5	36,1 L -81,0°	4,8	5,5 L -2°	4,6
Suora maasulku	5	Päällä	11,4	46,1 L -79,7°	6,5	8,3 L +4°	6,9
10 kohm	6	Päällä	1,9	4,15 L -73,0°	1,3	1,25 L +8°	1,3
Suora maasulku	11	Kytetty pois	11,4	54,7 L -84°	4,0	5,6 L -12°	4,1
10 kohm	12	Kytetty pois	3,0	6,5 L -79,4°	1,0	1,16 L +1,6°	1,2
Alikompensoitu suora	25	Pois	11,5	22,3 L -75°	3,0	5,3 L +5°	3,0
Alikompensoitu suora	25	Päällä	11,5	39,8 L -90°	7,0	8,9 L -10°	6,5
10kohm alikompensoitu	27	Päällä	0,5	1,2 L +82°	0,1	0,119 L +153°	0,10

Taulukon tuloksista huomataan, että molemmat lasketut resistiiviset virrat ovat suhteellisen lähellä oikeaa tulosta. Kuitenkin vaikuttaa siltä, että magnitudi antaa tarkemman tuloksen ja I_r taas näyttää joissain kokeissa noin 20 % suurempaa virtaa kuin pitäisi. Lasketun resistiivisen virran kulma on välillä $-10^\circ - +8^\circ$. Taulukon viimeinen mittaustulos, testin 27 tulos, vaikuttaa siltä, että Wavewin ei pysty laskemaan sivuunviritykseen verkolle tuloksia. Testin nollajännite on ollut niin matalalla, ettei sähköasemalta saatu häiriötallenteita. Tiedot on saatu vikapaikan häiriötallenteesta.

7.3.2 Kapasitiivisen virran arviointi

Maasulkujen aikana kahden terveen vaiheen kapasitiivinen virta häiritsee nollavirran mittausta niin, ettei nollavirta näytä vikavirtaa, vaan yhdistelmän viallisen ja kahden terveen lähdön virroista. I_c laskettu on muodostettu, jotta tiedettäisiin sivuunvirityksen vaikutus maasulkuvirtaan. I_c laskettu on maasulkuvirran imaginäärinen osuus. Laskemiseen pitää tietää kelan sivuunviritys ja nollajännite vian aikana. Imaginäärinen virta saadaan, kun kerrotaan sivuunviritys täyden vaihejännitteen (11 547 V) ja vian aikaisen nollajännitteen suhteella.

$$I_{c \text{ laskettu}} = \frac{U_0}{U_v} I_v \quad (14)$$

Kaava on muutettu Wavewin-ohjelmalle sopivaan muotoon:

$$+5^{*2.771}/u=A/,$$

jossa kanava +5 on nollajännite, joka kerrotaan sivuunvirityksen ja nimellisen vaihejännitteen suhteella. Suhdeluku on tämän kaavan tapauksessa 2,771, joka saadaan, kun jaetaan sivuunviritys 3,2 A nimellisellä vaihejännitteellä 11,547 kV. Taulukkoon 18 on koottu tuloksia maasulkukokeiden eri testeistä. Taulukossa osa testeistä on kahdesti, toisessa lisävastus on vielä päällä ja toisessa se on kytkeytynyt pois. Kelan sivuunviritys on saatu EFD-laitteelta, nollajännite ja nollavirta on luettu häiriötallenteelta ja Wavewin on laskenut arvot I_c ja I_c vaunu. I_c on tässä luvussa esitelty arvio kapasitiivisesta virrasta ja I_c vaunu on vikapaikassa mitatun kapasitiivisen virran määrä.

Taulukko 18. Kapasitiivisen virran arviointi eri vikatilanteilla

Testi	nro.	Lisävastus	Kelan sivuunviritys (A)	Uo (kV)	Io (A)	Ic (A)	Icvaunu (A)
Suora maasulku	5	Pois	-2,5	11,5	36,1 L -81,0°	2,5	1,4
Suora maasulku	5	Päällä	-2,5	11,4	46,1 L -79,7°	2,5	7,2
10 kohm	6	Päällä	-2,5	1,9	4,15 L -73,0°	0,4	0,4
1kohm	7	Päällä	-2,5	7,8	17,2 L -74,0°	1,7	2,5
5kohm	9	Päällä	-2,5	3,4	7,3 L -73,0°	0,7	1,0
Suora maasulku	11	Kytetty pois	-2,7	11,4	54,7 L -84°	2,7	5,2
10 kohm	12	Kytetty pois	-2,5	3,0	6,5 L -79,4°	0,7	0,7
Alikompensoitu suora	25	Pois	-33,0	11,5	22,3 L -75°	33,0	22,7
Alikompensoitu suora	25	Päällä	-33,0	11,5	39,8 L -90°	32,8	25,6
5kohm alikompensoitu	28	Päällä	-33,0	1,0	0,5 L +18,5°	3,0	2,5
Ylikompensoitu suora	33	Pois	31,6	11,4	65,4 L -83°	31,2	28,0
Ylikompensoitu suora	33	Päällä	31,6	11,4	69,2 L -83°	31,2	40,0
5 kohm ylikompensoitu	36	Päällä	31,6	0,9	4,6 L -79°	2,4	2,4

Taulukosta 18 nähdään, että suorilla maasuluilla EFD:n laskema sivuunviritys on samansuuruinen kuin Wavewin-ohjelmalla laskettu arvio. Tästä voidaan päätellä, että kaava laskee suorille maasuluille oikean kapasitiivisen virran. Lasketun arvion lähtöarvona on käytetty EFD:n mittaamaa sivuunviritystä. Vikaresistanssin kasvaessa vikavirta pienenee, jolloin vikavirran kapasitiivisen osuuden tulee myös pienentyä. Normaalilla sivuunvirityksellä vikaresistanssin kasvaessa arvioitu kapasitiivinen virta pienenee kuten pitääkin. Normaalilla sivuunvirityksellä tehdyissä kokeissa arvioidut ja mitatut tulokset ovat likimain samoja ja arvioidut kapasitiiviset virrat (I_c) ovat ampeerin sisällä mitatuista arvoista (Icvaunu). Suorilla maasuluilla arvioitu ja mitattu kapasitiivinen virta eivät kuitenkaan täsmää. Syy tähän voi olla värähtelyssä jota nollapiiriin muodostuu silloin kun piirissä ei ole riittävästi resistanssia. Suorien maasulkujen tallenteiden virta ei ole kovin sinimuotoista joten virhettä aiheutuu myös laskennan epätarkkuudesta.

Ali- ja ylikompensoiduilla verkoilla vikavirran tulisi kasvaa. Suorilla maasuluilla arvioitu vikavirta vastaa hyvin EFD:n ilmoittamaa lukemaa. Kuitenkaan vikapaikassa mitatut (I_{cvaunu}) ja arvioidut (I_c) eivät vastaa toisiaan täysin. Tuloksissa on jopa 10 A eroavaisuuksia. Kuitenkin vikaresistanssin kautta tehdyissä sivuunkompensoidun verkon kokeissa, mitatut ja arvioidut tulokset täsmäävät. Suorilla maasuluilla tehtyjen kokeiden virhe johtuu häiriötallenteiden verhoikäyrien epäpuhtaudesta.

Muita huomattavia asioita testituloksista on nollajännitteen käyttäytyminen. Sivuuunvirityksellä verkolla nollajännite on 5 kV vioilla pudonnut jo 1 kV tasoon kun normaalilla sivuunkompensoinnilla tehdyssä vastaavassa viassa nollajännite on vian aikana 3 kV

7.3.3 Arvio todellisesta vikavirrasta

Todellinen vikavirta on maadoitusjännitteen kannalta tärkeä suure. Se määrää maadoitusjännitteen suuruuden yhdessä muuntopiirin resaltoivan maadoitusimpedanssin kanssa. Tässä on luvussa kerrotaan, miten Wavewin-ohjelmistolle on muodostettu laskenta todellista maasulkuvirtaa varten. Laskenta pohjautuu kaavaan:

$$I_f = I_R + jI_C - jI_X \quad (15)$$

Joka on muutettu Wavewin-ohjelmalle sopivaan muotoon:

$$+9/+11 @ ^{-90}/u=A/$$

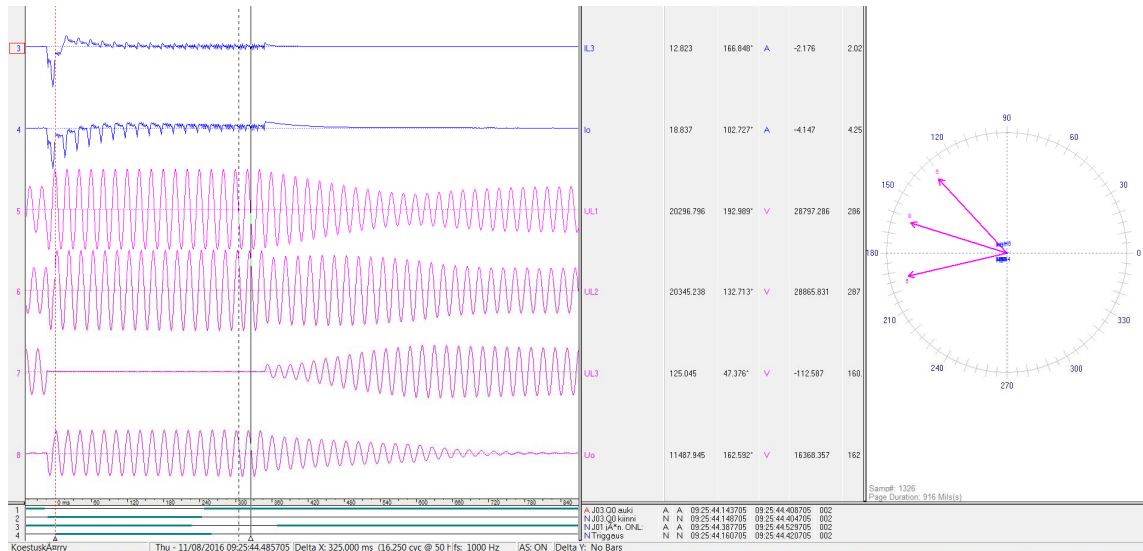
Jossa kanava yhdeksän on I_R ja kanava 11 on kapasitiivisen ja induktiivisen virran erotus. Kanavaa 11 käännetään 90 astetta, jotta saataisiin laskettua virtojen neliöllinen summa.

Maahan mennyt virta on arvio todellisesta vikavirrasta. Siinä käytetään resistiivistä vikavirtaa ja sivuunvirityksen avulla laskettua imaginääristä virtaa. Resistiivinen virta on laskettu kanavaan 9 ja imaginäärinen kanavaan 12. Imaginääristä virtaa käännetään 90 astetta, jotta saadaan laskettua virtojen neliöllinen summa. Taulukkoon 19 on laskettu todellisia vikavirtoja (I_f) ja vertailun vuoksi todellisuudessa maahan mennyt virta vikapainossa (I_{vaunu}).

Taulukko 19. Todellisen vikavirran laskenta maasulkukoetuloksista

Testi	nro.	Lisävastus	Kelan sivuunviritys (A)	Uo (kV)	Io (A)	Uv laskettu (kV)	If (A)	Ivaunu (A)
Suora maasulku	5	Pois	-2,5	11,5	36,1 L -81,0°	0,2	5,5	12,9
Suora maasulku	5	Päällä	-2,5	11,4	46,1 L -79,7°	0,2	8,8	11,7
10 kohm	6	Päällä	-2,5	1,9	4,15 L -73,0°	9,8	1,2	1,0
1kohm	7	Päällä	-2,5	7,8	17,2 L -74,0°	3,8	4,8	4,5
5kohm	9	Päällä	-2,5	3,4	7,3 L -73,0°	8,3	2,1	1,8
Suora maasulku	11	Kytetty pois	-2,7	11,4	54,7 L -84°	0,3	6,7	17,0
10 kohm	12	Kytetty pois	-2,5	3,0	6,5 L -79,4°	8,7	1,3	1,0
Alikompensoitu suora	25	Pois	-33,0	11,5	22,3 L -75°	0,1	33,1	22,9
Alikompensoitu suora	25	Päällä	-33,0	11,5	39,8 L -90°	0,2	35,4	26,4
5kohm alikompensoitu	28	Päällä	-33,0	1,0	0,5 L +18,5°	10,6	2,5	2,5
Ylikompensoitu suora	33	Pois	31,6	11,4	65,4 L -83°	0,2	31,8	29,0
Ylikompensoitu suora	33	Päällä	31,6	11,4	69,2 L -83°	0,3	32,5	41,0
5 kohm ylikompensoitu	36	Päällä	31,6	0,9	4,6 L -79°	10,8	0,8	2,5

Suurilla maasuluilla on jälleen enemmän virhettä kuin vikaresistanssin kautta tapahtuvissa vioissa. Normaalilla kompensoinnilla tehtyjen vikojen tulokset ovat hyvin lähellä oikeaa silloin kun verkossa on ollut resistanssia lisävastuksen tai vikavastuksen muodossa. Sivuuunvirityksellä verkoilla laskenta ei enää anna kovinkaan tarkkoja tuloksia virheen ollessa noin 10 A luokkaa. Tässä laskennassa on käytetty resistiivistä virtaa ja arviota kapasitiivisesta virrasta, joten molempien kaavojen mahdolliset epätarkkuudet nyt kertautuvat. Lisäksi vaunun mittaamisissa virroissa on heittoa silloin kun mitattava virta on suuri. Testissä 33 lisävastuksen kytkeytyminen pois pienentää virtaa 12 A. Lisävastuksen koko on 4 A joten myös virran mittauksessa on epätarkkuutta. Kuvassa 26 on vaunun releen tekemä häiriötalenne testistä 5. Testi oli suora maasulku normaalilla kompensoinnilla.



Kuva 35. Testin 5 häiriötalenne vaunulta

Kuvassa 26 ylin kanava on maihin kytketty vaihe ja toinen virta rengasvirtamuuntajan mittaama I_o . Näiden tulisi olla yhtä suuret, mutta jostain syystä niiden välillä on eroa 6A. Kuvasta nähdään miten yliaaltopitoista ja vääristynyttä on virtamuuntajien mittaama virta.

7.3.4 Laskennallisen vaihejännitteen muodostaminen

Laskennallinen vaihejännite muodostettiin, koska haluttiin muodostaa universaaleja kaavoja, jotka eivät olisi riippuvaisia siitä missä vaiheessa vika on. Vaihejännitteen muodostamisessa on lähdetty yleistyksistä:

$$U_v + U_0 = 11,7 \text{ kV}. \quad (16)$$

Kaavassa siis oletetaan, että nolla- ja vaihejännitteen summa on aina 11,7 kV. ”nimellisjännitteeksi” valikoitui tuo koska keskijänniteverkon jännite on aina korkeampi kuin nimellinen 20 kV, jolloin myös vaihejännitteet ovat vastaavasti hieman korkeampia. 11,7 kV vastaa 20,2 kV pääjännitettä. Kaava esitettiin Wavewin-ohjelmalle seuraavasti:

$$-5m/ : ^{1.41} / + ^{11.7} / u = V / p = k /$$

Kaavassa otetaan magnitudi nollajännitteestä kanavassa 5 ja muutetaan se negatiiviseksi (-5m/). Tämän jälkeen nollajännite on jaettu 1.41, jolloin se on muutettu takaisin tehollisarvoksi ja lopuksi siihen on lisätty valittu vaihejännite 11,7. Jos nollajännite on nolla antaa kaava tulokseksi 11,7 kV ja nollajännitteen kasvaessa vastaava vaihejännite pienee. Taulukkoon 14 on koottu Todellisen vaihejännitteen (U_v) ja lasketun vaihejännitteen (U_v laskettu) suuruudet eri vioilla.

Taulukko 20. Vaihejännitteet vian aikana

Testi	nro.	Lisävastus	U _o (kV)	U _v (kV)	U _v laskettu (kV)
Suora maasulku	5	Pois	11,5	0,2	0,2
Suora maasulku	5	Päällä	11,4	0,2	0,2
10 kohm	6	Päällä	1,9	10,0	9,8
1kohm	7	Päällä	7,8	4,1	3,8
5kohm	9	Päällä	3,4	8,6	8,3
Suora maasulku	11	Kytetty pois	11,4	0,2	0,3
10 kohm	12	Kytetty pois	3,0	9,7	8,7
Alikompensoitu suora	25	Pois	11,5	0,1	0,1
Alikompensoitu suora	25	Päällä	11,5	0,2	0,2
5kohm alikompensoitu	28	Päällä	1,0	11,5	10,6
Ylikompensoitu suora	33	Pois	11,4	0,1	0,2
Ylikompensoitu suora	33	Päällä	11,4	0,2	0,3
5 kohm ylikompensoitu	36	Päällä	0,9	11,6	10,8

Suurilla vikaresistansseilla laskettu vaihejännite on hieman pienempi kuin mitattu vaihejännite. Pienen vikaresistanssin vioissa laskettu vaihejännite on samansuuruinen todellisten vaihejännitteiden suuruiden kanssa. Virhe muodostuu siitä, että todellisuudessa nol-lajännite ja vaihejännite eivät ole samaan suuntaan, kuten tässä on oletettu. Vaihejännite on vian aikana samansuuntainen vikavirran kanssa ja nol-lajännite on teoreettisesta tähti-pisteestä kohti vaihejännitteen päätä. Terveen tilan vaihejännite, nol-lajännite ja vianai-kainen vaihejännite muodostavat kolmion.

7.3.5 Arvion muodostaminen vikavastuksen suuruudesta

Vikavastuksen suuruus haluttiin selvittää, koska se kuvaa sitä minkä tyyppinen maasulku verkossa on tapahtunut. Erilaiset vian aiheuttajat aiheuttavat erilaisia vikoja. Vian etsintää helpottaa jos tiedetään maasulun tyyppi. Esimerkiksi avojohtoverkossa maadoitettuun osaan tapahtunut maasulku on todennäköisesti tapahtunut muuntajan, kaapelipäätteen tai erottimen luona, koska verkossa harvemmin on muita maadoitettuja komponentteja.

Vikavastuksen suuruutta arvioidaan mitatun vaihejännitteen ja arvioidun vikavirran avulla. Laskennassa on käytetty magnitudiarvoja, jolloin mahdolliset kulmavirheet on voitu välttää. Laskennassa on käytetty kuvaa 8, josta nähtiin vikaresistanssin yli olevan vaihejännite. Vikaresistanssin suuruus voidaan laskea Ohmin lailla:

$$Z_f = \frac{U_v}{I_f} \quad (17)$$

Kaava on muutettu Wavewinille sopivaan muotoon:

$$+13:12m/*^1420/u=ohm/,$$

jossa kanava 13 on laskettu vaihejännite ja 12m laskettu todellinen maasulkuvirta. Kanavat pitkää kertoa 1420:llä, koska käytetty jännite on kilovolteina, ja magnitudilaskennassa on muutettava arvo takaisin tehollisarvoksi. Taulukkoon 21 on koottu lasketut aviot vikaresistanssista.

Taulukko 21. Vikavastuksen arviointia Wavewin-ohjelmalla

Testi	nro.	Lisävastus	Kelan sivuunviritys (A)	Uo (kV)	Io (A)	If (A)	Z (Ω)
Suora maasulku	5	Pois	-2,5	11,5	36,1 \angle -81,0°	5,5	49
Suora maasulku	5	Päällä	-2,5	11,4	46,1 \angle -79,7°	8,8	41
10 kohm	6	Päällä	-2,5	1,9	4,15 \angle -73,0°	1,2	7750
1kohm	7	Päällä	-2,5	7,8	17,2 \angle -74,0°	4,8	790
5kohm	9	Päällä	-2,5	3,4	7,3 \angle -73,0°	2,1	3800
Suora maasulku	11	Kytetty pois	-2,7	11,4	54,7 \angle -84°	6,7	1
10 kohm	12	Kytetty pois	-2,5	3,0	6,5 \angle -79,4°	1,3	6500
Alikompensoitu suora	25	Pois	-33,0	11,5	22,3 \angle -75°	33,1	4
Alikompensoitu suora	25	Päällä	-33,0	11,5	39,8 \angle -90°	35,4	5
5kohm alikompensoitu	28	Päällä	-33,0	1,0	0,5 \angle +18,5°	2,5	4000
Ylikompensoitu suora	33	Pois	31,6	11,4	65,4 \angle -83°	31,8	8
Ylikompensoitu suora	33	Päällä	31,6	11,4	69,2 \angle -83°	32,5	8
5 kohm ylikompensoitu	36	Päällä	31,6	0,9	4,6 \angle -79°	0,8	12000

Laskenta tunnistaa suorat maasulut ja osaa ilmoittaa vikaresistanssin suuruudeksi alle 50 Ω . Vikaresistanssilla maasuluilla tulee enemmän virhettä. Kahta poikkeusta lukuunottamatta laskenta näyttää noin 20 % vähemmän kuin pitäisi. Testin 36 tapauksessa laskenta näyttää 7k Ω liikaa ja testin 12 tapauksessa 3,5 k Ω liian vähän. Virheet voivat johtua virtavirheestä häiriötallenteella tai siitä, että kaavaan kertaantuu virhettä eri laskennan vaiheista. Joka tapauksessa vikaresistanssin laskenta antaa oikean suuruusluokan.

7.4 Maasulkukokeiden testitulosten analysointia Wavewin-ohjelmalla

Tässä kappaleessa tarkastellaan Wavewin-analysointiohjelman avulla suojauslohkojen toimintaa. Tarkastelun avulla vertaillaan suojauslohkoja ja tutkitaan miten hyvin Wavewin-ohjelman laskenta toimii. Luvussa 6.2 on esitetty miten eri laskentakaavat on muodostettu ja tarkasteltu niiden oikeellisuutta.

Suojauslohkojen tarkastelu on rajattu kolmeen eri suojauslohkoon:

- Admitanssi
- Suunnattu Io cosiniperiaatteella
- Suunnattu Io kulmaperiaatteella

Wattmetric-menetelmää ei tarkastella koska se ei ole Jyväskylän Energiassa käytössä. Vertailussa tutkitaan vikoja eri vikaresistansseilla ja viritysasteilla. Kahta edellä mainittua parametria muuttamalla tarkastellaan suojauslohkojen herkkyyttä. Herkkyyden mää-

rittely on tehty tarkastelemalla toteutuuko asetellut suojaus ehdot. Vääriä laukaisuja ei tarkastella, eli tutkitaan vaan miten missä testeissä lohkojen asetellut täyttyivät. Lisäksi testeillä ei tarkastella toiminta-aikoja, koska käytetyt keinotekoiset viat ovat lyhyitä.

Admitanssilohko on aseteltu luvussa 3.5 esitellylle laatikkokarakteristikalle. Nollajännitteen asetelluna on 9 % ja virtalaatikon rajat on esitelty seuraavassa taulukossa.

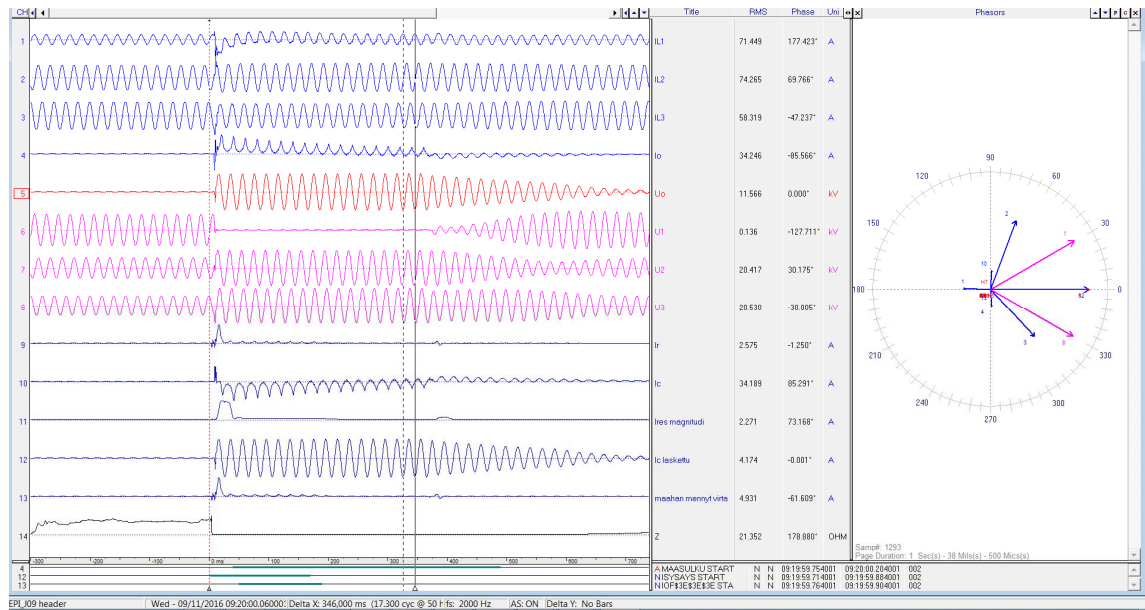
Taulukko 22 Admitanssisuojan asetellut suojien vertailussa

	Y (S)	I (A)
G eteen	0,26	3
G taaksepäin	-1,95	22,5
B eteen	0,09	1
B taaksepäin	-1,95	22,5

Suunnatun I_o :n cosiniperiaatteelle on käytetty Eteläportin aseman suojauslohkoja. Resistiivistä virtaa on oltava yli 2A ja U_o :n on oltava yli 10%. Suunnatun I_o suojan kulmaperiaatteen asetellut ovat olleet 80 astetta ja nollavirran minimi on 2 A. Nollajännite on aseteltu 10%.

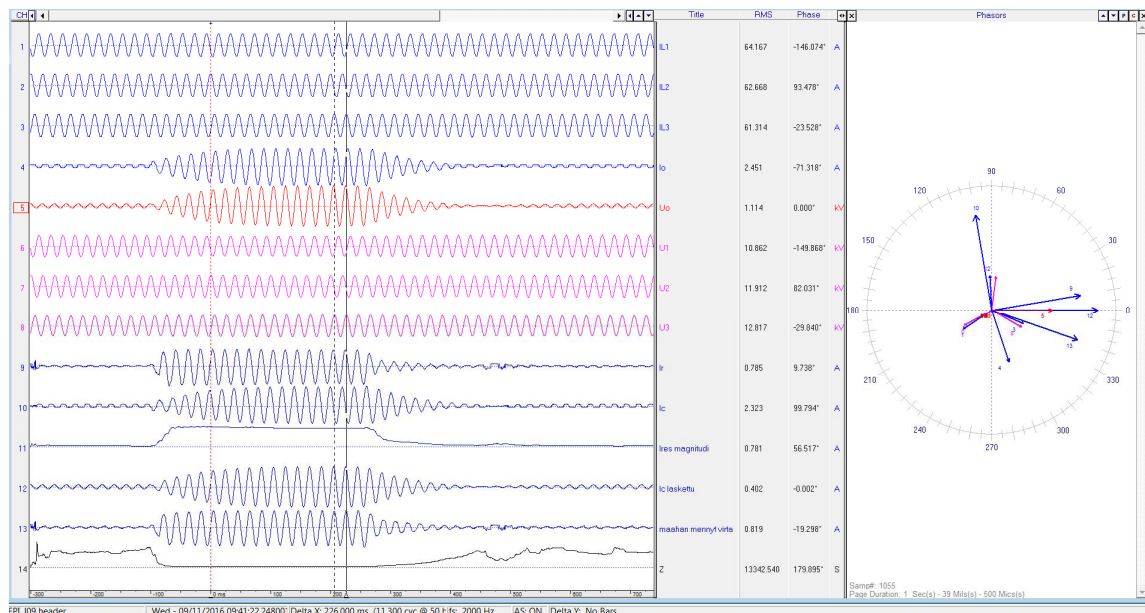
Seuraavaksi on muutamia kuvia Wavewin-ohjelmasta. Ensimmäinen on testistä 17, joka oli suora maasulku normaalikompensoidulla verkolla. Vian aikana nollajännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi ja vian poistuttua se palautuu vähitellen takaisin normaaliksi. Viiallisen vaiheen jännite laskee lähes nolnaan ja kahden terveen vaiheen jännite nousee pääjännitteiden suuruiseksi.

Ires magnitudi kuvaajasta nähdään alussa suuri piikki, jonka jälkeen virta on hyvin tasainen, kunnes virta putoaa hieman 0,2s kohdalla. Ires magnitudi kuvaa resistiivista virtaa ja putoaminen johtuu lisävastuksen kytkeytymisestä pois päältä. Tallenteelta siis nähdään, että aseman lisävastus toimii halutunlaisesti. Laskettu vikaresistanssi on 21 Ω , joka on hyvin lähellä nolaa, joten vikaresistanssin laskenta toimii. Ennen lisävastuksen kytkeytymistä pois resistiivista virtaa on 6,4A ja I_o :n kulma on -84° . Admitanssisuoja ja Suunnatun I_o -suojan cosiniperiaate ovat siis toiminta-alueella, mutta suunnatun I_o -suojan kulmaperiaate ei ole laukaisualueella.



Kuva 36. Häiriötallenne testistä 17

Kuvassa 35 nähdään normaalit 8 häiriötallennekanavaa, joiden lisäksi tallenteella näkyvät kanavat 9-14 on laskettu Wavewin-ohjelman analogiakanavan laskentatyökalun avulla. Kuvassa 36 on esitetty 20kohm testi. Verrattaessa kuvan 36 tallennetta kuvan 35 tallenteeseen nähdään muutamia eroja. Vaihejännitteet eivät suuriohmisilla vioilla muutu juuri ollenkaan. Lisäksi vikavirtojen suuruudet ovat huomattavasti pienempiä. Tässä tapauksessa vain kulmaperiaatteella toimiva suoja on toiminta-alueella.



Kuva 37. Häiriötallenne testistä 18

Muutamille muille testeille tehtiin vastaava vertailu ja tulokset on koottu taulukkoon 23.

Taulukko 23. *Wavewin-ohjelmalla laskettujen arvojen käyttö maasulkusuojauslohkojen vertailuun*

Testi	Tyyppi	Sivuunviritys	U _o (kV)	I _o (A)	I _r (A)	I _f (A)	ADM	Pätölois	kulmaperiaate	Lisäresistanssin tila
17	Suora maasulku	Normaali	11,5	34,4 _L -84°	2,6	5,0	Ei toimi	Toimii	Ei toimi	Lisäresistanssi pois
17	Suora maasulku	Normaali	11,5	66 _L -81	6,4	10,8	Toimii	Toimii	Ei toimi	Lisäresistanssin kanssa
18	20kohm	Normaali	1,1	2,4 _L -71	0,7	0,8	Toimii	Ei toimi	Toimii	Resistanssi päällä
19	10kohm	Normaali		6,6 _L -73	1,8	2,0	Toimii	Ei toimi	Toimii	Resistanssi päällä
23	500 ohm	Normaali	10,7	23 _L -84	2,3	4,7	Toimii	Toimii	Ei toimi	Lisäresistanssi pois
23	500 ohm	Normaali	9,6	20,5 _L -75	5,5	6,3	Toimii	Toimii	Toimii	Lisäresistanssin kanssa
27	10kohm	alikozensoitu	0,5				Ei toimi	Ei toimi	Ei toimi	Lisäresistanssi päällä
28	5kohm	alikozensoitu	1,0	0,5 _L -16	0,5	0,2	Toimii	Ei toimi	Ei toimi	
25	Suora maasulku	alikozensoitu	11,5	22,6 _L -73	5,4	6,1	Ei toimi	Toimii	Toimii	Lisäresistanssi päällä
33	Suora maasulku	ylikozensoitu	11,4	65,6 _L -83	7,5	8,5	Toimii	Toimii	Ei toimi	

Vertailussa on tutkittu vain eri suojauslohkojen herkkyttä, joka antaa hyvän mutta yksipuolisen kuvan suojauslohkojen toiminnasta. Herkkyyden lisäksi toinen ominaisuus, joka vaikuttaa suojauslohkon hyvyyteen on virhetoimintojen mahdollisuus. Kattavan kuvan saamiseksi olisi myös ollut hyvä tehdä maasulkukokeet esimerkiksi 15 A sivuunvirityksellä.

8. YHTEENVETO

Tässä luvussa käydään läpi työn yhteenveto. Yhteenveto on jaettu kolmeen eri osaan liittyen häiriötallennuksiin, Wavewin analysointiohjelmaan ja maasulkukokeisiin. Lopuksi on koottu työn tulosten pohjalta tehtävät toimenpiteet.

8.1 Yhteenveto Häiriötallennuksista

Häiriötallennukset ovat Jyväskylän Energialla aseteltu kaikkiin keskijänniteverkon johdotlähtiin joihin se on mahdollista. Kuitenkin asetellut ovat toisistaan poikkeavia ja asetuissa ei ole yhteistä linjaa. Tässä työssä on dokumentoitu häiriötallenteiden liipaisupeusteet ABB:n REF 543 ja REF 630 releillä. Työssä lisäksi tutustuttiin tapaan siirtää häiriötallenteet releeltä verkkolevylle.

Häiriötallenteet voidaan liipaista analogia- tai digitaalikanavista. Jyväskylän Energialla analogiakanavista liipaisevina on U_0 :n nousu ja digitaalikanavista kaikki käytössä olevat suojauslohkot. Työn aikana huomattiin, että kaikki digitaalikanavat eivät joka kennossa olleet liipaisevana, vaikka niin luultiin. Koestuksien yhteydessä releiden liipaisu ehdot käydään läpi ja mahdollisesti lisätään puuttuvat liipaisu ehdot. Samalla kaikille releille kirjataan aseman nimen lisäksi kennon numero niin, että se tulee häiriötallenteelle näkyviin.

Jyväskylän Energialla häiriötallenteet siirretään releiltä ftp-luennalla käyttökeskukseen, josta tiedostot siirretään move -komennolla verkkolevylle. Ftp-luenta ja siirto verkkolevylle ovat ajastettuja ohjelmia, jotka suoritetaan vähintään joka 6. minuutti. Tallenteiden siirtoa tullaan muuttamaan niin, että pakatut tiedostot puretaan sen jälkeen kun ne on tallennettu verkkolevylle. Tähän saakka Jyväskylän Energian häiriötallenteet ovat menneet samoihin relekohtaisiin kansioihin jo muutaman vuoden ajan. Työn yhteydessä on tehty tallenteiden arkistointitapa, jossa tallenteet vuosittain siirretään arkistoon. Lisäksi mielenkiintoiset vikatapaukset kootaan omaan kansioon myöhempää tarkastelua varten.

Tallenteiden pisin mahdollinen pituus riippuu käytetystä reletyypistä. Vanhoilla REF 543-releillä tallenteiden suurin mahdollinen pituus oli jo käytössä. REF-630 releillä tallenteita pystyi pidentämään. Suositus REF 630 releiden tallenteiden pituudelle 2 s + vika + 3 s. Tällöin saadaan todennäköisesti riittävästi tietoa tapahtumista ennen vikaa ja nähdään vian jälkeinen tilanne varasuojan mahdolliseen toimiseen asti.

8.2 Yhteenveto maasulkukokeista

Marraskuun alussa suoritettiin Jyväskylän alueella noin 50 vian maasulkukokeet. Vikoja tehtiin eri vikaresistansseilla sekä eri verkon kompensoinneissa. Kaikki vian tehtiin sammutetulle verkolle, jonka koko oli noin 85 A. Lisävastuksen kanssa verkon resistiivinen virta on noin 6,5 A, ja ilman lisävastusta noin 2,5A. Testit oli suunniteltu mitattavan ilman lisävastusta ja lisävastuksen kanssa, mutta yhden tarpeettoman laukaisun jälkeen päätettiin luopua ilman lisävastusta tehtävistä kokeista.

Viat tehtiin katkaisijalla, joka on rakennettu peräkärriin varta vasten maasulkukokeita varten. Vikakärri liitettiin yhdeltä muuntamolta keskijänniteverkkoon. Viat arkistoitiin häiriötallenteilla, joita tehtiin sähköaseman- ja vikakärriin suojareleillä. Testien aikana mitattiin lähialueiden maadoitettujen osien kosketusjännitteitä, PJ-verkon sähkön laatua sekä vikavastusten lämpenemää. Testien häiriötallenteet on arkistoitu selkeään hakemistoon, jotta testien tallenteiden käyttäminen on helppoa jälkeenpäin.

Jälkeenpäin tuloksia vertailtaessa olisi ollut hyvä jos olisi mitattu myös 15A sivuunvirityksellä. Tällöin olisi nähty laajemmin miten sivuunviritys vaikuttaa suojiin toimintaan.

Maasulkukokeiden jälkeen on mietitty vastuksen lämpenemää. Osa testeistä tehtiin ajallisesti lähekkäin toisiaan eikä vastus välttämättä ehtinyt jäähtyä. Ei tiedetä miten vastus käyttäytyy lämmitessään joten olisi ollut varminta odottaa, että vastus on täysin jäähtynyt ennen seuraavan testin suorittamista. Onneksi häiriötallennusten luennassa kesti aina muutamia minutteja jolloin vastus ehti kuitenkin jäähtyä.

Maasulkukokeiden tuloksilla tehtiin pieni vertailu eri maasulkusuojauslohkoista. Vertailussa tutkittiin vai toimintaherkkyyttä viallisessa lähdössä ja virhelaukaisujen mahdollisuutta ei tutkittu. Vertailun tuloksena todettakoon, että admitanssirele on hyvin toimintavarma, mutta vaatii riittävästi resistiivistä virtaa toimiakseen. Sama havainto resistiivisestä virrasta voidaan yleistää kaikkiin sammutetun verkon maasulunsuojauslohkoihin.

8.3 Yhteenveto Wavewin-analysointiohjelmasta

Wavewin analysointiohjelmisto antaa selkeän kuvan siitä, mitä viassa on tapahtunut. Yhdellä silmäyksellä näkee analogiakanavat ja suojausien havahtumiset. Ohjelmassa on lisäksi mahdollisuus laskea analogiakanavilla pieniä laskutoimituksia. Työssä tutustuttiin Wavewin-ohjelman analogiakanavien laskentaan ja muodostettiin muutamia laskukaavoja.

Häiriötallenteista laskettiin: resistiivinen virta, sivuunvirityksen aiheuttama maasulkuvirta, todellinen maasulkuvirta, viallisen vaiheen jännite ja vikaresistanssi. Laskukaavat näyttivät kaikki oikeita tuloksia, mutta usein vain suuruusluokaltaan oikein. Ohjelmalla ei päästä eksaktiin tarkkuuteen ja silloin kun käytetään laskentakaavassa laskettua tulosta,

pienet virheet monistautuvat merkittäviksi. Pieniä virheitä syntyy käytettyjen häiriötallennusten verhoikäyrien poiketessa sinimuodosta.

Wavewin on hyvä työkalu häiriötallennusten analysointiin, mutta matemaattisesti tarkkoihin tuloksiin vaaditaan tarkempia laskentaohjelmia.

8.4 Diplomityön pohjalta tehtävät toimenpiteet

Releiden koestuksien yhteydessä häiriötallennusten asetelut käydään läpi ja yhdenmu-kaistetaan. Samalla saadaan releiden liipaisurajat yhteneviksi scadan hälytysrajojen kanssa. Häiriötallenteiden luentaa tullaan kehittämään niin, että häiriötallenteet puretaan pakatuista kansioista.

Scadaan upotettavan häiriötallenteiden tulkintatyökalun kehittämistä jatketaan. Työkalua varten tarvitaan komentoriviltä ohjattava ohjelma. Wavewin ei ole tähän käyttöön sopiva ohjelma, joten seuraavaksi luodaan mathlabille tai muulle vastaavalle alustalle sopivat ohjelmat.

LÄHTEET

ABB Oy, 2000. *TTT-Käsikirja*. 10 toim. Vaasa : Ykkös-Offset Oy.

ABB Oy, a2014. *REF 630 v1.2 Katkeilevan maasulun suoja, INTRPTEF*.

ABB Oy, b2014. *630 series Technical Manual*, ABB.

ABB Oy, 2015. *Admittanssiperusteinen maasulkusuojaus*. Vaasa.

ABB Oy, 2016 . *Powerpoint esitys: Multi-frequency admittance-based earth-fault protection, MFADPSDE*, Vaasa : ABB.

Altonen, J., Mäkinen, O., Kauhaniemi, K. & Persson, K., 2005. *Intermittent Earth Faults-Need to improve the existing feeder earth protection schemes*. Barcelona, CIRED.

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. *Sähköverkot 1*. Toinen painos. Helsinki: Otapaino.

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. *Sähköverkot 2*. Ensimmäinen painos. Helsinki: Otapaino.

Finlex, 2016. *Sähhöturvallisuuslaki 1135/2016*.

Hakonen, J., 2016. *Käyttöinsinööri JE-Siirto Oy* [Haastattelu] (23 11 2016).

HVR International , 2013. *Linear Disc Resistors - Design Parameters*.
Saatavilla: <http://www.hvrint.com/lineardisctherm.htm> [Luettu 25 11 2016].

Hälvä, V., 2013. Diplomityö: DEVELOPMENT OF PROCESS DATA UTILIZATION IN PROACTIVE NETWORK MANAGEMENT. Tampere: TTY

Isomäki, R., 2010. *Opinnäytetyö: Sammutetun keskijänniteverkon kompensointilaitteiston lisävastuksen ohjaus*. Vaasa : Vaasan Ammattikorkeakoulu.

Jalanko, H., 2017. *Duodecim Terveyskirjasto-Sydämen rytmihäiriöt lapsella*.
Saatavilla: http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00503
[Luettu 18 1 2017].

JE-Siirto, a2016. *EFD laitteisto*. Jyväskylä: Ei saatavilla.

JE-Siirto, b2016. Sisäinen materiaali: *JES yleisesittely*. Jyväskylä: JE-Siirto.

JE-Siirto, c2016. *Käytöntuki DMS 600*. Jyväskylä: JE-Siirto

Kaunismäki, V., 2016. *Maviko Oy*. Vaasa: Sähköpostikeskustelu.

Kauppi, M., 2014. *Diplomityö: Muuntamoautomaation hyödyntämismahdollisuudet Elenian jakeluverkossa*, Tampere: TTY.

Kauppinen, S., 2016. *Käyttöpäällikkö JE-Siirto*. Jyväskylä: Sähköpostikeskustelu.

Kauppinen, S., 2017. *Käyttöpäällikkö JE-Siirto Haastattelu*. Jyväskylä.

Laikola, R., 2010. *Opinnäytetyö: Yhtenäistetty Vikatiedon Keruu Suojareleiltä Käyttötukijärjestelmään*, Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.

Lakervi, E. & Partanen, J., 2012. *Sähkönjakelutekniikka*. 3. Painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Lehesvuo, V., 2012. Verkkolehti: *Häiriötallenteet hyötykäyttöön*. Saatavilla: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/19abe4ac26c30422c1257992001fdf5d.aspx> [Luettu 12 1 2017].

Lehesvuo, V., 2016. Senior Application engineer *ABB Oy*. Vaasa : Sähköpostikeskustelu.

Maviko, 2016. *Keskitetty maasulkusuoja EFD*. [Online] Saatavilla: <http://www.maviko.fi/tuotteet/keskitetty-maasulkusuoja-efd/> [Luettu 22 11 2016].

Moisio, M., 2016. *Järjestelmäasiantuntia JE-Siirto Oy* [Haastattelu] (23 11 2016).

Mäkinen, O., 2015. *Kytkeäilmiön mallintaminen PSCAD-Ohjelmalla*, Vaasa: Luottamuksellinen JE-Siirto OY.

Mörsky, J., 1992. *Relesuojaustekniikka*. 2. painos. Otaniemi: Otatiето .

Nykänen, K., 2009. *Diplomityö Vaasan Sähköverkko OY:n Keskijänniteverkon Nykytilan Määrittäminen Sekä Kehittämissuunnitelma Käyttövarmuuden Näkökulmasta*. Lappeenranta, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto .

Partanen, J. & Lakervi, E., 2012. *Sähkönjakelutekniikka*. 3. painos. Helsinki: Otatiето.

Pellonpää, M., 2016. *Excel-taulukko mittarin asettelusta* , Jyväskylä: Sisäinen käyttö- JE-Siirto OY.

Pesonen, M., 2015. *Diplomityö 20 kV Ilmajohtojen Maakaapeloinnin Vaikutus Maasulkusuojaukseen ja Loistehotaseeseen*. Lappeenranta, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto - Sähkötekniikan osasto.

Pitkänen, R., 2016. *Relesuojaus, häiriötallennukset ja maasulut* [Haastattelu] (29 9 2016).

SESKO RY, 2015. *SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

Siemens , 2016. *8DJH keskijännitekojeiston spesifikaatio*, Vaasa : Maviko Oy. JE:n sisäinen käyttö.

Softstuf, 2013. *Käyttöopas: Wavewin File Manager & Analysis- Quick Start*, Philadelphia : Softstuf inc.

Toivonen, M., 2016. *Opinnäytetyö Vikakoestuslaitteiston suunnittelu*, Mikkeli : MAMK, Ei Julkaistu verkossa, JE:n sisäinen käyttö.

Toivonen, M., b2016. *Vikakärren katkaisijan testipöytäkirja* , Vaasa: Maviko Oy. JE:n sisäinen käyttö .

TRENCH, 2010 . *Comissioning report Jyväskylän Energia Keljonkangas*, Jyväskylä: JE:n sisäinen käyttö .

Wahlroos, A., 2013. *JE-Siirto Oy; Sisäinen ohje admitanssisuojauksen asetteluun*, Vaasa: ABB.

Wahlroos, A., a2016. *Powerpoint: Compensated networks and directional earth-fault (E/F) protection fundamentals*. Vaasa: ABB Oy.

Wahlroos, A., b2016. *Powerpoint: Compensated networks and directional earth-fault (E/F) protection New challenges*. Vaasa: ABB Oy.

Verho, P., 2016. *Luentomateriaali: Distribution automation*, Tampere: TTY:n sisäisessä verkossa.

Virtanen, E., 2016. Webinaari: *Sähköverkkojen Kaapelointi ja loisteho*, Vaasa: ABB: <https://attendee.gotowebinar.com/register/530199178618042115>.

LIITE 1

Fluke-mittarin asettetteluraportti

Instrument Information		General Information	
Model Number	435-II	Recording location	M579
Serial Number	26133111	Client	JE-Sirto Maasulkukokeet
Firmware Revision	V05.00	Notes	
Software Information			
Power Log Version	5.2		
FLUKE 430-II DLL Version	1.2.0.12		
Measurement Summary		Recording Summary	
Measurement topology	Wye mode	RMS recordings	87810
Application mode	Dips & Swells	DC recordings	0
First recording	9.11.2016 10:09:31 441msec	Frequency recordings	0
Last recording	9.11.2016 16:15:23 691msec	Unbalance recordings	0
Recording interval	0h 0m 0s 250msec	Harmonic recordings	0
Nominal Voltage	230 V	Power harmonic recordings	0
Nominal Current	300 A	Power recordings	0
Nominal Frequency	50 Hz	Power unbalance recordings	0
File start time	9.11.2016 10:09:31 191msec	Energy recordings	0
File end time	9.11.2016 16:15:23 691msec	Energy losses recordings	0
Duration	0d 6h 5m 52s 500msec	Flicker recordings	0
Number of events	Normal: 4 Detailed: 6	Mains signaling recordings	0
Events downloaded	No		
Number of screens	3		
Screens downloaded	No		
Power measurement method	Unified	Scaling	
Cable type	Copper	Phase:	
Harmonic scale	%H1	Current Clamp type	i430TF
THD mode	THD 40	Clamp range	N/A
CosPhi / DPF mode	Cos Phi	Nominal range	300 A
		Sensitivity	x10 AC only
		Current ratio	1:1
		Voltage ratio	1:1
		Neutral:	
		Current Clamp type	i430TF
		Clamp range	N/A
		Nominal range	300 A
		Sensitivity	x10 AC only
		Current ratio	1:1
		Voltage ratio	1:1
		Events Summary	
		Dips	0
		Swells	0
		Transients	0
		Interruptions	0
		Voltage profiles	0
		Rapid voltage changes	0
		Screens	0
		Waveforms	0
		Intervals without measurements	0
		Inrush current graphics	0
		Wave events	0
		RMS events	0

LIITE 2

Maasulkusuojauslohkojen nimeämistavat

Suojauslohko	IEC 61850	IEC 60617	ANSI/IEEE C37.2
Suuntaamaton nollavirta 1. porras	EFLPTOC	Io>	51N-1
Suuntaamaton nollavirta 2. porras	EFLPTOC	Io>>	51N-2
Suuntaamaton nollavirta 3. porras	EFLPTOC	Io>>>	50N/51N
Suunnattu maasulkusuoja 1. porras	DEFLPDEF	Io>->	67N-1
Suunnattu maasulkusuoja 2. porras	DEFLPDEF	Io>>->	67N-2
Katkeilevan maasulun suoja	INTRPTEF	Io>->IEF	67NIEF
Admittanssisuoja	EFPADM	Yo>->	21YN
Wattmetric maasulkusuoja	WPWDE	Po>->	32N
Monitaajusadmittanssi	MFADPSDE	Io>->Y	67YN
Nollajännitteen ylijännitesuoja	ROVPTOV	Uo>	59G
Harmonisiin yliaaltoihin perustuna nollavirtasuojaus	HAEFPTOC	Io>HA	51NHA

(ABB, b2014)

LIITE 3

koee	pvä	klo	Sääksvuoren maasulkukoikeet	Lisävästus	Huomioitavaa	Verkon koko (A)	Kelan asento (A)	Uo	lv %	lv A	ld %	ld A	Epi J09	Epi J09 kultivian kest.
1	7.11.2016		Normaali	M572										50
2	7.11.2016	15:36	suora	Normaali	M572									200
3	7.11.2016	15:55	10kohm	Normaali	M572									200
4	7.11.2016	16:05	20kohm	Normaali	M572									200
5	8.11.2016	9:22	suora	Normaali	M572									200
6	8.11.2016	9:47	10kohm	Normaali	M572									200
7	8.11.2016	9:56	1kohm	Normaali	M572									200
8	8.11.2016	10:10	3kom	Normaali	M572									200
9	8.11.2016	10:22	5kohm	Normaali	M572									200
10	8.11.2016	10:39	katkeileva	Normaali	M572									200
11	8.11.2016	10:59	suora	Normaali	M572									200
12	8.11.2016	13:49	10kohm	Normaali	M572									200
13	8.11.2016	14:03	katkeileva	Normaali	M572									200
14	8.11.2016	14:26	10kohm	Normaali	M572									200
15	8.11.2016	14:36	5kohm	Normaali	M572									200
16	8.11.2016	14:44	3kohm	Normaali	M572									200
17	9.11.2016	9:19	suora	Normaali	M597									200
18	9.11.2016	9:40	20kohm	Normaali	M597									200
19	9.11.2016	9:45	10kohm	Normaali	M597									200
20	9.11.2016	9:52	5kohm	Normaali	M597									200
21	9.11.2016	10:05	3kohm	Normaali	M597									200
22	9.11.2016	10:11	1kohm	Normaali	M597									200
23	9.11.2016	10:18	500ohm	Normaali	M597									200
24	9.11.2016	10:31-10:44	katkeileva	Normaali	M597									200
25	9.11.2016	11:03	suora	Normaali	M597									200
26	9.11.2016	n11:10:00	20kohm	Normaali	M597									200
27	9.11.2016	n10:18:00	10kohm	Normaali	M597									200
28	9.11.2016	n11:25:00	5kohm	Normaali	M597									200
29	9.11.2016	n11:35	3kohm	Normaali	M597									200
30	9.11.2016	n11:45	1kohm	Normaali	M597									200
31	9.11.2016	n11:57	500ohm	Normaali	M597									200
32	9.11.2016	12:03	katkeileva	Normaali	M597									200
33	9.11.2016	14:00	suora	Normaali	M597									200
34	9.11.2016	14:10	20kohm	Normaali	M597									200
35	9.11.2016	14:17	10kohm	Normaali	M597									200
36	9.11.2016	14:25	5kohm	Normaali	M597									200
37	9.11.2016	14:30	3kohm	Normaali	M597									200
38	9.11.2016	14:35	1kohm	Normaali	M597									200
39	9.11.2016		katkeileva	Normaali	M597									200
40	10.11.2016	9:25	suora	Normaali	M200									200
40	10.11.2016	9:29	1kohm	Normaali	M200									200
40	10.11.2016	9:41	1kohm	Normaali	M200									200
40	10.11.2016	9:44	suora	Normaali	M200									200
41	10.11.2016	12:46	suora	Normaali	M919									200
41	10.11.2016	12:50	1kohm	Normaali	M919									200
41	10.11.2016	12:58	1kohm	Normaali	M919									200
41	10.11.2016	13:02	suora	Normaali	M919									200
42	10.11.2016	14:13	suora	Normaali	M550									200
42	10.11.2016	14:17	1kohm	Normaali	M550									200

testissa A oli heinä vastuksessa