



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Eemi Hyppänen

Keskitetty maasulkusuojaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

7.2.2021

ALKUSANAT

Tämä insinööri työ sai alkunsa kesätyöjaksosta Multirel Oy:ssä. Multirel Oy:llä on vahvaa osaamista maasulkusuojauksesta, ja kesällä tekemäni työtehtävät antoivat hyvän alkusysäyksen aiheeseen tarkempaan perehtymiseen. Työn aihe hahmottui loppukesästä, ja sain pitkälti määrittää sitä mielenkiintoni mukaan, mikä osaltaan lisäsi työn mielekkyyttä. Insinööri työ tekeminen on ollut hyvin palkitsevaa ja opettavaista.

Haluan kiittää työn aiheenrajauksesta ja ohjauksesta erityisesti DI Mikael Forsblomia. Hän on konkreettisesti auttanut ymmärtämään maasulkuihin ja suojauksiin liittyvää teoriaa ja antanut korvaamattomia vihjeitä työn tekemiseen. Kiitän myös Multirel Oy:n muuta suurjännitepuolen tiimiä työhön kannustamisesta ja kaikesta opista sekä tuesta, mitä kuluneen vuoden aikana yrityksessä olen saanut. Kiitos myös pienjännitepuolen työtovereille sopivasta huolenheitosta ja piristyksestä työpäiviin sekä kaikille muille, jotka ovat jollain tavalla olleet osallisena tämän työn tekemisessä. Erityiskiitos vielä Multirel Oy:lle ja toimitusjohtaja Anders Artelle insinööri työn mahdollistamisesta.

Lopuksi haluan kiittää vielä perhettäni tuesta pitkinä iltoina, jolloin olen lukemattomia tunteja opiskellut työn aihetta, etsinyt materiaalia ja tietolähteitä sekä tavannut relemanuuaaleja. Erityiskiitos vaimolleni, että hän on jaksanut hoitaa monen monet illat lastamme, kun itse olen pakertanut koulutehtävien ääressä.

Sallassa 7.2.2021

Eemil Hyppänen

Tekijä Otsikko	Eemil Hyppänen Keskitetty maasulkusuojaus
Sivumäärä Aika	92 sivua 7.2.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkötekniikan insinööri
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	DI Mikael Forsblom, projekti- & myyntipäällikkö Tekn. Lis. Jarno Varteva, Yliopettaja
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Multirel Oy:n kanssa. Tavoitteena oli tutkia ja tarkastella keskitetyn maasulkusuojauksen, EOR-D-releen, etuja verrattuna tavanomaiseen kennokohtaiseen maasulkusuojaukseen. Samalla toteutettiin katsaus erilaisiin maasulkusuojausratkaisuihin ja vertailtiin näiden toimivuutta erilaisissa maasulkutilanteissa.</p> <p>Maasulku on moninainen ilmiö, mihin vaikuttavat hyvin monet eri tekijät. Yksittäinen suojausratkaisu ei ole kaiken kattava, ja useita erilaisia suojausfunktioita käytetään rinnakkain kattavan suojauksen aikaansaamiseksi. Ennen suojausratkaisujen vertailua on syytä tuntea erilaisten suojausfunktioiden toimintaperiaatteita. Tämä työ antaa tiivistetyn katsauksen markkinoilta löytyviin suojausfunktioihin tarkastellen samalla niiden vahvuuksia ja heikkouksia.</p> <p>Suojaustapakatsauksen jälkeen työssä tutustutaan keksitetyyn maasulkusuojausreleeseen, EOR-D-rele, ja tarkastellaan tämän toimintaa tehtyjen kenttäkokeiden pohjalta aidossa maasulkutilanteissa. Kenttäkokeiden perusteella arvioidaan myös suojauksen kattavuutta erilaisissa maasulkutilanteissa verrattuna johtolähtökohtaiseen maasulkusuojaukseen.</p> <p>Teknillisen katsauksen ja kenttäkokeiden perusteella keskitetyn maasulkusuojauksen useiden johtolähtöjen mittausdatan samanaikainen tarkastelu mahdollistaa vikapaikan tehokkaan ja nopean määrittämisen, kun vian paikannus toteutetaan ajamalla verkkoa maasulussa kytkentämuutoksin. EOR-D-releen useiden suojausfunktioiden kokonaisuus takaa suojauksen toiminnan laaja-alaisesti erilaisissa maasulkutilanteissa, ja releen käyttö pääsääntöisesti lisää maasulkusuojauksen toimintavarmuutta sähköasemalla.</p> <p>Releiden laskentatehon kasvu mahdollistaa aina vain tarkempaa vikatilanteiden analysointia, ja uuden sukupolven releet ovat lähes poikkeuksetta vanhoja tarkempia. Releiden suorituskyky on avainasemassa vian havaitsemisessa, mutta oheislaitteita ja suojausasettelujen oikeaa määrittelyä ei sovi unohtaa.</p>	
Avainsanat	Maasulku, keskitetty maasulkusuojaus, relesuojaus

Author Title	Eemil Hyppänen Centralized earth fault protection
Number of Pages Date	92 pages 7 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Mikael Forsblom, M.Sc. (Tech.), Project & Sales Manager Jarno Varteva, Lic. (Tech.), Principal lecturer
<p>This thesis work was made in cooperation with Multirel Oy. The goal was to study and compare centralized earth fault protection with traditional single feeder earth fault protection. Different protection algorithms were also reviewed and the functionality of these algorithms in different earth fault situations was compared.</p> <p>Earth fault is a very complex event, which many different factors affect. Single earth fault protection is not comprehensive solution and multiple earth fault protection algorithms are used in parallel to achieve a pervasive protection. Before evaluation, it is necessary to understand the function principle of protection algorithms concerned. This thesis work gives a compact overview to most protection functions available and studies their strengths and weaknesses.</p> <p>After the summary, the EOR-D-relay will be explained and evaluated based on the practical field tests with real earth fault events. Field tests are also used to evaluate the scope of protection compared with traditional single feeder protection.</p> <p>Technical review and the field tests point out that measurable data from multiple feeders at the same time enable fast and secure faulty feeder determination, when pinpointing is done with switchovers. EOR-D's multiple protection algorithms ensure an exact protection in wide range of earth fault situations. Utilization of EOR-D-relay mainly upgrades accuracy and certainty of earth fault detection in substations.</p> <p>Improvements in computing power of relays provide more and more accurate analyzing of fault events and new generation relays beat the older ones almost without an exception. Performance of the relay is the key to precise detection but peripherals and exact determination of algorithm parameters cannot be ignored.</p>	
Keywords	Earth fault, centralized earth fault protection, relay protection

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Multirel Oy	3
3	Lainsäädäntö ja standardit	4
4	Maadoitus- ja kosketusjännite	5
5	Maasulku	7
5.1	Maasulut ja niihin varautuminen Suomessa	9
5.2	Maasulku maasta erotettussa verkossa	10
5.3	Maasulku sammutetussa verkossa	14
6	Käytössä olevia maasulkujen havainnointimenetelmiä	17
6.1	Nollajännitesuoja ja nollajännitemittaus	18
6.2	Nollavirran lo-mittaus	20
6.2.1	Holmgreen- eli summavirtamittaus	20
6.2.2	Vaihesensorimittaus	21
6.2.3	Nollavirran mittaus summavirta- eli kaapelivirtamuuntajalla	21
6.3	Selektiivinen suojaus	22
6.3.1	Suuntaamaton suoja	22
6.3.2	Suunnattu suoja	23
6.3.3	Wattimetrinen suoja	25
6.3.4	Harmoninen maasulkusuojaus	26
6.4	Transienttisuojaus	28
6.4.1	Transienttien muodostuminen	28
6.4.2	Vanhemmat ”perinteiset” transienttisuojaus	31

6.4.3	Transienttisuoja - REX 640	32
6.4.4	Transienttisuoja - EOR-D	34
6.5	Admittanssisuojaus	41
6.6	Katkeilevan vian maasulkusuojat	46
6.6.1	Perinteinen katkeileva maasulkusuoja	47
6.6.2	A.Eberlen katkeileva q_u^2/q_{ui} -maasulkusuoja	49
6.6.3	Monitaajuusadmittanssisuoja (MFADPSDE)	51
7	Maasulkutilanteiden havaitsemiseen vaikuttavat tekijät	57
7.1	Näytteenottotaajuus	58
7.2	Suojausfunktioiden vertailua	59
8	EOR-D keskitetty maasulkusuojarele	61
8.1	EOR-D-releen vikaloki	63
8.2	EOR-D-releen asettelut	64
8.3	SA1:n maasulkukoetulokset	69
8.3.1	SA1, MSK 1: Komp., 10 k Ω :n vika	71
8.3.2	SA1, MSK 2: Komp., 5k Ω :n vika	75
8.3.3	SA1, MSK 3: Komp., suora maasulku	77
8.3.4	SA1, MSK 4: Suora maasulku, kuormitusvastus viiveellä	79
8.3.5	SA1, MSK 5: Maasta erotettu, 2,5 k Ω :n vika	81
8.3.6	SA1, MSK 6: Komp., 2,5 k Ω :n vika, kuormitusvastus viiveellä	83
8.3.7	SA1, MSK 7: Katkeileva vika	84
8.4	SA2:n maasulkukoetulokset	86
9	Yhteenveto ja pohdinta	88
	Lähteet	91

Symboli- ja Lyhenneluettelo

B_0	Nollasuskeptanssi.
C_0	Verkon yhden vaiheen maakapasitanssi.
C_{0j}	Suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi.
CAP	Kapasitiivinen.
CPS	Cumulative Phasor Summing, kumulatiivinen vektorien summaus.
DFT	Direct Fourier Transform, suora Fourier-muunnos.
dUo	Nollajännitteen vaihtelu prosenteissa.
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos.
G_0	Nollakonduktanssi.
I_{0stab}	Stabiloitu nollavirta.
I_C	Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa.
I_{ce}	Mitattu nollavirta.
I_E tai I_{Ef}	Maasulkuvirta.
I_{efd}	Suojattavan lähdön nollavirta suorassa maasulussa.
I_f	Virta taajuudella (f).
I_L	Kompensointikelan / kuristimen virta suorassa maasulussa.
I_0	Nollavirta.
I_{Rcc}	Kompensointikelan rinnakkaisvastuksen nimellisvirta.
I_{Rn}	Maadoitusvastuksen nimellisvirta.
K	Kompensointiaste.
Komp.	Kompensointi / kompensoitu.
KVR	Kokonaisvastuurakentaminen. Yrityksellä on kokonaisvastuu projektista ja rakennettavasta kokonaisuudesta.
MOC	Minimum operate current, toimintarajavirta.
MSK tai msk	Maasulkukoe.
ODT	Operate delay time, toimintaviive.
PAS-johto	Päällystetty avojohto.
P_0	Pätönollateho.
r	Reduktiokerroin.
r_*	Johtolähtökohtainen reduktiokerroin.
R_0	Vikavirtapiirissä esiintyvä kokonaisresistanssi.
RDT	Reset delay time, resetointiviive.
RES	Resistiivinen.

R_f	Vikaresistanssi.
RMS	Root Mean Square, neliöllinen keskiarvo.
SA 1	sähköasema 1
SA 2	sähköasema 2
U	Pääjännite.
U_E	Maadoitusjännite.
U_{L^*}	Vaihejännite vaiheella (*).
U_0 tai U_0	Nollajännite.
U_v tai U_{ph}	Nimellinen vaihejännite.
VSV	Voltage Start Value, kynnysjännite.
Y_0	Nolla-admittanssi.
Y_0^n	Nolla-admittanssi taajuudella (n).
Y_{0stab}	Stabiloitu nolla-admittanssi.
Y_{bgtot}	Taustaverkon vaiheiden nolla-admittanssien summa.
Y_{cc}	Maadoituksesta muodostuva admittanssi.
Y_{fdtot}	Suojattavan johtolähdön vaiheiden nolla-admittanssien summa.
Y_{osum}	Eritaajuisten admittanssien summa.
Y_{Rn}	Maadoitusvastuksen nolla-admittanssi.
Z_E	Maadoitusimpedanssi.
$\Sigma 3I_0$	Kaikkien sähköasemaa syöttävien johtolähtöjen vaihejohtimien nollavirtojen vektorisumma.
ω	Kulmanopeus.
ωL	Kompensointikelan / -kuristimen reaktanssi.

1 Johdanto

Maasulkuviat ovat tunnetusti yleisin vikamuoto keskijänniteverkoissa, ovatpa ne sitten kaapeli- tai ilmajohtoverkkoja. Maasulut eivät yleensä itsessään estä verkon käyttöä, mutta rajoittavaksi tekijäksi muodostuvat vaarajännitteet, eli kosketus- ja askeljännitteet. Kosketusjännitteen ja maasulkuvirtojen rajoittaminen riittävän pieniksi antavat perusraamit maasulkusuojauksen toteuttamiselle. Verkon luotettavuuden parantaminen ja katkosten vähentäminen ovat olennaisesti riippuvaisia maasulkuvikojen vähentämisestä. Tiukentuneet jakelun laatuveloitteet ja häiriöistä mahdollisesti koituva negatiivinen vaikutus jakeluverkkoyhtiöiden tuottoon osaltaan kannustavat häiriöiden määrän karsimiseen. Toistuvat maasulkuviat aiheuttavat tarpeettomia katkoksia sekä rasitusta jakelujärjestelmässä.

Toimivalla maasulkuvirran kompensointilaitteistolla voidaan vikavirtaa pienentää ja osa vioista saada sammumaan ilman jakelukatkoja. Lisäksi maasulun jälkeen hitaammin palaava jännite pienentää uudelleen syttymisen riskiä. Kattava selektiivinen suojaus yhdessä nopean reagoinnin kanssa lyhentää jäljelle jääviä katkosaikoja, kun vain viallinen johtolähtö voidaan irrottaa verkosta. Jos vika saadaan vielä paikannetuksi johtolähdöllä, voidaan se mahdollisesti kytkentämuutoksilla kiertää ja osa jakelusta siirtää toisen lähdön piiriin jo ennen korjausryhmän ehtimistä paikalle. Yhdistämällä kompensointi ja laadukas maasulkuvikasuojaus yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi voidaan monissa tapauksissa jakeluvarmuutta parantaa merkittävästi.

Maasulkuvikojen moninaiset piirteet ovat merkittävin haaste toimivan suojauksen suunnittelussa ja yksittäinen maasulkusuojausfunktio harvoin pystyy näkemään vikatilanteita riittävän laaja-alaisesti. Katkeilevat maasulkuviat ja niiden selektiivinen havaitseminen ovat ehkä haastavimmat asiat kennoreleiden suojausfunktioille. Kaapeliverkon lisääntyessä näille tyypilliset katkeilevat viat näyttelevät vikatilanteiden määrässä aina vain merkittävämpää roolia.

Kennoreleet tukeutuvat yleensä toiminnassaan vain suojattavan johtolähdön tarjoamaan mittaustataan, vaikka vikatilanne vaikuttaa koko galvaanisesti yhteen kytketyssä verkossa. Vikatilanteen laajempi tarkastelu voisi antaa lisäarvoa ja varmuutta selektiivisyyden toteuttamiseen. Keskitetty maasulkusuojaus tarjoaa mahdollisuuksia

vikatilanteiden laajempaan tarkasteluun, kun suoja-rele voi analysoida samanaikaisesti myös taustaverkosta saatavaa mittausdataa. Tässä työssä tarkasteltava A.Eberle:n EOR-D-rele edustaa tällaista keskitettyä maasulkusuojausratkaisua.

Tämän työn tavoitteena on tarkastella keskitetyn maasulkusuojauksen, mitä tässä työssä edustaa EOR-D-rele, tarjoamia etuja perinteiseen kennokohtaiseen suojaukseen nähden. Keskeisiä kysymyskohtia ovat:

- Tuoko taustaverkosta saatava mittaus-tieto lisäarvoa suojauksen selektiivisyyden varmistamisessa?
- Voidaanko keskitetyllä suojauksella vähentää virhelaukaisuja / -havahtumia?

Edellisten kysymyskohtien ohella työssä paneudutaan erilaisiin suojausfunktioihin ja tarkastellaan niiden toimivuutta erilaisissa maasulkutilanteissa.

Tämä työ tehdään yhteistyössä Multirel Oy:n kanssa. Työssä hyödynnetään Multirel Oy:n asiakasprojekteista vuosien kuluessa karttunutta mittausdataa maasulku- ja koestuskokeista. Suojausmenetelmien vertailu perustuu yritykselle karttuneeseen kokemukseen, tuloksiin sekä yleisesti jaossa oleviin kirjallisiin julkaisuihin. Pääasiallisesti EOR-D-releen toimintaa tarkastellaan syksyn aikana tehtyjen maasulkukokeiden pohjalta.

2 Multirel Oy

Multirel Oy on sähkönjakelu- ja pienjännitete tuotteita maahantuova yritys. Yrityksen merkittäviä liiketoiminta-alueita ovat suurjännitepuolella muuntajat, reaktorit ja kompensointilaitteet ja pienjännitepuolella aurinkosähkötuotteet, erilaiset liittimet ja radiolaitteet. Jälleenmyyjänä toimimisen ohella yrityksen toimintaan kuuluu sähkönjakelun suunnittelu, huolto, konsultointi ja mittauspalvelut. Merkittäviä päämiehiä yritykselle ovat muuntajavalmistaja Koncar D&ST, reaktori ja kompensointilaitteistoja valmistava EGE, mittalaitteita ja erilaisia säätimiä valmistava A-Eberle GmbH sekä liittimiä valmistava Stäubli Electrical Connectors. Näiden ohella yrityksen yhteistyökumppaneina on vielä liuta muita päämiehiä, jotka ovat nähtävissä yrityksen nettisivulla.

Multirel Oy työllistää tällä hetkellä kaikkiaan kuusi vakituista henkilöä. Näistä neljä ovat keskittyneet suurjännitepuolen laitteistoihin. Suurimmat työllistävät osa-alueet ovat muuntajatoimitukset sekä kompensointilaitteistot. Myös reaktoritoimituksia toteutetaan jonkin verran. Osa laitteistotoimituksista on suoraan laitekauppoja, mutta useissa tapauksissa toimitus tehdään ns. KVR-urakkana, jolloin yritys vastaa laitteiston toimittamisesta avaimet käteen periaatteella. Tiivis organisaatio rajoittaa jossain määrin projektien määrää vuosittain, mutta toisaalta se takaa, että toteutettavat kokonaisuudet ovat toimivia ja palvelu laadukasta.

Sähköverkkojen maakaapelointi on nostanut maasulun kompensointilaitteiden markkinoinnin ja näiden laitteiden KVR-projektien toteuttamisen yhdeksi merkittäväksi liiketoiminta-alueeksi yrityksessä. Multirel Oy:llä on vahva asiantuntemus maasulkujen kompensointilaitteista, maasulkusuojusta ja maasulkutilanteiden analysoinnista. Yritys tarjoaakin tällä osa-alueella kattavaa asiantuntemusta ja konsultointia. Laitteistotoimitukset hoidetaan täsmällisesti asiakkaiden toiveet huomioiden. Yrityksen pieni organisaatio on osin etu, sillä laitteiston kokonaisuudesta vastaavat suunnittelijat yleensä myös valvovat toteutuksen, hoitavat käyttöönoton sekä koestukset. Toimitukseen sisältyy kompensointikelan lisäksi tarvittavat oheislaitteet, mahdollinen tähtipistemuuntaja, lisävastus sekä ohjaus/säätäjäkokonaisuus. Laitteisto räätälöidään kullekin sähköasemalle yksilölliseksi toimivaksi kokonaisuudeksi. Usein pakettiin kuuluvat myös maasulkukokeet, joissa laitteiston toimivuutta testataan todellisessa vikatilanteessa.

3 Lainsäädäntö ja standardit

Suomessa sähköturvallisuuslaki yhdessä asetusten sekä viitattujen standardien kanssa määrittää sähkölaitteistojen vaatimukset. Yleisesti sähköturvallisuuslaissa säädetään:

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin, sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti

Jos sähkölaite tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön. (Sähköturvallisuuslaki 1135, 2016: 6§.)

Vikatilanteissa oleellista on, etteivät sallitut kosketus- ja askeljäännitteet sekä virrat ylitä. Pääsääntöisesti vikasuojauksen tulee toimia automaattisesti vian poistamiseksi. Kuitenkin käsin tehtävä vian poistaminen voidaan toteuttaa. Suurjännitestandardin SFS 6001 mukaan:

Kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät on varustettava automaattisella maasulkusuojauksella, jonka avulla maasulku havaitaan ja kytketään pois.

Yleensä maasulku pitää kytkeä pois automaattisesti. Ensimmäisestä maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, kun verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys on tarvetta siirtää etukäteen laadittujen ohjeiden mukaisesti sopivampaan ajankohtaan.

Hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:

- Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaaren on sammuttava itsestään.
- Maasulusta on tullava hälytys, joka saatetaan välittömästi verkon käyttöä valvovan henkilöstön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä, enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pidempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee

jakelumuuntamalla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.

- Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla muualla kuin laajassa maadoitusverkossa pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V.
- Kaksoismaasulkutilanteessa pitää maasulut kytkeä pois.
- Tietoliikenneverkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.

(SFS 6001, 2018: NA.7.1.1.)

Käytännössä siis huolehdittaessa kosketusjännitteen pysymisestä riittävän alhaisena voidaan verkkoa ajaa yksivaiheisessa maasulussa, kun edellä esitetyt ehdot täyttyvät. Esimerkiksi Helen Sähköverkko Oy, minkä jakeluverkko on pääosin maakaapelia, ajaa maasulkuvikatilanteissa verkkoaan maasulussa, kunnes vikapaikka on paikannettu ja mahdollisimman pieni osa verkosta erotettu.

4 Maadoitus- ja kosketusjännite

Maasulkuvian aikana vikapaikasta maahan kulkeva maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikkaan maadoitusjännitteen. Maadoitusjännite muodostuu vikapaikassa maadoitusresistanssin yli. (Lakervi & Partanen 2008: 187.)

Maadoitusjännite lasketaan yksinkertaisesti kaavalla

$$U_E = I_E * Z_E \quad (1)$$

missä,

- I_E = maasulkuvirta
- Z_E = maadoitusimpedanssi.

Maadoitusjännite voi aiheuttaa vikapaikassa ihmiseen tai eläimeen kosketustilanteessa kosketusjännitteen, minkä suuruus voi olla suurimmillaan maadoitusjännitteen suuruinen.

Maadoitusjännitettä määriteltäessä tulee edellä esitetyn yhtälön mukaisesti ensiksi määrittää maasulkuvirta sekä maadoitusimpedanssi. Impedanssi mitataan, tai osin lasketaan ja osin mitataan. Mittaustavat on esitetty standardissa SFS 6001. Maasulkuvirran laskentaan vaikuttaa, ovatko sähköasemalta lähtevien johtolähtöjen reduktiokerroimet yhtä suuret. Reduktiokerroin kuvaa maasulkuvirran pienenemistä, mikä aiheutuu piirissä olevien ukkosjohtimien ja maakaapeleiden metallivaippojen osallistumisesta vikavirran johtamiseen. Reduktiokerroimen määrittämiseen annetaan myös ohjeet standardissa SFS 6001, liitteessä I. Yhtä suurten kertoimien tapauksessa voidaan maasulkuvirta laskea kertomalla kaikkien syöttävien johtolähtöjen vaihejohtimien nollavirtojen vektorisumma reduktiokerroimella. Tällöin yksivaiheisen maasulun maavirta voidaan laskea kaavalla

$$I_E = r * \sum 3I_0 \quad (2)$$

, missä

- r = ukkosjohtimien tai kaapelivaippojen reduktiokerroin
- $\sum 3I_0$ = kaikkien sähköasemaa syöttävien johtojen vaihejohtimien nollavirtojen vektorisumma.

(SFS 6001:2018, 119.)

Jos johtolähtöjen reduktiokerroimet poikkeavat toisistaan, tulee jokaisen johtolähdön maavirta laskea erikseen, minkä jälkeen kokonaismaavirta saadaan laskemalla näiden summa. Yhtälö muuttuu siis muotoon

$$I_E = r_A * 3I_{0A} + r_B * 3I_{0B} + r_C * 3I_{0C} \dots \quad (3)$$

, missä

- I_{0A} = johtolähtö A:n vaihejohtimen (esim. vaiheen L1) nollavirta ja I_{0B} vastaavasti johtolähdön B jne.
- r_A = johtolähdön A ukkosjohtimien reduktiokerroin, r_B vastaavasti johtolähtö B:n jne.
 - HUOM! Mikäli johtolähtö on maakaapeli, korvataan ukkosjohtimen reduktiokerroin kaapelivaipan reduktiokerroimella.

(SFS 6001:2018, 119.)

Maadoitusjärjestelmän suunnittelun vaiheet ja prosessit on kuvattu ja ohjeistettu tarkasti standardissa SFS 6001. Standardi myös määrittää sallitut kosketusjännitteet. Lähtökohtaisesti tavoitellaan tilannetta, missä saatu maadoitusjännite ei ole suurempi kuin kaksi kertaa sallittu kosketusjännite. Mikäli näin ei ole, tarkastellaan, onko kosketusjännitteet sallituissa rajoissa maadoitusjärjestelmän sisällä tai läheisyydessä ja vaikuttavatko siirtyvät potentiaalit kosketusjännitteeseen. Tarvittaessa ryhdytään toimenpiteisiin maadoitusjännitteiden saattamiseksi sallitun tason alapuolelle. Tietyin poikkeuksin voidaan maadoitusjännite jättää korkeammaksi, mutta tämä tarkoittaa järjestelmässä erinäisiä toimenpiteitä, kuten potentiaaliohjausta ja johtolähtöjen maadoittamista.

5 Maasulku

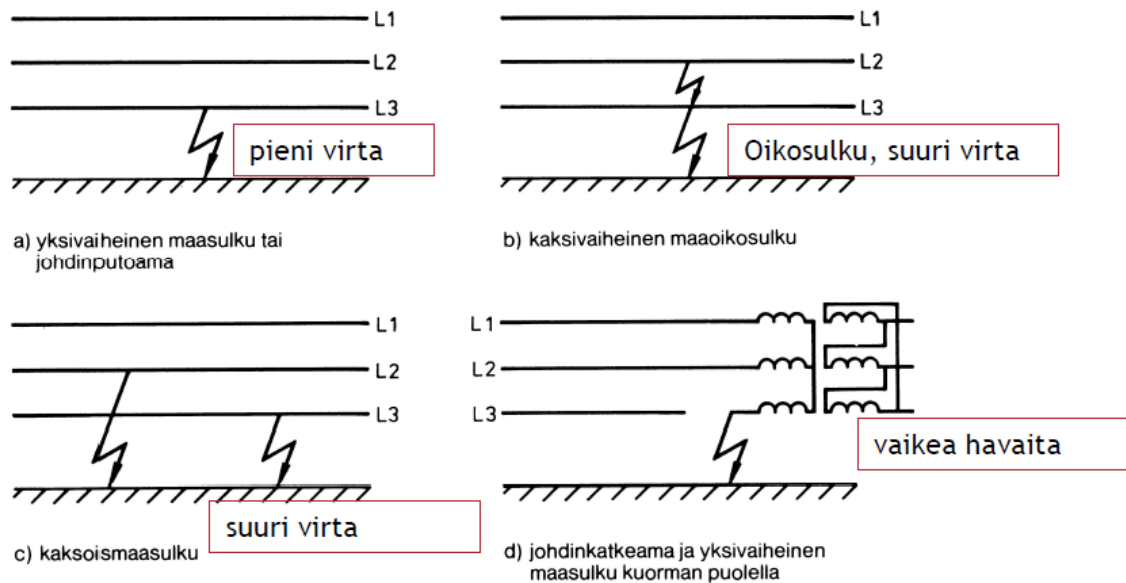
Standardi SFS 6001 määrittelee maasulun seuraavasti:

Maasulku: Vika joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin pienenemisestä alle määrätyn raja-arvon. HUOM. Kahden tai useamman saman järjestelmän vaihejohtimen samanaikaista maasulkua eri pisteissä kutsutaan kaksoismaasuluksi tai useampinapaiseksi maasuluksi. (SFS 6001, 2018: 25.)

Maasulku voi siis olla yksi tai useampivaiheinen. Maasulku voi myös esiintyä katkeilevana, nopealla taajuudella toistuvana maasulkuilmiönä. Käyttömaadoitetussa verkossa, esimerkiksi 400 V:n pienjänniteverkossa, maasulku on yksivaiheisen oikosulun kaltainen, ja vikavirrat voidaan laskea kun piirissä esiintyvät impedanssit tunnetaan. Tällaisessa verkossa oikosulkusuojaus toimii suojausratkaisuna, mikäli vikaresistanssi ei ole liian suuri. (ABB:n TTT-käsikirja, 2000-07: luku 8.1.)

Suomessa siirtoverkot toteutetaan yleensä maasta erotettuina tai sammutettuina verkkoina. Näiden verkkojen tapauksissa maasulun aikana maan kautta sulkeutuvassa piirissä kulkeva maasulkuvirta on huomattavasti pienempi. Jotta maasulkuvirta ja nollajännitteet voidaan määrittää, tulee tuntea koko galvaanisesti yhteen kytketty verkko. (ABB:n TTT-käsikirja, 2000-07: luku 8.1.)

Kuva 1 esittää erilaisia maasta erotetun verkon maasulkutilanteita.



Kuva 1. Erilaisia tavanomaisia maasulkutilanteita (Partanen 2011: 3)

Yleisin maasulkuvika on yksivaiheinen maasulku, mutta myös useampivaiheiset maaoskulut ovat mahdollisia. Maasulkutilanne syntyy esimerkiksi puun osuessa tai kaatuessa avojohtolinjalle tai kaivinkoneen tai vastaavan maansiirtokoneen rikkoessa kaapelin suojauskerroksen.

Kaksoismaasulku muodostuu yleensä seurannaisvikana yksivaiheisesta viasta. Yksivaiheisen vian sattuessa jännitteen huippuarvon kohdalla jännitteen alkutransientti voi aiheuttaa jopa 2,5-kertaisen vaihejännittepiikin ja vian jatkuessakin terveiden vaiheiden vaihejännite on normaalitasoa suurempi riippuen esiintyvistä vikaresistanssista. Kasvaneen nolajännitteen seurauksena verkon eristysresistanssiltaan heikentyneissä kohdissa voi ilmetä uusia seurannaisvikoja. (Mörsky 1992.)

Johdinkatkeaman seurauksena maakaapeliverkoissa vika käyttäytyy kuten maasulkutilanteissakin. Avojohtoverkoissa näin tapahtuu vain, mikäli syöttävän verkon puoleinen vaiheen pää tippuu maahan. Kun syöttävän verkon pää jää ilmaan, ja vain kuorman puoleinen pää tippuu maahan muodostaen maasulun, on myös kuorman impedanssi osa maasulkupiiriä ja maasulkuvirta tippuu ratkaisevasti. Johdinkatkeamat

kuorman puolelta ovatkin yksi vaikeimmin havaittavia vikatilanteita suojauksen kannalta. (Mörsky 1992: 311.)

Koska yksivaiheiset maasulkuviat ovat yleisin vikamuoto ja voivat aiheuttaa seurannaisvikoja, ovat ne keskiössä parannettaessa jakeluvarmuutta. Tästä syystä maasulkuilmiön teoreettisessa käsittelyssä keskitytään pääosin yksivaiheisen maasulkuvian tilanteisiin. Tällaista tilannetta käsitellään tarkemmin luvuissa 5.2 ja 5.3.

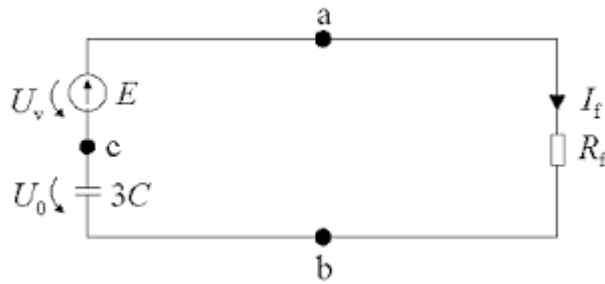
5.1 Maasulut ja niihin varautuminen Suomessa

Suomessa keskijänniteverkot ovat tunnetusti tähtipisteestään maasta erotettuja tai vaihtoehtoisesti sen erityismuotoja eli sammutettuja verkkoja. Sammutetuissa verkoissa verkon tähtipisteeseen kytketään induktanssi, millä pyritään kompensoimaan maasulkuilanteissa verkon kapasitiivisesta reaktanssista aiheutuvuista kapasitiivisia vikavirtoja ja samalla pienentämään verkon kosketusjännitteitä. (Lakervi & Partanen 2008: 182.)

Keskeinen syy maasta erotetun verkkorakenteen käyttöön Suomessa on keskimäärin huonot maadoitusolosuhteet ja tästä seuraavat korkeammat kosketusjännitteet. Maasulut aiheutuvat yleensä vaihejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojavaadoitettuun osaan, jolloin kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta tai suojavaadoituksen resistanssista. Sallitulle kosketusjännitteelle määräytyy virran tai resistanssin perusteella raja-arvo, jolla vältetään hengenvaarallisen sydänkammiovärinän syntyminen sähköskutilanteessa. (Lakervi & Partanen 2008: 182.)

Standardi SFS 6001 antaa ohjeet sallitun kosketusjännitteen tason määrittämiseen. Vaikuttavia tekijöitä ovat kehon kautta kulkeva virta, vian kesto aika sekä kehon kokonaisimpedanssiin vaikuttava virran kulkutie kehossa. Standardin vaatimuksiin voidaan päästä riittävän nopealla vian erottamisella verkosta, maasulkuvirtaa pienentämällä tai maadoituksia parantamalla. (Lakervi & Partanen 2008: 183.)

Jakeluverkkojen maadoitusten riittävä parantaminen tai verkon galvaanisten kokonaisuuksien pilkkominen riittävän pieniksi kokonaisuuksiksi on vain harvoin



Kuva 3. Maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen 2008: 184)

Piirroksessa Theveninin lähde on sijoitettu maasulkupaikkaan. Theveninin lähteen lähdejännite on vioittuneessa vaiheessa ennen vikaa vallinneen vaihejännitteen suuruinen. Virtapiiri muodostuu ainoastaan verkon maakapasitansseista, joiden summaa kuvataan kondensaattorilla $3C$. Maakapasitanssit kytkeytyvät rinnan tähtipisteen ja maan välille, joten kuvassa piste c edustaa verkon tähtipistettä ja kondensaattorin $3C$ yli vaikuttava jännite tähtipistejännitettä. (Lakervi & Partanen 2008: 184.)

Sijaiskytkennän perusteella voidaan maasulkuvirran laskentakaava saattaa muotoon

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3\omega C_0}}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (4)$$

, missä

- C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
- R_f = vikaresistanssi
- U = verkon pääjännite.

Edellä olevalla laskentakaavalla lasketaan siis verkon viallisen vaiheen vikapaikasta maahan kulkeva maasulkuvirta. On huomioitavaa, että yleensä suojauksissa vikavirta mitataan viallisen johtolähdön summavirtana. Summavirtaa mitattaessa itse viallisen johtolähdön maakapasitanssien kautta kulkevat virrat eivät näy summavirrassa, vaan summavirta ilmaisee taustaverkon syöttämän maasulkuvirran suuruuden. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2.)

Taustaverkon aiheuttama vikavirta saadaan siis laskentakaavalla

$$\sum I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_{ef} \quad (5)$$

, missä

- C_{0j} = suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi
- C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi.

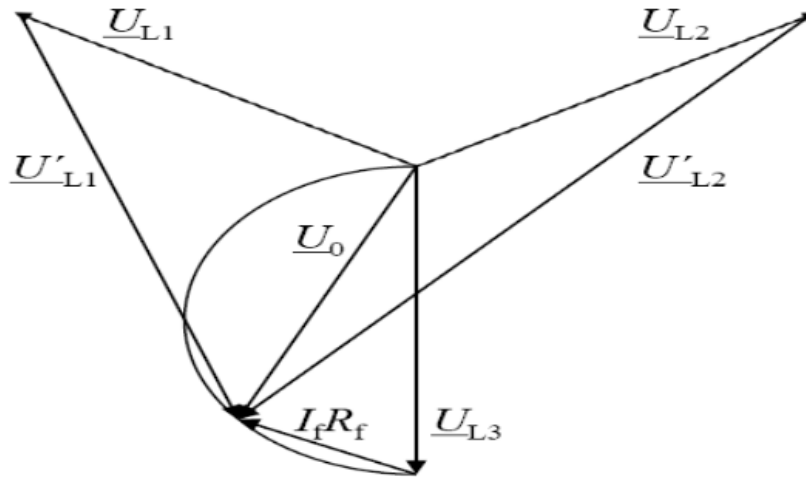
Kaavoissa esiintyvät verkon maakapasitanssit voidaan laskea, kun tiedetään verkon galvaanisesti yhdessä olevat johtopituudet sekä johtimien tyypit. Johtimille ilmoitetaan kapasitanssiarvot kilometriä kohden. Maakaapeleilla kapasitanssiarvot kilometrille ovat moninkertaiset verrattuna ilmajohtoihin. Kaapelin kapasitanssiarvoon vaikuttaa huomattavasti kaapelin rakenne, joten arvo tulee tarkastaa aina tyyppikohtaisesti. Ilmajohdoilla kapasitanssiin vaikuttaa linjan orsirakenne. Yleensä ilmajohdoille saadaan kuitenkin riittävän tarkka tulos käyttämällä keskimääräistä kapasitanssiarvoa 6 nF / km / vaihe. (Lakervi & Partanen 2008: 186.)

Maasulkuvirta aiheuttaa vaiheiden välille myös jännite-epäsymmetrian, jolloin verkon tähtipisteen jännite poikkeaa maan potentiaalista. Syntynyttä jännitettä tähtipisteen ja maan välillä kutsutaan ns. nollajännitteeksi. Tämä jännite muodostuu maasulkuvirran kiertäessä maakapasitanssien kautta. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2.)

Nollajännite voidaan laskea kaavalla

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C_0} I_{ef} \quad (6)$$

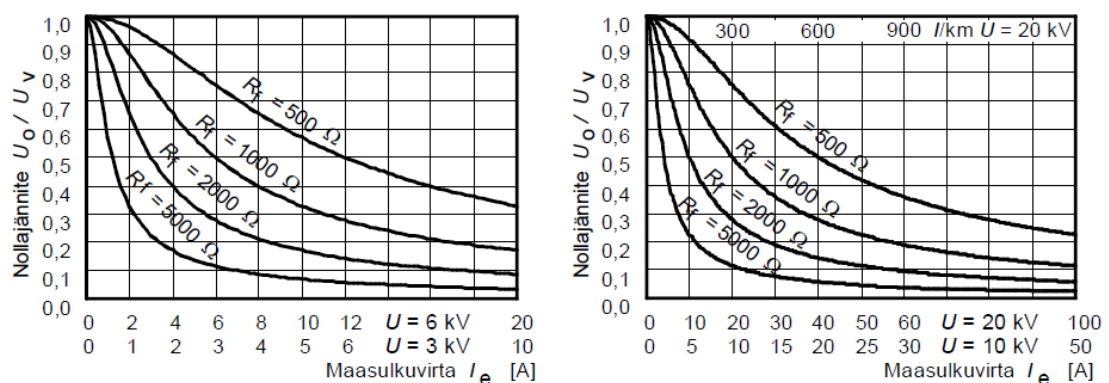
Nollajännite riippuu ennenkaikkea vikaimpedanssin suuruudesta. Jos vikaresistanssia ei ole, kutsutaan tilannetta tällöin suoraksi maasuluksi ja nollajännite yksivaiheisessa maasulussa kasvaa tällöin vaihejännitteen suuruiseksi. Vastaavasti terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten kasvavat pääjännitteiden suuruiseksi. Jännitteiden muutosta havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Jännitteet yksivaiheisen vikaresistanssia sisältävän maasulun aikana. (Lakervi & Partanen 2008: 182)

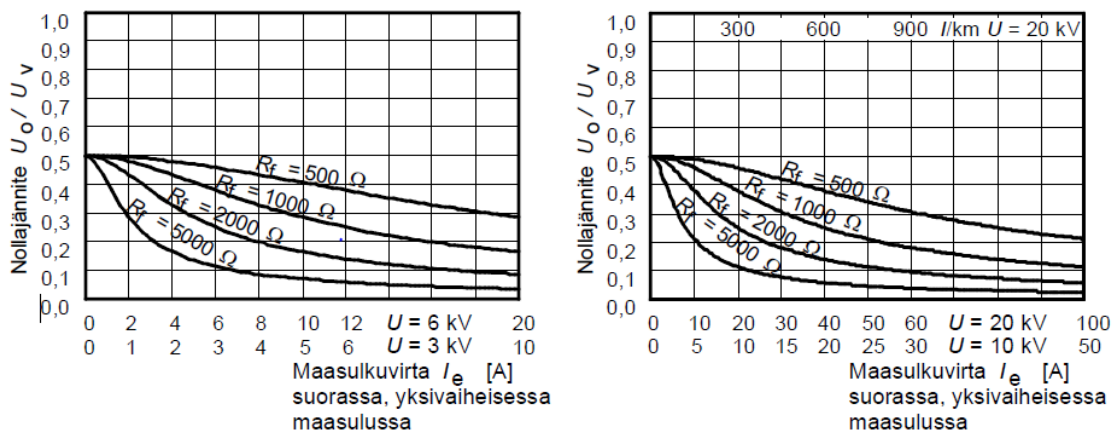
Galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus ja siitä aiheutuva maakapasitanssi on toinen määräävä tekijä nollajännitteen ja maasulkuvirran muodostumisessa. Verkon pituuden kasvaessa maasulkuvirta kasvaa, mutta nollajännite vastaavasti pienenee, mikäli maasulku tapahtuu vikaresistanssin kautta. Suorassa maasulussa verkon pituus vaikuttaa nollajännitteeseen verrattain vähän, mutta nollavirtaan merkittävästi.

ABB:n TTT-käsikirjassa on kuvattu taulukoin nollajännitteen käyttäytymistä muutamilla vikaresistanssin arvoilla seuraavasti:



Kuva 5. Vikaresistanssin vaikutus nollajännitteen suuruuteen 3 ja 6 kV sekä 10 ja 20 kV verkoissa yksivaiheisessa maasulussa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2)

Kuten edellisestä kuvasta havaitsemme, vikaresistanssin pienetessä käyrä lähestyy vaihejännitteen suuruutta. Seuraavassa vielä tilanne kaksoismaasulussa:

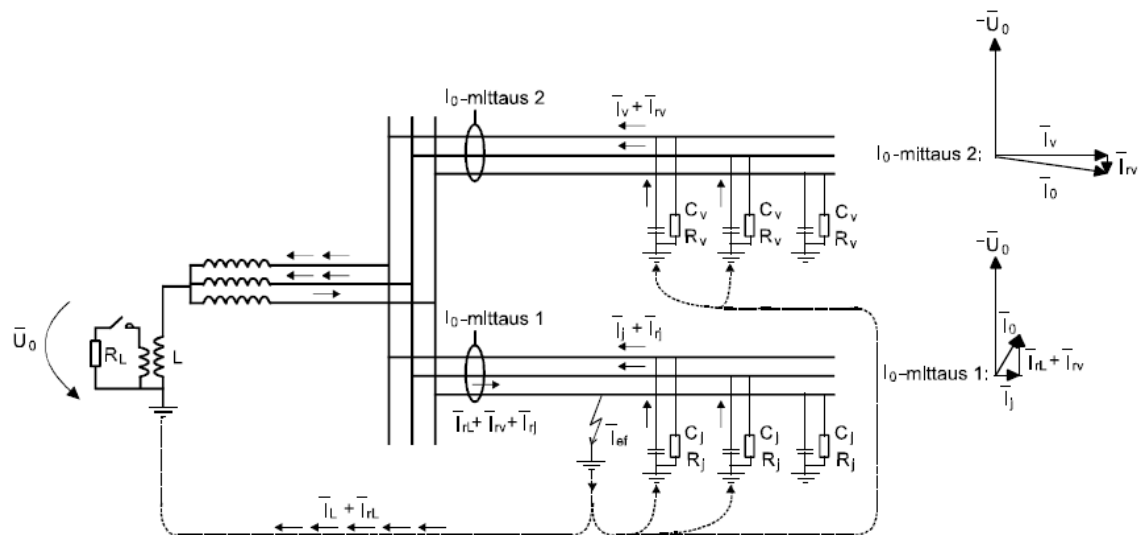


Kuva 6. Nollajännite kaksoismaasulussa 3 ja 6 kV:n sekä 10 ja 20 kV:n verkoissa. Kuvaajien tilanteissa vikaresistanssit vaiheilla ovat yhtä suuret (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2)

Kuten havaitsemme, kaksoismaasulussa tilanne hieman poikkeaa yksivaiheisesta maasulusta. Kaksoismaasulussa nollajännite saavuttaa pienimmän arvonsa, kun vikaresistanssit ovat yhtä suuret. Nollajännite voi maksimissaan saavuttaa puolet vaihejännitteen arvosta. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2.)

5.3 Maasulku sammutetussa verkossa

Sammutetussa verkossa maakapasitanssien aiheuttamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa rajoitetaan kytkemällä kapasitanssien rinnalle verkon tähtipisteeseen niin kutsuttu Petersenin kela eli sammutuskuristin, mikä aiheuttaa maan kautta yhteydessä olevaan vikavirtapiiriin vastakkaissuuntaista induktiivista virtaa ja näin virrat kumoavat toisiaan vikapaikassa. Jos kapasitiivinen ja induktiivinen virta ovat yhtä suuret, kumoavat ne toisensa täysin. Tätä tilannetta kutsutaan täydeksi kompensoinniksi ja verkossa vallitsee niin kutsuttu resonanssitila. Resonanssitilassa vikavirta koostuu vain piirin resistiivisistä häviöistä eli pätövirrasta ja saavuttaa pienimmän arvonsa, mutta vastaavasti nollajännite kasvaa vikatilannetta vastaavaan huippuarvoonsa. Kuva 7 havainnollistaa keskitettyä maasulkuvirran kompensointia ja tällaisessa tilanteessa maasulun aikana muodostuvia vikavirtoja.



Kuva 7. Maasulkuvirrat ja jännitteet keskitetyllä maasulkuvirran kompensoinnilla toteutetussa verkossa. Osoitinpiirroksessa positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2)

Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti tai hajautetusti, yli-, ali- tai täytenä kompensointina. Menneinä vuosina kompensointi on yleensä toteutettu joko hieman yli- tai alikompensoituna verkon epäsymmetrisyyden takia, jotta terveen tilan nollajännitteet eivät nouse liian korkeiksi. Kaapeliverkkojen lisääntymisen myötä epäsymmetria on kuitenkin vähentynyt, joten nollajännitteen nousu terveessä tilassa ei ole enää merkittävä ongelma. Kompensointi on yleensä järkevää toteuttaa joko hieman yli- tai alikompensoituna, ettei resonanssitilassa mahdollisesti muodostuvia korkeita jännitepiikkejä, mitkä saattaisivat vahingoittaa laitteistoa, pääse syntymään.

Kompensoinnin määrää kuvataan kompensointiasteella K . Verkko on ylikompensoitu K -arvon ollessa yli yksi ja alikompensoitu sen ollessa alle yksi. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2.)

Kompensointiaste voidaan laskea kaavalla

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (7)$$

, missä

- I_C = verkon kapasitiivinen maasulukuvirta suorassa maasulussa

- I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa.

Vikapaikasta läpi kulkeva maasulkuvirta voidaan kompensoidussa verkossa laskea kaavalla

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1+R_0^2(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L})^2}}{\sqrt{(R_f+R_0)^2+R_f^2+R_0^2(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L})^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

, missä

- ωL = kompensointikuristimen reaktanssi
- R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteen redusoitu kokonaisresistanssi
- R_f = vikaresistanssi.

Nollajännite on kompensoidussa verkossa maasulkuvirran sekä rinnankytkennästä muodostuvan impedanssin tulo. Impedanssi muodostuu verkon maakapasitanssista, kuristimen impedanssista sekä häviöresistanssista. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.2.)

Nollajännite saadaan kompensoidussa verkossa laskettua kaavalla

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{R_0})^2+(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L})^2}} I_{ef} \quad (9)$$

Vikaresistanssin kasvu vaikuttaa nollajännitteeseen ja maasulkuvirtaan niitä pienentävästi. Pieni vikavirta ja nollajännite tuottavat haasteita monien tavanomaisten maasulkusuojien toiminnalle verkon vikaresistanssin ollessa lähellä verkon normaalitilan vuotoresistanssia. Tällaisia tilanteita voivat olla kuivan puun nojaaminen avo- tai PAS-johdon tai PAS-johdon tippuminen maahan. Näiden vikojen vikaresistanssit ovat yleensä 10 – 100 kΩ. (Lakervi & Partanen 2008: 186.)

Maasulkuvirran reaktiivisen osan pienentäminen kompensoinnilla voi vaikuttaa ratkaisevasti valokaarivikojen itsestään sammumiseen, jolloin pika- ja aikajälleenkytkentöjen määrää voidaan saada tiputettua. Reaktiivisen osan kompensoinnin jälkeen verkoon jää jäännösvikavirta, mikä koostuu resistiivisestä pätövirrasta ja kompensointiasteesta riippuen osin pienestä reaktiivisesta vikavirrasta. Koska valtaosa reaktiivisesta virrasta kompensoidaan, keskittyvät suojausratkaisut kompensoidussa verkossa yleensä resistiivisen pätövirtakomponentin tarkkailuun. Tarvittaessa riittävä pätövirta suojauksen toiminnalle voidaan varmistaa kytkemällä kelan rinnalle pätövirtaa lisäävä kuormitusvastus.

6 Käytössä olevia maasulkujen havainnointimenetelmiä

Yleisin maasulkuvika on yksivaiheinen maasulku. Tällaiset viat aiheuttavat usein sen verran pieniä vikavirtoja, muutamia ampeereja, ettei tavallinen ylivirta- ja oikosulkusuojaus sovellu vikojen havaitsemiseen. Tästä johtuen toimivan maasulkusuojausten aikaansaaminen vaatii erillistä maasulkusuojausta. Yleensä maasulkusuojaus jakeluverkkoratkaisuissa on vain yksi suojauskarakteristiikka lisää johtolähtöjen monitoimisuojaureleissa, mutta myös erillisiä suojaustapoja, kuten keskitettyä suojausta voidaan käyttää. Releille voidaan määrittää erilaisia suojaortaita ja releestä riippuen maasulkujen havainnointiin voi olla useampia erilaisia havainnointimenetelmiä. Pääasiassa suojaustoiminnot perustuvat maasulkutilanteessa muodostuvien nollajännitteen ja nollavirran mittauksiin ja niihin perustuviin laskenta-algoritmeihin.

Suojaustavat voidaan jakaa suuntaamattomiin, suunnattuihin sekä katkeilevien vikojen maasulkusuojiin. Näistä suuntaamaton suojaus toimii yleensä ns. varasuojana ja suunnattua suojausta käytetään pääasiallisena suojausportaana sen mahdollistaman tarkemman vikojen rajausmahdollisuuden vuoksi. Yksinkertaisesti selitettynä johtolähtöjen suuntaamattomat maasulkusuojat laukeavat aina nollavirran tai nollajännitteen kasvaessa yli määritetyn suojausrajan, mutta suunnattu suojaus huomioi myös vikavirran kulkusuunnan vertaamalla nollavirran ja -jännitteen välistä vaihekulmaa. Kulkusuunnan perusteella voidaan määrittää, onko vika suojattavalla lähdöllä vai taustaverkossa myös tilanteissa, missä mitattava nollavirta viallisella lähdöllä ei olekaan

suurin. Suunnattuja suoja täydennetään vielä katkeilevien maasulkuvikojen suoilla, mutta niistä kerrotaan tarkemmin kohdassa 6.6.

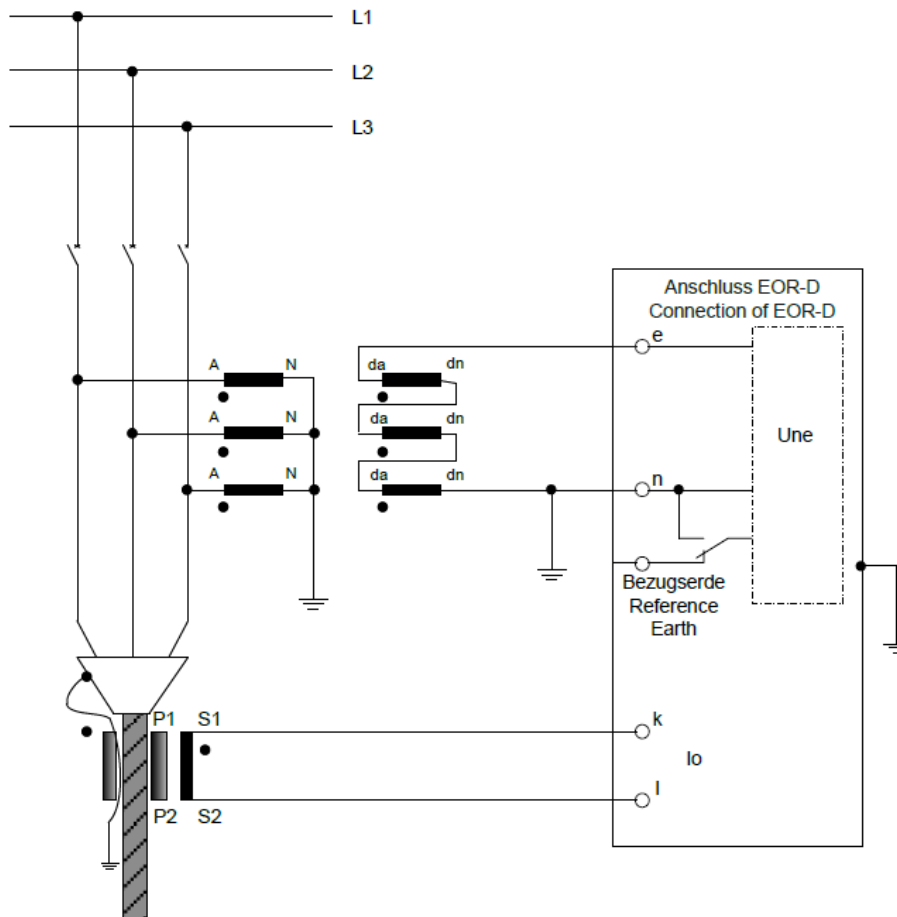
6.1 Nollajännitesuoja ja nollajännitemittaus

Yksinkertaisin maasulkusuojaus voidaan toteuttaa mittaamalla verkon tähtipisteen ja maan välille muodostuvaa Uo-jännitettä, sillä nollajännitettä muodostuu aina maasulkuvaiassa. Nollajännitettä voi muodostua myös terveessä tilassa verkon epäsymmetrian tai epätasaisen kuormituksen seurauksena, minkä vuoksi asettelut onkin syytä tehdä terveen tilan nollajännitetaso huomioiden. Suojan toimintaraja tulee asettaa riittävän ylös, jottei terveen tilan nollajännite aiheuta ei toivottuja virhelaukaisuja. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.3.)

Nollajännitteen muodostumiseen vaikuttaa myös verkon rakenne. Sammutetussa verkossa samaa kuormitustilannetta vastaavat nollajännitteet, terve sekä vikatila, kasvavat huomattavasti maasta erotettua verkkoa suuremmiksi. Tästä johtuen kytkettäessä verkkoon sammutuskuristin, tulee nollajännitesuojien asettelut muistaa vaihtaa. Yleensä relesuojiiin asetellaankin kahdet eri suojausparametrit ja käytössä olevat parametrit valitaan verkon käyttötavan mukaan. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.3.)

Nollajännitteen mittaus voidaan toteuttaa joko jännitemuuntajien avokolmiomittauksena, jännitesensoreilla näiden laskennallisena summana tai verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiomittauksena. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.2.)

Yleinen tapa on toteuttaa mittaus avokolmiomittauksena. Kytkennässä vaihejännitemuuntajien toisiot on kytketty sarjaan ns. avokolmioksi. Nollajännite muodostuu siis vaiheiden ja maan välillä mitattujen vaihejännitteiden summaksi. Kuvassa 8 esitetään avokolmiomittauksen kytkentä.



Kuva 8. Nollajännitteen avokolmiomittauksen kytkentä. Kuvassa myös nollavirran mittaus summavirtamuuntajaa, eli kaapelivirtamuuntajaa käyttäen. (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 29, A. Eberle GmbH & Co. KG)

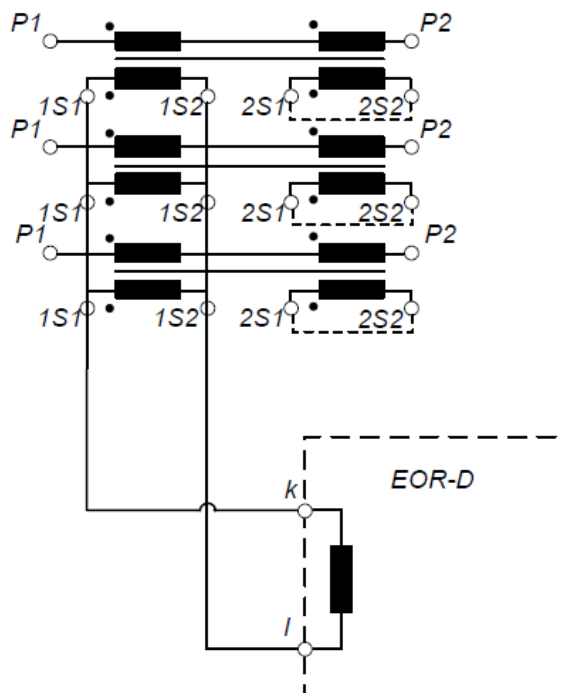
Pelkän nollajännitteen avulla tehty valvonta on yleismaallinen ja sillä suojataan aina vain koko sähköasemaa ja kaikkia lähtöjä, sillä nollajännitteen mittaus yksinään ei kerro, millä aseman johtolähtöllä vika sijaitsee. Nollajännitesuojaa voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi varasuojana ja sitä käytetäänkin monesti koko asemaa suojaavana viimeisenä suojausportaana. Sillä voidaan havaita suhteellisen suuriresistanssiakin vikoja etenkin avojohtoverkoissa, missä nollajännite pysyy suhteellisen korkeana. Kaapeliverkoissa kaapelit aiheuttavat puolestaan suurta maakapasitanssia, mistä johtuen nollajännite pienenee suhteellisen nopeasti verkon koon kasvaessa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.)

6.2 Nollavirran Io-mittaus

Voidaan todeta, että perinteisimmät maasulkusuojaukset perustuvat johtolähtöjen nollajännitteen U_0 lisäksi nollavirran I_0 mittaamiseen. Nollavirta voidaan mitata joko vaihevirtamuuntajilla summavirtakytkentänä eli ns. Holmgreenin kytkennällä, kaapelikohtaisella kaapelivirtamuuntajalla tai vaihevirtasensoreilta saatavien virtojen laskennallisena summavirtana. Yksinkertaisin, suuntaamaton selektiivinen suojaus voidaan toteuttaa mittaamalla nollavirrat johtolähdöiltä. Oletus on, että taustaverkon nollavirtojen summautuminen vialliselle lähdölle aiheuttaa aina suuremman nollavirran lähdön mittauksessa kuin lähdön oma maakapasitanssi. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa kaikilla verkkorakenteilla tai kompensoidussa verkossa.

6.2.1 Holmgreen- eli summavirtamittaus

Summavirtakytkennässä vaihevirtamuuntajien toisiot kytketään rinnan ja virrat summautuvat kokonaisvirraksi. Kytkentää havainnoillistaa seuraava kuva 9.



Kuva 9. Holmgreenin kytkentä, eli summavirtakytkentänä toteutettu nollavirran mittaus. (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 33, A. Eberle GmbH & Co. KG)

Holmgreen-kytkennän heikkous on siinä olevat useat virtamuuntajat ja niistä helposti seuraava epätarkkuus. Kytkennässä on tärkeää, että vaihevirtamuuntajat ovat mahdollisimman lähelle identtisiä ja muuntosuhteet samanlaisia, jotta mittaus on tarkka. Summakytkennässä johtolähdön kuorma aiheuttaa muuntajissa niin kutsuttua näennäistä nollavirtaa. Näennäinen nollavirta voi hetkellisesti kasvaa merkittävästi esimerkiksi kytkentävirtasysäysten aikana, mikä on otettava huomioon suojauksia suunniteltaessa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.2.)

Virtamuuntajissa virhettä aiheuttaa niille ominainen magneettinen kyllästyminen. Lähtökohtaisesti virtamuuntajan tarkkuus paranee virran kasvaessa, mutta saavutettaessa muuntajan kyllästymispiste, lähtee mittausvirhe kasvamaan suuresti. Tämä ilmiö on pääasiallinen syy mittausvirheeseen edellä mainitun kytkentävirtasysäyksen aikana. Virtamuuntajien virheeseen vaikuttaa myös toisioon liitettävän mittausyksikön aiheuttama kuormitus, mistä johtuen mittauspiirin kuormituksen tulisi olla mahdollisimman vähäinen.

6.2.2 Vaihesensorimittaus

Tässä mittaustavassa releen mittausalgoritmi laskee maasulkuvirran sensorien mittaamista vaihevirroista. Mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa samankaltaiset tekijät kuin summavirtamittaukseenkin, eli sensorien samankaltaisuus sekä vaihevirtoja mitattaessa mittauksissa näkyvä näennäinen nollavirta. Osin virhettä aiheuttaa myös laskennalliset epätarkkuudet. Hyvä puoli sensorimittauksessa on sensorien lineaarisuus ja kyllästymättömyys. Näennäisen nollavirran takia mittaustapa soveltuu kuitenkin summavirtamittauksen kanssa samankaltaisiin mittaustilanteisiin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.2.)

6.2.3 Nollavirran mittaus summavirta- eli kaapelivirtamuuntajalla

Summavirtamuuntajan etu on, ettei se mittaa kuormavirtaa, vaan siinä näkyvät vain esiintyvät nollavirrat. Kun maasta erotetussa verkossa nollapistettä ei ole kytketty, nollautuvat virrat kolmessa vaiheessa, eikä kuormavirta siksi näy mittauksessa. Kuormavirtojen nollautumisesta seuraa, ettei myöskään näennäistä nollavirtaa synny mittausta häiritsemään. Maasulkutilanteessa osa virrasta kiertää maan, suojojohdimien

ja muiden johtolähtöjen maakapasitanssien kautta takaisin, mikä näkyy kaapelivirtamuuntajassa nollavirtana.

Summavirtamuuntajia käytettäessä tulee muistaa muuntajan kyllästyminen, mikä toisaalta ei tuota samalla tavalla ongelmia kuormitusvirran puuttuessa. Summavirtamuuntajaa käytettäessä mittaustarkkuuteen vaikuttaa virtamuuntajan toisioon kohdistuva kuormitus, mutta yleisesti numeeriset suojareleet eivät tuota tässä asiassa ongelmia. Asennuksessa on hyvä muistaa, että nollavirran oikeaoppinen mittaaminen edellyttää kaapelin suojajohtimen tai konsentrisen johtimen tuomista takaisin virtamuuntajan läpi ennen kytkemistä, jotta mahdollinen suojajohtimessa kulkeva virta ei vaikuta nollavirran mittaamiseen. Esimerkki oikeasta suojajohtimen kytkennästä nähdään edellä esitetystä kuvassa 8.

6.3 Selektiivinen suojaus

Selektiivisessä suojauksessa pyritään vika havaitsemaan ja laukaisemaan johtolähtökohtaisesti. Yksinkertaisin tapa selektiivisen suojauksen toteuttamiseen maasulkutilanteessa on nollavirran mittaaminen. Edellä luvussa 5 käsiteltiin maasulkuvirtaa ja sen muodostumista. Havaittiin, että maasulkutilanteessa asemalta lähtevät terveet johtolähdöt syöttävät maasulkuvirtaa vialliseen lähdölle. Kunkin johtolähdön syöttämä maasulkuvirta on verrannollinen johtolähdön pituuteen. Vastaavasti johtolähtöjä mittaavat kaapelivirtamuuntajat, ja valvontareleet havaitsevat vain kultakin johtolähdöltä tulevan tai sille menevän nollavirran. Kuten edellä kuva 2 osoittaa, yksivaiheisessa maasulussa summautuvat virrat tähtipisteessä ja kulkevat viallisen johtolähdön viallista vaihetta pitkin maahan. Tämä virta nähdään viallisen johtolähdön nollavirtana. Viallisen johtolähdön nollavirta on siis terveiden johtolähtöjen ja mahdollisesti sammutetun verkon tilanteessa sammutuslaitteiston syöttämän vikavirran summa. Vikavirrasta puuttuu viallisen johtolähdön terveiden vaiheiden syöttämä vikavirta, sillä se nollautuu kaapelivirtamuuntajassa kulkiessaan muuntajan läpi molempiin suuntiin.

6.3.1 Suuntaamaton suoja

Suuntaamaton selektiivinen suojaus perustuu nollajännitteeseen sekä nollavirran määrälliseen mittaamiseen. Nollavirran määrällinen mittaaminen riittää maasta erotetun

verkon tapauksissa. Tällaisessa tilanteessa johtolähdöt ovat likimain yhtä pitkät ja lähtöjä on enemmän kuin kaksi, jolloin vialliselle johtolähdölle muodostuva vikavirta on aina suurempi kuin johtolähdöllä kulkeva vikavirta lähdön ollessa terve. Jos johtolähtöjen pituuksissa on suuria eroja, voi seurata tilanne, missä pitkä terve johtolähtö syöttää virtaa enemmän muille verkon lähdöille, kuin muut lähdöt pitkälle lähdölle vian ollessa tällä lähdöllä. Kun suojaus on toteutettu vain määrällisenä virtarajana, suoja laukeaisi vikatilanteessa, vaikka johtolähtö olisikin terve.

Suuntaamattoman suojan toimintaa voidaan osin varmistaa lukitsemalla suojan toiminta nollajännitesuojalla. Tällöin nollajännitesuojan havahtuminen on edellytys nollavirtasuojan toimimiselle ja laukaisulle. Suuntaamaton suoja soveltuu pienille vikaresistansseille, jolloin vikavirrat ovat verrattain suuria. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.4.)

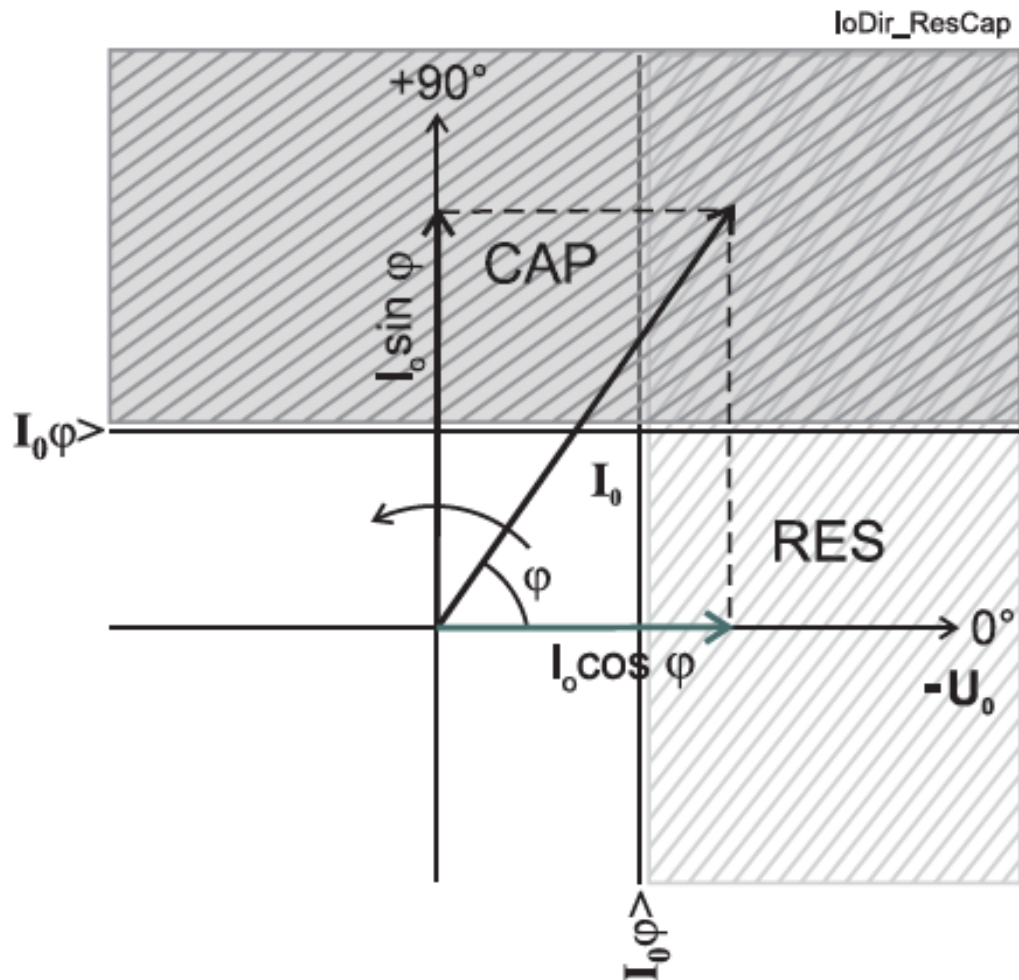
6.3.2 Suunnattu suoja

Välttääksemme terveiden johtolähtöjen tarpeetonta laukaisua huomioidaan nollavirran mittauksessa yleensä myös suunta. Suunnattu maasulkusuojaus toteutetaan maasta erotetun verkon tapauksessa maasulkuvirran loiskomponentin suuruuden ja suunnan tarkkailuun tai kulmanmittaukseen perustuen.

Maasta erotetussa verkossa virran loiskomponenttiin perustuvan suojan toiminta edellyttää kaikkiaan kolmen kriteerin täyttymistä:

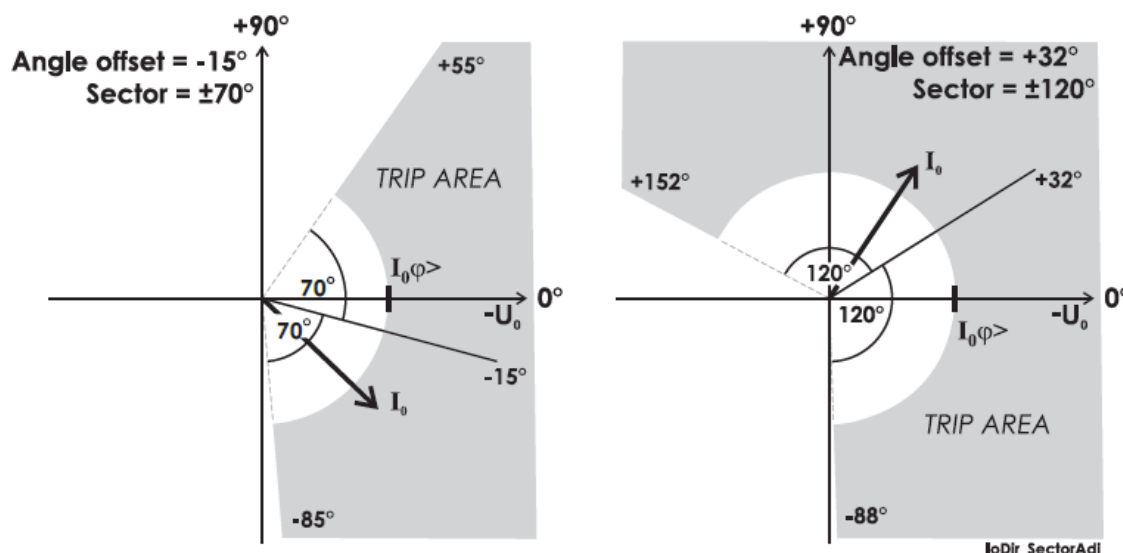
- Nollavirran loiskomponentin $I_0 \sin(\varphi)$ tulee ylittää asetettu virtaraja.
- Nollajännitteen U_0 tulee ylittää asetettu jänniteraja.
- I_0 virran summavektorin tulee olla toiminta-alueen sisällä.

Sammutetussa verkossa eli kelan ja mahdollisen kuormitusvastuksen kautta maahan kytketyn verkon suojauksessa erona edelliseen on, että loiskomponentin sijaan valvottava suure on pätkomponentti $I_0 \cos(\varphi)$. Sammutetun verkon tilanteessa toiminta-alue käännetään 90° pätkövirran suuntaan. Seuraava kuva 10 esittää toiminta-alueet. Cap-alue on käytössä maasta erotetun verkon tilanteessa ja Res-alue sammutetussa verkossa.



Kuva 10. Maasulkuvirran suuruutta ja suuntaa valvovan suojaraleen toiminta-alueet. CAP = maasta erotettu verkko, RES = sammutettu verkko. (Schneider Electric VAMP 255 User manual: 88)

Vaihtoehtoisessa kulmanmittaukseen perustuvassa suojauksessa nollavirran summavektorin sekä jännitteen vektorin tulee ylittää asetellut rajat ja lisäksi jännitteen ja virran kulmaero tulee olla määritellyllä toiminta-sektorilla. Tässä asettelussa nollakulmaksi katsotaan yleensä U_0 -jännitteen suunta tai tästä määritelty offset. Toiminta-sektori määritetään tästä nollakulmasta +- ja - -arvoina. Kuva 11 esittää pari esimerkkiä kulmanmittaukseen perustuvasta suojausasettelusta.



Kuva 11. Kaksi esimerkkiä suunnatusta maasulkusuojauksesta toteutettuna sektori-asettelulla. (Schneider Electric VAMP 255 User manual: 89)

Kuvassa näkyvät "Angle offset" sekä "Sector" ovat käyttäjän määriteltävissä olevia parametrejä.

Suunnattu suojaus on hyvä suojaustapa, kun aseman kytkentätilanteet vaihtelevat ja suojauksen tavoitteena on toimia myös suurten vikaresistanssien tapauksissa. Selektiivinen suojaus voidaan saavuttaa johtolähtöjen pituudesta ja määrästä riippumatta. Suojauksen selektiivisyyttä voidaan parantaa entisestään käyttämällä johtolähdöissä useampia suojausportaita, jolloin alemmat portaat voivat toimia hälyttävinä portaina ja ylemmät hoitaa nopeasti laukaisut vikavirtojen ylittäessä sallitut rajat. Mikäli vikavirta ei ole sammutetun verkon tapauksessa suojaukselle riittävä, voidaan erillistä sammutuskuristimen rinnalle kytkettävää vastusta käyttää vikavirran kasvattamiseen. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: luku 8.3.4.)

6.3.3 Wattimetrinen suoja

Wattimetrinen suoja on yksi perinteinen suojausmetodi. Sen käyttö on vähentynyt suunnatun maasulkusuojauksen vallatessa käyttökohteita tarjoamalla tarkemman toimintarajauksen ja suojauskyvyn. Yksinkertaisimmillaan suojan laukeamiseksi voi riittää vain nollavirran ja jännitteen sekä näiden välisen kulman perusteella laskettu resistiivinen nollateho, eli ns. jäännöspätöteho. Toisin sanoen suoja toimii vain, kun

nollavirrasta riittävä osa on resistiivistä pätövirtaa. Tämä jäännöspätövirta lasketaan kaavalla

$$P_0 = 3U_0I_0\cos\varphi \quad (10)$$

Suojaus perustuu siis suunnattujen suojiin tapaan virran, jännitteen ja kulman mittaamiseen. Moderneissa Po-suojausalgoritmeissa U_0 :n ja I_0 :n tulee ylittää asetteluarvot sekä näiden välisen kulman tulee olla asettelualueella, jotta Po-suojan laukaisuedellytykset täyttyvät. Tällä osaltaan varmistetaan suojan toimintaa, sillä Po-suojan laskennassa virta- ja jännitemuuntajissa esiintyvät mittausvirheet kertautuvat useamman mittausparametrin vaikuttaessa tulokseen. Po-suojaa käytettäessä suositellaankin, että virtamittauksissa käytetään kaapelivirtamuuntajia, joiden muuntosuhde on 70:1 tai suurempi, mikä vähentää kaapelin tai erillisten vaihekaapelien virtamuuntajan lävistyksen epäkeskisestä sijannista aiheutuvaa mittausvirhettä. (REX 640 Technical Manual, ABB : 522.)

Wattimetristä suojaustapaa yhdessä käänteisen laukaisuaikaparametrin kanssa on jonkin verran käytetty kompensoiduissa verkoissa, missä valvottava jäännösvirta on pääosin resistiivistä. Tärkeää on varmistaa, että vikatilanteessa pätövirtamäärät ovat riittäviä suojan toimimiseen. Resistiivistä virtaa voidaan tarvittaessa kasvattaa erillisellä verkon tähtipisteeseen kytkettävällä vastuksella, jotta virta saadaan riittävän suureksi. (REX 640 Technical Manual, ABB : 523.)

6.3.4 Harmoninen maasulkusuojaus

Harmoninen suojaus perustuu maasulkuvirran harmonisten virtojen tarkkailuun. Maasulun aikana perustajuisen virran lisäksi vaihejännitteiden säröytymisestä seuraa myös harmonisia vikavirtoja, joita tarkkailemalla maasulkuvikoja voidaan havaita. Harmonisia vikavirtoja tarkastellessa verkko voidaan käytännössä ajatella maasta erotetuksi, etenkin suurempia kerrannaisia käsiteltäessä, sillä kompensoidun verkon kelan induktanssi ja virran muutosten vastustus kasvaa samassa suhteessa virran taajuuden kanssa. Tästä seuraa, etteivät harmoniset virrat juurikaan kulje kelan läpi. Harmonisten virtojen tarkkailuun perustuvia suoja- ja suojia on toteutettu useammilla erilaisilla tavoilla ja releestä riippuen huomioon voidaan ottaa yksittäisiä tai useampia taajuuksia

ja näiden summavirtoja. Harmoninen suoja on hyvä esimerkiksi kompensoidussa verkossa, missä perustaajuinen nollavirta on kompensoitu hyvin pieneksi ja vian havaitseminen on tästä johtuen haastavaa perinteisillä suojaustavoilla.

ABB:n REX 640 -releessä tarkkailun kohteena ovat virrat, jotka ovat maksimissaan kaksi kertaa perustaajuus. Ylemmät taajuudet suodatetaan ja jäljelle jäävät summataan yhteen, minkä jälkeen nollavirran suuruutta verrataan vain kyseisen releen asetteluarvoon tai vaihtoehtoisesti muiden kiskolla olevien releiden vastaaviin mittaustuloksiin. Koska harmoniset virrat summautuvat terveiltä lähdöiltä vialliselle lähdölle perustaajuisen virran tavoin, voidaan mitattujen virtojen suuruuden perusteella selvittää viallinen johtolähtö. Huomioitava on kuitenkin, että vain kahden rinnakkaisen johtolähdön tapauksessa erottelua pelkän virran suuruuden perusteella ei voida tehdä.

A. Eberlen EOR-D-releen harmoninen suojaus on perusidealtaan samankaltainen perustuen harmonisten virtojen suuruuksien vertailuun eri lähdöillä. Maasta erotetuissa verkoissa tarkkailtava taajuus on perustaajuus eli 50 Hz. Toiminta perustuu tässä tapauksessa $\sin(\varphi)$ -arvon, eli reaktiivisen virran tarkkailuun. Sammutetuissa verkoissa rele tarjoaa harmoniseen suojaukseen enemmän vaihtoehtoja. Kun perustaajuinen kapasitiivinen vikavirta on kompensoitu pois, verkkoon jää resistiivisen vikavirran lisäksi kapasitiivisia harmonisia virtoja. EOR-D:n harmoninen suojaus kompensoidussa verkossa mahdollistaa valvottavan joko kolmatta harmonista eli 150 Hz, viidettä harmonista eli 250 Hz tai halutessaan vapaasti määritettävää taajuutta 250 Hz:iin asti. Vapaa määrittäminen on hyödyllinen esimerkiksi tilanteessa, jossa verkossa ei esiinny riittävästi harmonisia virtoja ja suojauksen toimintaa varmistetaan virtainjektointilaitteistolla, jolloin verkkoon syötetään lyhyt asetetun taajuinen virtapulssi. Hyvä lisä EOR-D:n harmonisessa suojassa on mahdollisuus vikavirran suunnan määrittämiseen. Tämä tehdään tavanomaisella tavalla verraten harmonisen vikavirran kulmaa esiintyvään vastaavaan harmoniseen jännitteeseen. Harmoninen vikavirta on terveillä lähdöillä kapasitiivista ja vastaavasti viallisella lähdöllä induktiivista, joten virrat näkyvät 180° vastakkaisuuntaisina.

6.4 Transienttisuojat

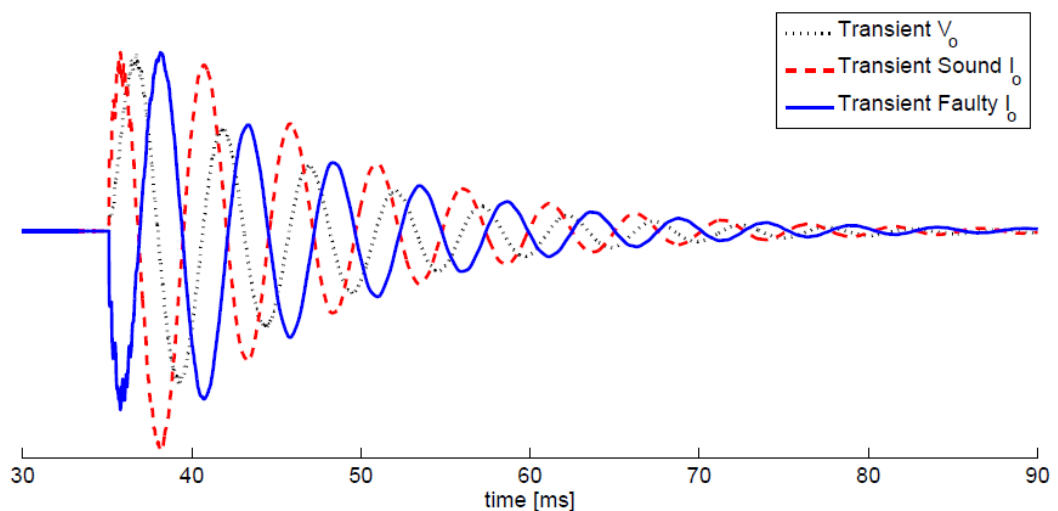
Transienttisuojat voidaan myös laskea selektiivisiin suojaustapoihin, ja ne nimensä mukaisesti perustuvat nopeiden Uo- ja Io-transienttien seurantaan. Transienttien havainnointi perinteisin suojaustavoin on ollut haastavaa niiden lyhytkestoisuuden takia. Lyhytkestoisissa vain millisekunteja tai niiden kymmenyksiä kestävässä vioissa ei ole myöskään luotettavasti voitu määrittää virran suuntaa, jolloin selektiivistä suojausta on ollut vaikea toteuttaa. Tekniikka on kuitenkin kehittynyt yksittäisten transienttien havaitsemisessa digitaalisten releiden sekä mittaustarkkuuden parantumisen myötä ja nykyään markkinoilla on transienttisuojia muutamilla erilaisilla algoritmeilla. Monissa tapauksissa transienttisuojat yhdistyvät tai perustuvat osin katkeilevien maasulkujen suojausalgoritmeihin. Transienttisuojat ovat myös tuoneet ratkaisuja katkeilevan vian suojaukseen, missä suojauksen havahtuminen perustuu Uo-jänniterajan ylittymiseen useasti peräkkäisten transienttien aiheuttamana. Transienttisuoja on yksi tärkeimpiä suojausalgoritmeja myös A.Eberlen EOR-D-releessä, joten tarkastellaan seuraavaksi transienttien muodostumista sekä hieman tarkemmin muutamia tarjolla olevien transienttisuojien suojausfunktioita ja niissä ilmeneviä eroja.

6.4.1 Transienttien muodostuminen

Maasulussa läpilyönti aiheutuu, kun vaiheen ja maan välinen potentiaali kasvaa yli tilanteessa vallitsevan eristyskyvyn. Siksi on tavanomaista, että maasulku aiheutuu yleensä hetkellä, jolloin vaihejännite on suhteellisen korkealla. Kun maasulku tapahtuu, viallisen vaiheen sähköinen varaus on jännitetasosta johtuen korkealla ja varaus alkaa purkautua maahan. Purkautuminen etenee vikapaikasta kohti vaihejohtimen molempia päitä. Verkkoon kytketyt impedanssit ja kapasitanssit aiheuttavat nopeasti etenevästä purkauksesta syntyviä heijastumia eli transientteja, joiden taajuudet ovat moninkertaisia perustaajuuteen nähden. Purkaustransienttien taajuudet riippuvat aina verkkorakenteesta ja niitä esiintyy yleensä 1 kHz:stä ylöspäin. Purkaustransienttien amplitudit ovat suuresti riippuvaisia vian syntyhetkestä suhteessa vaihejännitteeseen sekä transienttien taajuudesta, mihin taas vaikuttaa johtolähdön pituus. Purkaustransientit ovat hyvin lyhytaikaisia ja ne häviävät nopeasti verkon resitansseihin. (Loos: 44.)

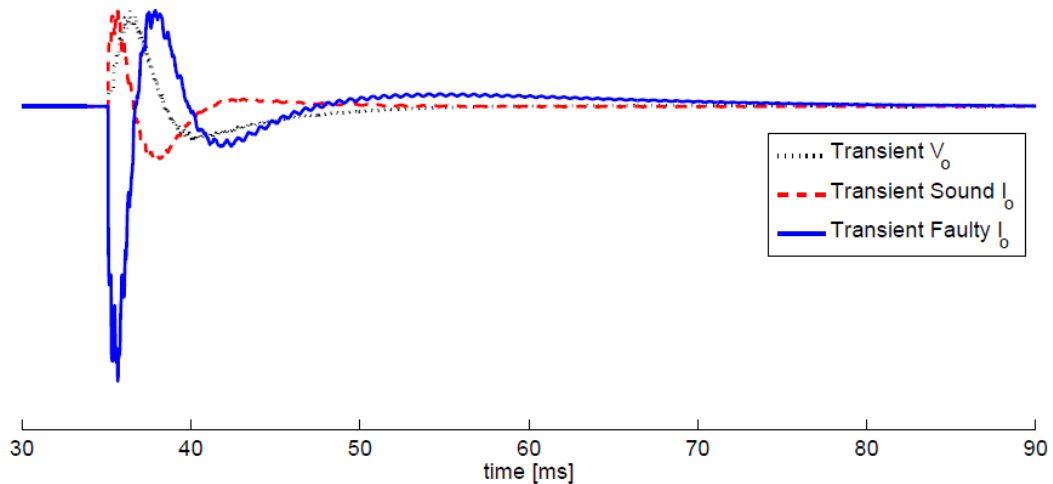
Viallisen vaiheen purkautumisen ohella terveet vaiheet varautuvat näiden vaihejännitteiden kasvaessa. Purkautumista vastaavasti varautumisesta aiheutuvista varausvirroista aiheutuu verkon impedanssien ja kapasitanssien aiheuttamana myös transientteja eli varaustransientteja. Varaustransientit ovat myös perustaajuuteen nähden suuritaajuuksisia, mutta kuitenkin huomattavasti matalampitaajuuksisia purkaustransientteihin nähden. Näitä esiintyy yleensä taajuuksilla 100 Hz – 2 kHz. Matalampitaajuiset transientit vaimenevat verkosta hitaammin, mistä syystä varaustransientit ovat sekä helpommin että pidempään havaittavissa. On siis ymmärrettävää, että varaustransientit ovat suojausn kannalta helpommin hyödynnettäviä kuin purkaustransientit. Tulee kuitenkin huomioida, että transienttien häviämiseen vaikuttaa suuresti vikaresistanssi. (Loos: 45-46.)

Kuva 12 esittää varaustransienttia simuloitussa yksilähtöisessä maakaapeliverkossa. Transientin taajuus on noin 200 Hz ja havainnoinnin helpottamiseksi 50 Hz:n komponentti on suodatettu pois.



Kuva 12. Varaustransientti simuloitussa maakaapeliverkossa, missä vikaresistanssi on 0 Ω . (Loos: 48)

Verrataan edellistä tilannetta seuraavaan, missä vikaresistanssi on kasvanut 100 Ω .

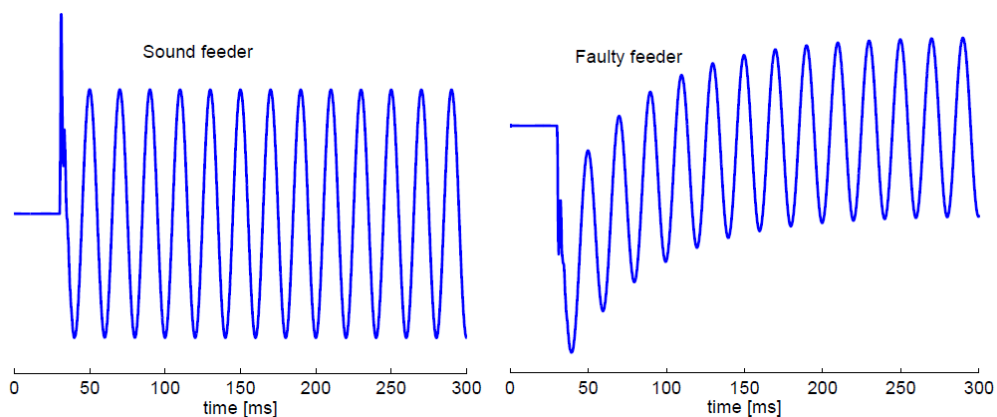


Kuva 13. Varaustransientti simuloitussa maakaapeliverkossa, missä vikaresistanssi on 100Ω .
(Loos: 48)

Edellä olevista kuvista voimme havaita, kuinka radikaalisti verrattain vähäisenkin vikaresistanssin lisäys vaikuttaa transienttien sammumiseen. Kun vikavastus kasvaa entisestään, transientit käytännössä sammuvat välittömästi eikä niitä kyetä enää havaitsemaan.

Varaustransienttien lisäksi verkkoon kytketty kompensoitikelä voi aiheuttaa transientin. Transientti muodostuu, mikäli vaihejännite ei ole huippuarvossaan vian alkuhetkellä. Muodostuva transientti ei ole periodinen, vaan niin kutsuttu tasavirtakomponentti, mistä johtuen se ei kulje verkon kapasitanssien kautta vaan ainoastaan verkon induktanssien ja resistanssien läpi. Tästä seuraa, että tämä transientti on ainoastaan havaittavissa viallisella lähdöllä. (Loos: 51-52.)

Kuva 14 ilmentää hyvin tasavirtakomponentin näkymistä viallisella johtolähdöllä. Transientti vaimenee sitä hitaammin, mitä pienempi vikaresistanssi verkossa on.



Kuva 14. Kompensointikelasta muodostuva tasavirtakomponentti maasulkuviassa (Loos: 52)

6.4.2 Vanhemmat ”perinteiset” transienttisuojat

Yksi ensimmäisiä varhaisia tapoja transienttien havainnointiin on niin kutsuttu Wischer principle. Menetelmän perusajatus lähtee siitä, että varaustransienttiaalto näkyy sekä viallisella että terveellä lähdöllä, mutta vastakkaissuuntaisina, kuten kuva 12 meille osoittaa. Yksinkertaisesti viallinen lähtö on siis erotettavissa muista lähdöistä varaustransientin suunnan perusteella.

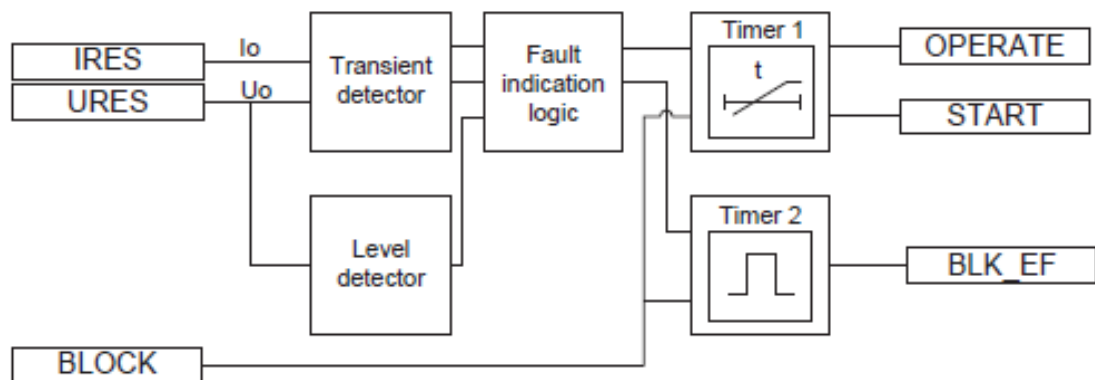
Wischer-suojausfunktiossa mitatusta datasta suodatetaan ensin 50 Hz:n taajuus pois kaistanpäästösuodattimella, minkä jälkeen jäljelle jäävien, yli 100 Hz:n taajuudella olevan transientin ensimmäisen puolijakson arvoja verrataan määriteltyyn raja-arvoon. Jos raja-arvo ylittyy, sen suuntaa verrataan nollajännitteeseen. Mikäli nollavirta ja -jännite ovat vastakkaissuuntaiset, on vika johtolähdöllä ja vastaavasti samansuuntaisina vika on taustaverkossa. Tämä voidaan nähdä edellä esitetystä kuvasta 12. (Loos: 69-70.)

Heikkous Wischer-suojaukselle on, että mikäli transientin alkuosa jostain syystä puuttuu, muuttuu vian suunnan määrittäminen ratkaisevasti, sillä virran ja jännitteen välinen kulma on 90° eikä 180° . Tästä seuraa, että napaisuus muuttuu nollakohdan ylittämisen jälkeen, jolloin vikälähtö tulkitaan väärin. Suojaus ei myöskään juuri kykene yli 1 k Ω vikojen havaitsemiseen, sillä vikaresitanssin vaikutuksesta suojauksessa käytettävät transientit sammuvat nopeasti, eikä rele näe niitä. (Loos: 70-71.)

6.4.3 Transienttisuoja - REX 640

ABB:n REX 640-releen transienttisuoja on yhdistetty katkeilevan maasulkusuojausfunktion kanssa samaksi lohkoksi. Suojan parametreista voi valita, käytetäänkö suojaustapana transienttisuojaa, vai katkeilevan vian suojausta. Tarkastellaan tässä osassa transienttisuojan toimintaa ja tutustutaan katkeilevan vian suojaustapaan myöhemmin luvussa 6.6.1.

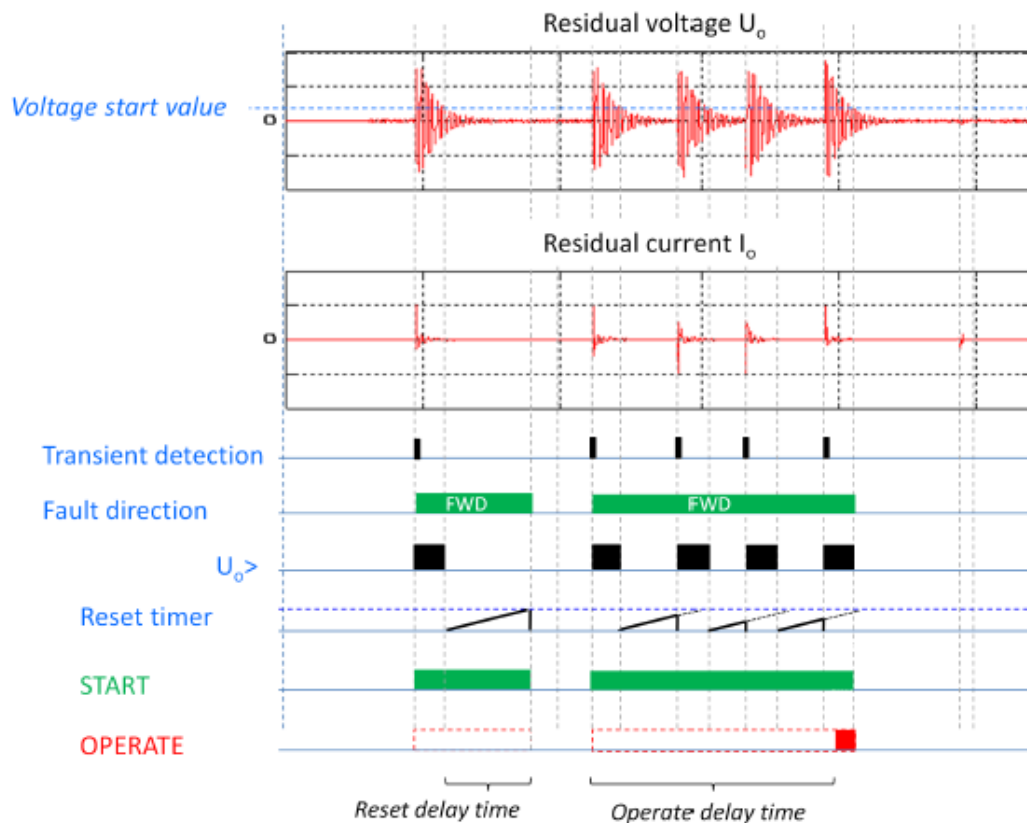
REX 640 transienttisuojassa U_o - ja I_o -arvoille määritellään rajat, joiden tulee ylittyä, jotta transienttisuoja toimii. Suojan toimintalogiikkaa kuvataan kuvan 15 kaaviolla.



Kuva 15. ABB REX 640 -releen transienttisuojan toimintakaavio (REX 640 Technical Manual, ABB : 462)

Ensiksi transienttisuojan toiminta mahdollistetaan Level detector -moduulilla, mille määritetään *Voltage start value*, eli kynnysjännite. U_o -jännitteen tulee ylittää määritetty kynnysjännite, jotta transienttisuojan toimintalogiikka, *Fault indication logic*, aktivoituu. Aktivoitumisen toinen kriteeri on *Transient detector* -moduulille määritettävä *Min operate current (MOC)* eli kynnysvirta. Kynnysvirta on minimiarvo, minkä tulee ylittyä, jotta pulssi katsotaan transientiksi, ja se määritetään verkossa esiintyvän perustaajuisen nollavirran mukaan. Esimerkiksi käytettäessä kuormitusvastusta kelan rinnalla määritetään kynnyсарvo aina rinnakkaisvastuksen nimellisvirtaa pienemmäksi, jotta suojalla on edellytykset havahtua.

Kun transientti on havaittu ja hyväksytty, verrataan sitä vielä aseteltuihin aika- ja suuntakriteereihin. Mikäli kriteerit täyttyvät, antaa suoja hälytyksen. Suojan toimintaa kuvaa seuraava kuva 16.



Kuva 16. REX 640 -releen transienttisuojan toimintaperiaate REX 640 Technical Manual, ABB : 464)

Vian suuntakriteeriksi voidaan määrittää *Forward*, *Reverse* tai *Non-directional*. Suunnan perusteella pyritään määrittämään, onko vika suojattavalla lähdöllä vai taustaverkossa. Koska vian suunnan määrittäminen virran ja jännitteen kulmaeron perusteella transienteista on haasteellista niiden epätasaisuuden takia, REX 640 hyödyntää suunnan määrittämiseen monitaajuusadmittanssisuojan algoritmia. Suojan toimintaviiveiksi määritetään kaksi aika-arvoa: *Reset delay time* eli resetoitiviive sekä *Operate delay time*, eli laukaisuviive. Laukaisuviive alkaa kulua välittömästi, kun kynnyksjännite ja -virta on ylitetty. Nyt, mikäli U_o tippuu alle kynnyksjännitteen havahtumisrajan ennen laukaisuviiveen loppua, pysyy havahtuminen voimassa, mutta resetoitiviive käynnistyy. Jos uuta transienttia ei tapahdu ja U_o -jännite ei nouse yli havahtumisrajan resetoitiviiveen kuluessa, suojan havahtuminen nollautuu. Vastaavasti jos uusi transientti tai useammat transietit seuraavat ennen resetoitiviiveen päättymistä ja laukaisuviive ehtii kulua loppuun, seuraa laukaisukäsky. (REX 640 Technical Manual, ABB : 464.)

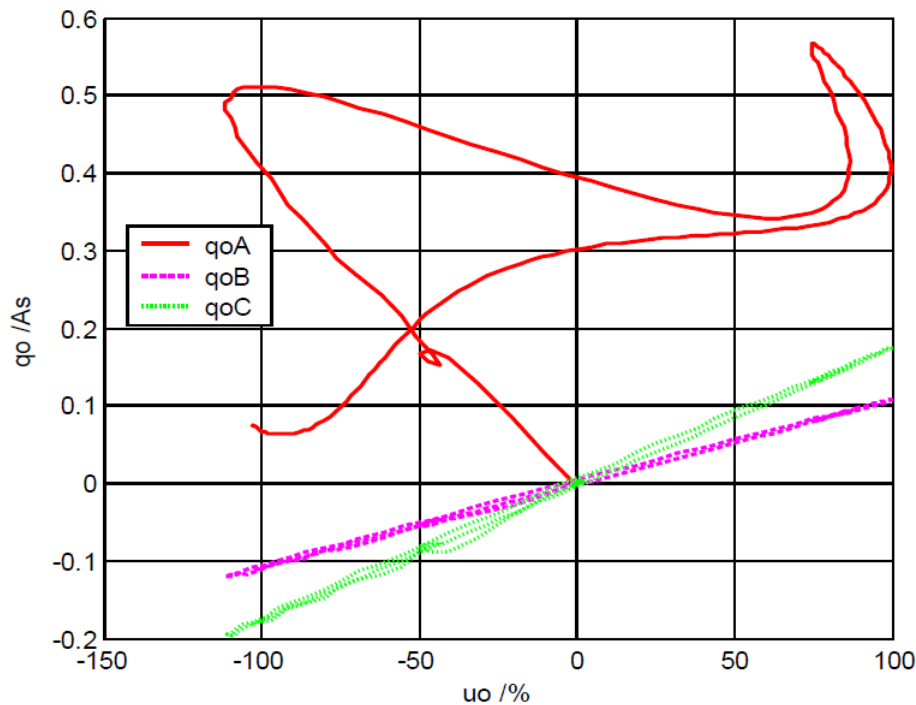
6.4.4 Transienttisuoja - EOR-D

A Eberlen EOR-D -releen transienttisuojan pääkriteerit ovat REX 640 releen tapaan U_o-jännite sekä I_o-virta. Releelle määritetäänkin U_o:lle *Trigger threshold* -arvo, mikä toimii suojan aktivoitumisehtona. Tuttuun tapaan toinen havahtumisehto on I_o-virta, jolle määritetään ABB:n MOC-arvoa vastaava *Ice_min*-arvo. Muilta osin EOR-D-releen transienttisuoja tarjoaa hieman laajemmin havainnointikriteeristöä kuten määritteet, milloin vika luetaan jatkuvaksi ja milloin korkeaimpedanssiseksi. Suurin eroavaisuus suojiin välillä on viallisen lähdön määrittämisessä ja suojausfunktion ymmärtäminen vaatii hieman paneutumista.

Maasulun aikana terveet vaiheet varautuvat näiden jännitetasojen kasvaessa ja vastaavasti viallisen vaiheen varaus maahan nähden purkautuu. Jännitteen, virran ja vaiheiden varauksien riippuvaisuutta toisiinsa maasulussa voidaan esittää yksinkertaistetusti kaavalla

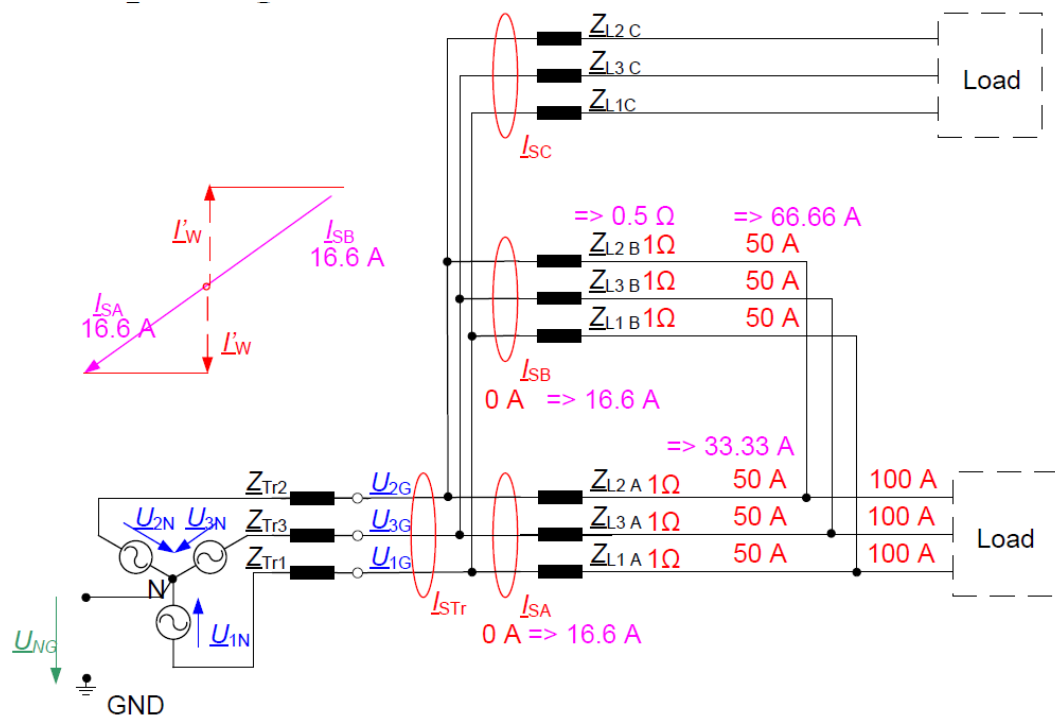
$$u_0(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_0(\tau) d\tau \quad (11)$$

Yhtälössä nollavirrasta otettavaa integraalia voidaan pitää esiintyvänä varauksena, joten voimme todeta U_o-jännitteen olevan verrannollinen varaukseen. Kun varauksen muuttumisesta piirretään käyrä esiintyvän nollajännitteen funktiona likimain ensimmäisen transientin puolijaksolta, saadaan terveillä lähdöillä muodostuvista arvoista nouseva lineaarinen suora. Viallinen lähtö käyttäytyy tässä poikkeuksellisesti ja seurauksena on laskeva suora tai kompensoidun verkon tapauksessa kiertyvä funktio. Tätä varauksen ja jännitteen plottausta kutsutaan linearisoinniksi. Kuva 17 havainnollistaa jännitteen ja varauksen suhdetta. (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 79-81, A. Eberle GmbH & Co. KG.)



Kuva 17. Qu-kuvaaja: Matalaresistanssinen vika (10 Ω) (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 79, A. Eberle GmbH & Co. KG)

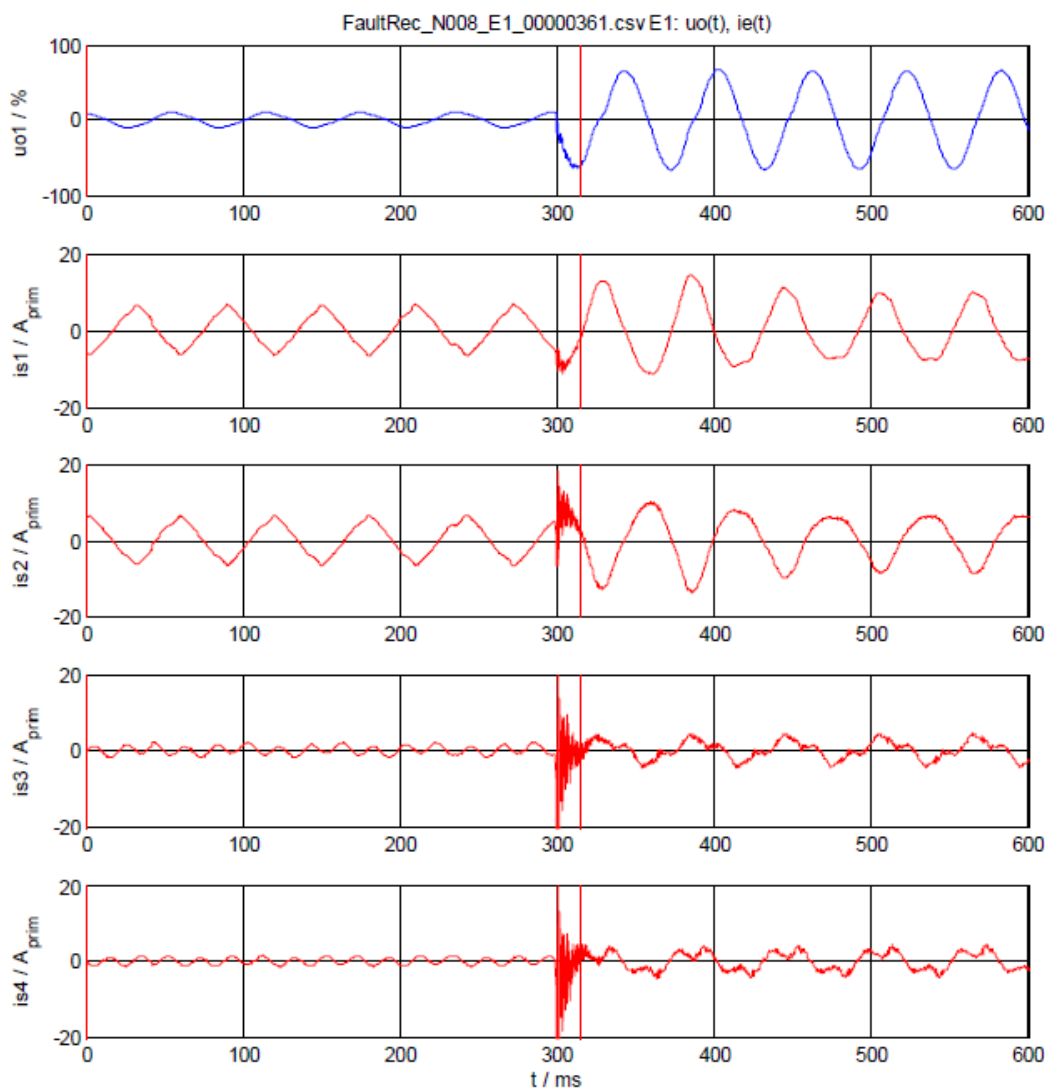
Rengasmaisissa verkoissa transienttien havaitseminen muodostuu hankalaksi, sillä kuormavirta jakautuu renkaan lähdöille impedanssien suhteessa. Virran jakautuminen renkaan lähdöille nähdään kuvassa 18. Kuvassa punaisella merkityt virta-arvot (50 A) ovat vaihekohtaiset kuormavirrat verkon impedanssien ollessa symmetriset kuormaan nähden. Summavirtamuuntajien mittaama nollavirta on symmetrisessä tilanteessa 0 A, kuten kuvasta havaitsemme. Kuorman sijainnista riippuen impedanssit eri lähdöiltä kuormalle vaihtelevat, mistä seuraa kuormavirran jakautuminen lähdöille näiden impedanssien suhteessa. Kuvassa näemme impedanssierojen aiheuttamat esimerkkivirrat vaaleanpunaisina arvoina, kun keskimmäisen lähdön impedanssi on puolet (0,5 Ω) alimmaisena renkaassa olevan lähdön impedanssista. Virrat ovat nyt siis 66,66 A keskimmäisellä lähdöllä ja 33,3 A alimmaisella lähdöllä. Epäbalanssi aiheuttaa siis 16,6 A ylimääräisen virran, mikä nähdään lähdöllä vastakkaissuuntaisina nollavirtoina nollavirtamittauksissa. Vastaavaa epäsymmetriaa ja sarjaimpedanssien vaihtelua voi seurata myös vaiheiden välisistä etäisyyksistä toisiinsa. Onkin suositeltavaa pyrkiä vaiheiden välisten etäisyyksien symmetriaan. (Gernot Druml: 5.)



Kuva 18. Kuormavirran jakautuminen renkasverkon johtolähdöille (Gernot Druml: 5)

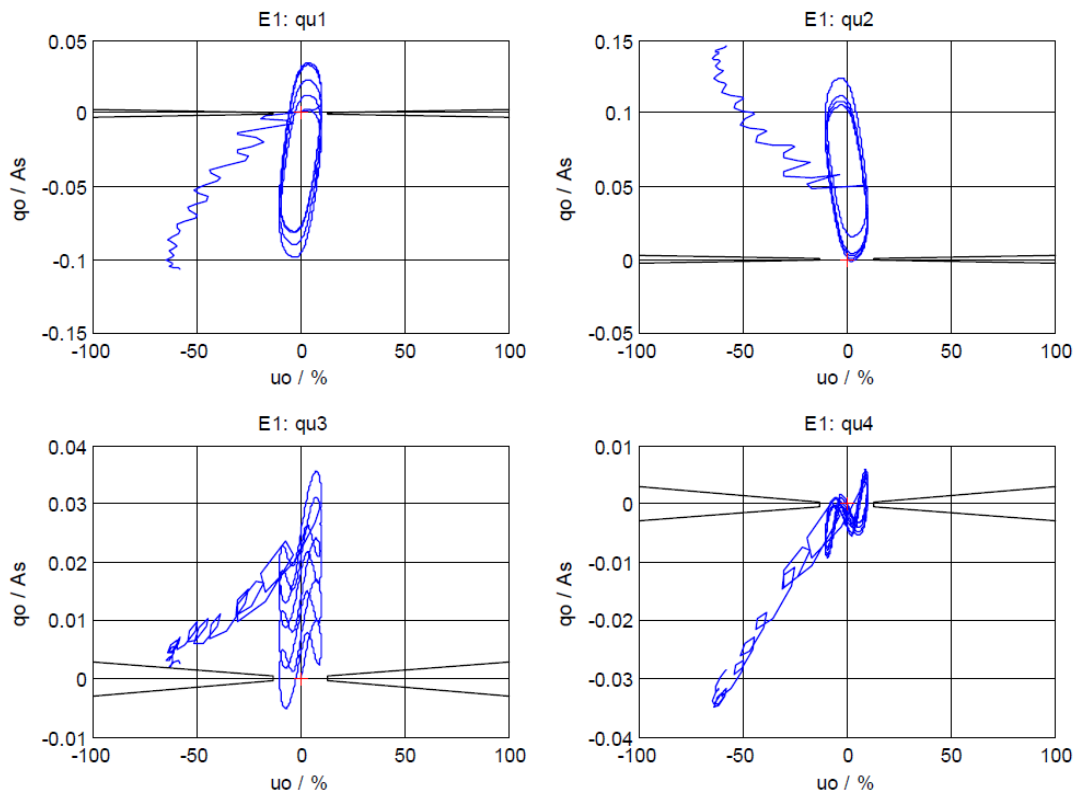
Myös maastossa esiintyvät rinnakkaiset siirtolinjat voivat aiheuttaa häiriötä. Rinnakkaisverkosta aiheutuva häiriö voi olla seurausta magneettisen parin muodostumisesta verkkojen välille. Terveessä verkossa tällä ei välttämättä ole juuri merkitystä vaiheiden ollessa verrattain lähellä toisiaan, mutta maasulkuvian aikana voi epäsymmetriset virrat kasvaa suuriksi, jolloin vaikutus voi kasvaa merkittäväksi häiriötekijäksi. (Gernot Druml: 6.)

Kuvasta 19 näemme esimerkkivikatilanteen 16,7 Hz:n, 110 kV:n rautatieverkossa. Verkossa on kapasitiivista virtaa noin 1200 A ja se on kompensoitu useilla hajautetuilla Petersen-keloilla. Verkon johtolähdöt 1 (I_{s1}) ja 2 (I_{s2}) ovat samassa renkaassa. (Gernot Druml: 6.)



Kuva 19. Nollajännite ja nollavirrat 4 johtolähdön 16,7 Hz, 110 kV rautatieverkossa maasulkuvikatilanteessa. Lähdöt Is1 ja Is2 ovat renkaassa. Mittauksessa ei käytetä virtojen suodatusta. (Gernot Druml: 6)

Kuten yllä olevasta kuvasta 19 voimme havaita, lähtöjen 1 ja 2 virrat ovat likimain samansuuruiset mutta vastakkaisuuntaiset. Ennen vikaa hetkellä t (300 ms) näkyvä nollavirta johtuu rengasverkon lähtöjen impedanssien epäsymmetriasta suhteessa kuormaan. Kun tällainen mittaustulos käsitellään qu-algoritimilla, ei tuloksista voi selkeästi määrittää viallista johtolähtöä, sillä kaikkien johtolähtöjen kuvaajissa esiintyy merkittävää rotaatiota. Tuloksista tulee siis seuraavanlaiset:

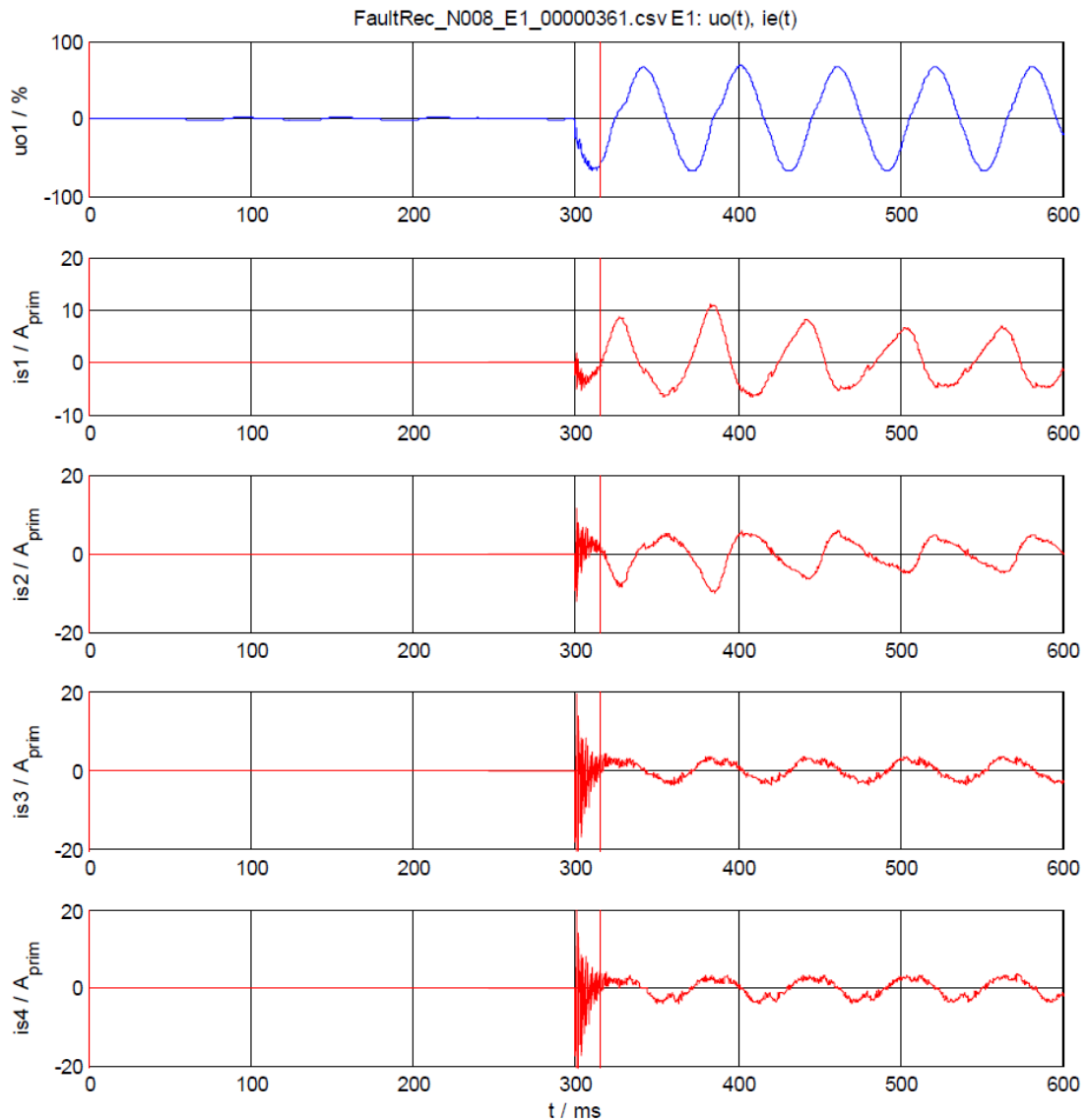


Kuva 20. Johtolähtöjen Qu-kaaviot suodattamattomasta datasta (Gernot Druml: 7)

Kuten näemme, on saaduista tuloksista hyvin vaikeaa todentaa viallinen johtolähtö.

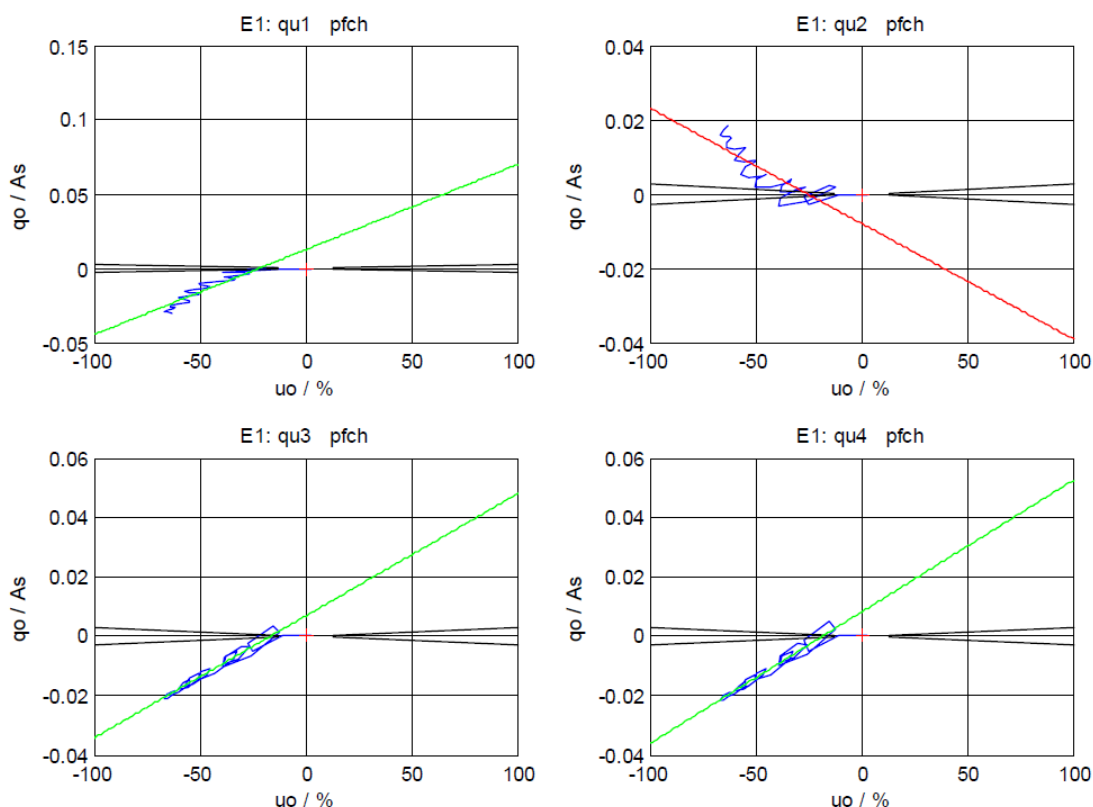
Kun qu-algoritmia täydennetään linearisoinnilla ja nollavirran adaptiivisella epälineaarilla suodatuksella, saadaan ennen vikaa esiintyvä nollavirta karsituksi pois, jolloin myös rengasverkkojen viat voidaan havaita. (Gernot Druml: 7.)

Käsittelyn jälkeen mittausdata näyttää seuraavalta:



Kuva 21. Nollajännite ja nollavirrat 4 johtolähdön 16,7 Hz, 110 kV rautatieverkossa maasulkuvikatilanteessa. Lähdöt Is1 ja Is2 ovat renkaassa. Mittauksessa käytetään virtojen suodatusta. (Gernot Druml: 7)

Kun suodatettu mittausdata käsitellään qu-algoritmeilla, saadaan seuraavat kuvaajat:



Kuva 22. Johtolähtöjen Qu2-kaaviot suodatetusta datasta. (Gernot Druml: 7)

Nyt voidaan tuloksista selkeästi todeta vian olevan lähdöllä kaksi, sillä tämän lähdön funktio on ainoa laskeva.

Linearisointiin vaikuttaa oleellisesti, millä kohtaa käsiteltävää mittaussykliä vika on ilmennyt. Tämän määritetään parametreilla U_{o_min} ja dU_o . Jos vika on ilmennyt jo ennen ensimmäistä mittaussykliä ja U_o -jännite pysyy U_{o_min} alapuolella koko mittaussyklin, voidaan linearisointi tehdä välittömästi. Mikäli U_o -jännite nousee ensimmäisessä mittaussyklissä U_{o_min} arvoa korkeammaksi, tarkastellaan, onko U_o riittävän vakaa linearisointia varten. dU_o -parametri asettaa U_o -jännitteelle sallitut vaihtelurajat mittaussyklin aikana. (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 82, A. Eberle GmbH & Co. KG.)

Edellä kuvatun vian suunnan paikallistamisparametreihin tulee määrittellä rajat vian suunnan määrittämistavalle. Parametri *Minimum rotation* on annettava prosenttiarvo

esiintyvän rotaation suhteesta kulmakertoimeen. Mikäli rotaatio on suurempi kun asetettu arvo, suunta määritetään rotaation perusteella ja vastaavasti pienemmällä arvolla kulmakertoimen perusteella. (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 81, A. Eberle GmbH & Co. KG.)

Varauskuvaajassa esiintyvä rotaatio aiheutuu virran korkeataajuisista transienteista vian alkuhetkellä. Näitä korkeita transienttipulsseja nähdään selvästi enemmän viallisella lähdöllä, jolloin viallinen lähtö voidaan määrittää suuren rotaatiomäärän perusteella.

Transienttisuojan laukaisuehdot voidaan määrittellä logiikassa hyvin vapaasti. Voidaan esimerkiksi valita, aiheuttavatko kaikki havaitut viat hälytyksen vai vain pysyviksi maasulkukuiksi muuttuvat viat. Suojausparametreissa määritetään vioille kesto aika, minkä ylittävät viat luokitellaan pysyviksi maasulkuvioiksi.

EOR-D-releen transienttisuojan qu2-algoritmi on hyvä vaihtoehto tavanomaiseen transienttisuojaukseen verrattuna ja sillä on monia etuja. Qu-algoritimpohjainen suoja ei tarvitse korkeaa näytteenottotaajuutta, vaan noin 2 kHz:n mittaustaajuus riittää, sillä varaustransientit rajoittuvat likimain alueelle 100 Hz – 2 kHz. Kun integrointi tehdään hieman laajemmalla alueella jo osin ennen vikaa, jopa korkeaohmiset, muutamia kilohmeja olevat viat voidaan havaita. Kaiken tämän ohella qu-algoritmin vahvuus on vian paikantamisen tarkkuus, sillä tavanomaiset kulmanmittausperiaatteissa esiintyvät ongelmat transienttien tarkastelussa jäävät pois. (Gernot Druml: 4-5.)

6.5 Admittanssisuojaus

Admittanssisuojaus on suojaustapa, jota on käytetty pitkään Euroopassa, esimerkiksi Puolassa ja on nyt yleistymässä yhdeksi suojaustavaksi myös Suomessa. Admittanssisuojaus perustuu nimensä mukaisesti admittanssin sekä sen osakomponenttien, konduktanssin (reaaliosa) ja susceptanssin (imaginaariosa) laskentaan ja tarkkailuun. Admittanssisuojaus on vaihtoehtoinen suojaustapa perinteiselle nollavirtaan ja -jännitteeseen perustuvalla suuntaamattomalle tai suunnatulle maasulkusuojaukselle. Admittanssipohjaista suojausta on hiljattain kehitetty eteenpäin Suomessa ABB:n toimesta. He ovat tuoneet markkinoille uuden monitaajuusadmittanssisuojan, missä suojaukseen vaikuttaa perustaajuuden ohella

esiintyvät harmoniset vikavirrat. Monitaajuusadmittanssuojaus on ABB:n mukaan käytännössä kaiken kattava maasulkusuoja, minkä havaitsemiskyky on hyvä maasulkuvian esiintymistavasta riippumatta. Monitaajuusadmittanssijousta käsitellään myöhemmin kohdassa 6.6.3.

Perinteisempi perustajuinen admittanssijouaus voidaan toteuttaa kahdella tavalla, joko normaalina tai muutos pohjaisena. Normaalissa suojauksessa terveen verkon aikaiset nollavirta ja -jännite ovat mukana admittanssin laskennassa, mutta muutos- eli delta-pohjainen suojaus vähentää terveen verkon aikaiset arvot viallisen verkon arvoista ennen laskentaa. Laskentakaavat ovat siis seuraavat:

$$\underline{Y}_0 = \frac{\underline{I}_{0\text{fault}}}{-\underline{U}_{0\text{fault}}} \quad (12)$$

, missä

- \underline{Y}_0 = Nolla-admittanssi normaalilla mittaustavalla
- $\underline{I}_{0\text{fault}}$ = Vianaikainen nollavirta (terveen tilan nollavirta mukaanlukien)
- $-\underline{U}_{0\text{fault}}$ = Vianaikainen nollajännite (terveen tilan nollajännite mukaanlukien).

Delta-pohjaisella mittaustavalla nolla-admittanssi saadaan kaavalla

$$\underline{Y}_0 = \frac{\underline{I}_{0\text{fault}} - \underline{I}_{0\text{prefault}}}{-\underline{U}_{0\text{fault}} - \underline{U}_{0\text{prefault}}} = \frac{\Delta \underline{I}_0}{-\Delta \underline{U}_0} \quad (13)$$

Delta-pohjaisella laskentatavalla pyritään tulos saamaan immuuniksi esiintyvälle vikaresistanssille. Laskennan perustuessa vain virran ja jännitteen muutoksiin, myös mittamuuntajista aiheutuvaa mittausvirhettä saadaan pienennetyksi. Delta-pohjaista suojausta suositellaan käytettäväksi verkoissa, missä terveessäkin tilassa esiintyy suhteellisen suuria epäsymmetrioita tai jos virtamittauskytkentä on toteutettu Holmgreenin kytkennällä. (REX 640 Technical Manual, ABB : 472.)

Edellä esitetyistä kaavoista voidaan huomata, että admittanssijouauksen laskenta perustuu muiden suojien tapaan nollavirran ja -jännitteen mittaamiseen. Voidaan siis todeta, että vikatilanteissa suojauksen näkemät toimivat samantapaisesti suunnatun

suojauksen kanssa. Vian ollessa taustaverkossa rele näkee suojaamansa lähdön aiheuttaman admittanssin negatiivisena. Koska terveeseen lähdön kautta kulkeva vikavirta on lähes yksinomaan reaktiivista, pätee taustaverkossa olevan vian aikana likimain kaava

$$\underline{Y}_0 = -\underline{Y}_{Fdtot} \approx -j \frac{I_{eFd}}{U_{ph}} \quad (14)$$

, missä

- \underline{Y}_{Fdtot} = Suojattavan lähdön vaiheiden ja maan välisten admittanssien \underline{Y}_{FdA} , \underline{Y}_{FdB} ja \underline{Y}_{FdC} summa
- I_{eFd} = Suojattavan lähdön nollavirta kun vikaresistanssi on 0 ohm.
- U_{ph} = Nimellinen vaihejännite.

Teoreettisesti saatava taustaverkossa olevan lähdön admittanssi sijoittuu koordinaattiympyrässä kolmanteen neljännekseen, (kuva 23) ja tulos on riippumaton verkon maadoitustavasta. On kuitenkin syytä huomioida, että mittaustavasta aiheutuvat pienet virheet yhdessä pienen resistiivisen virran kanssa voivat aiheuttaa reisiivisen osan näkymisen positiivisena, jolloin admittanssi siirtyy neljänteen neljännekseen. Siirtyminen tulee huomioida määritettäessä laukeamisrajoja. (REX 640 Technical Manual, ABB : 473.)

Vian sijaitessa suojattavalla lähdöllä maasta erotetussa verkossa näkyy nolla-admittanssi releellä seuraavasti:

$$\underline{Y}_0 = \underline{Y}_{Bgtot} \approx j \left(\frac{I_{etot} - I_{eFd}}{U_{ph}} \right) \quad (15)$$

, missä

- \underline{Y}_{Bgtot} = Taustaverkon vaiheiden nolla-admittanssien \underline{Y}_{BgA} , \underline{Y}_{BgB} ja \underline{Y}_{BgC} summa
- I_{etot} = Kompensoimattoman verkon nollavirta kun vikaresistanssi on 0 ohm.

Edellisestä kaavasta voimme huomata, että releellä näkyvä nolla-admittanssi vastaa taustaverkon nolla-admittanssia, kun vika on suojattavalla lähdöllä. Vastaavassa vikatilanteessa, jos verkko on kompensoitu, on nolla-admittanssi seuraava:

$$\underline{Y}_0 = \underline{Y}_{Bgtot} + \underline{Y}_{CC} \approx \frac{I_{RCC} + j(I_{etot} * (1-K) - I_{eFd})}{U_{ph}} \quad (16)$$

, missä

- \underline{Y}_{CC} = Maadoituksesta muodostuva admittanssi (kompensointikela ja mahdollinen rinnakkaisvastus)
- I_{RCC} = Rinnakkaisvastuksen nimellisvirta
- K = Kompensointiaste.

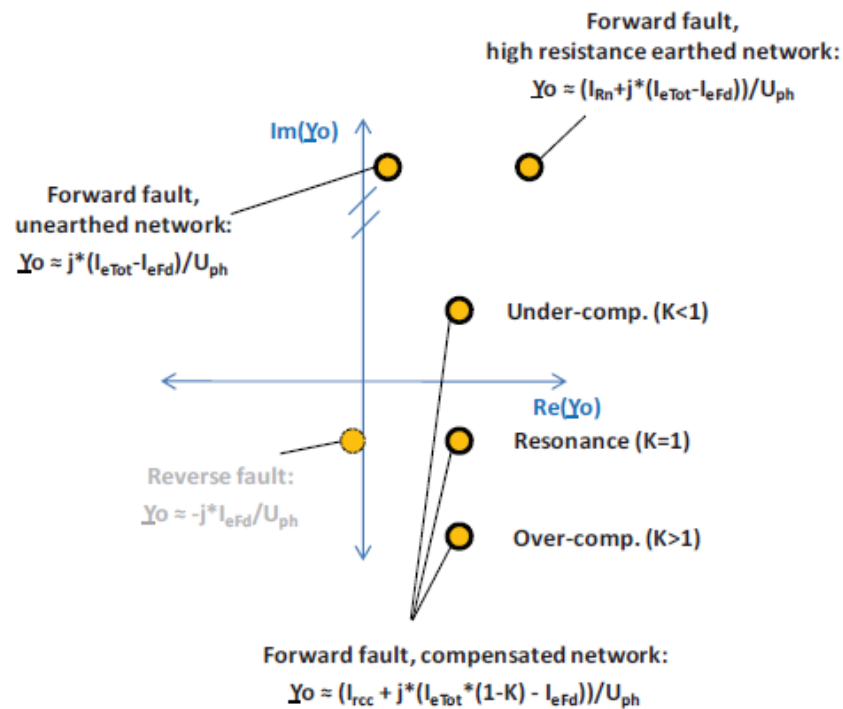
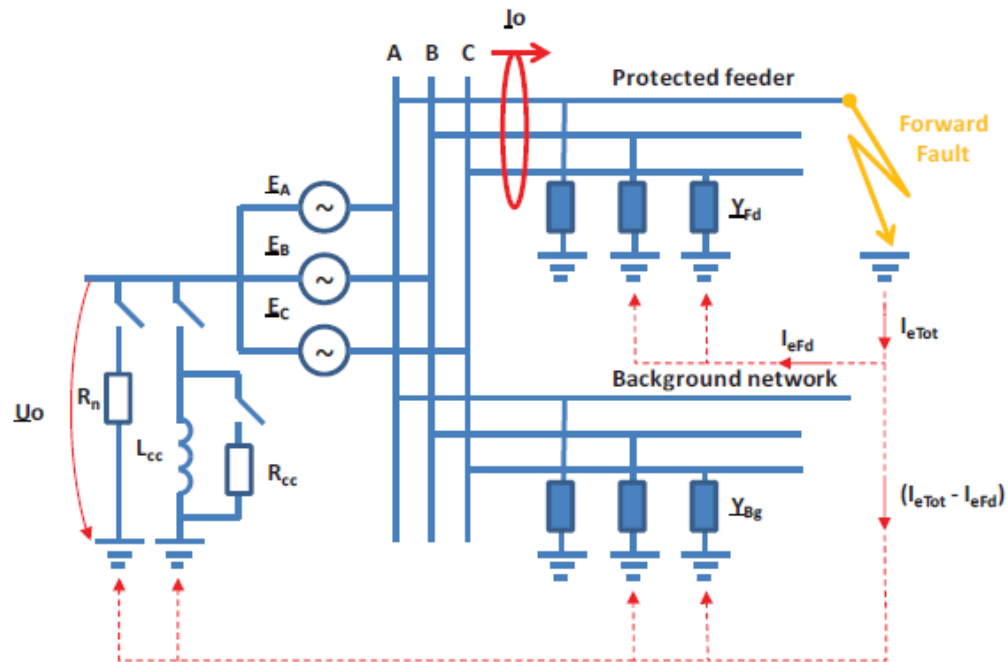
Kaavan 16 mukaisesti kompensoidussa verkossa nolla-admittanssi on taustaverkon ja maadoituslaitteiston nolla-admittanssien summa. Admittanssin imaginaariosaan vaikuttaa verkon kompensointiaste. Käsitellään vielä tilanne, missä verkko on maadoitettu suuren vastuksen yli. Tällöin nolla-admittanssi saadaan kaavalla

$$\underline{Y}_0 = \underline{Y}_{Bgtot} + \underline{Y}_{Rn} \approx \frac{I_{Rn} + j(I_{etot} - I_{eFd})}{U_{ph}} \quad (17)$$

, missä

- \underline{Y}_{Rn} = Maadoitusvastuksen nolla-admittanssi
- I_{Rn} = Maadoitusvastuksen nimellisvirta.

Tilanne on siis vastaava kuin kompensoidussa verkossa, mutta kompensointilaitteiston admittanssin sijaan taustaverkon admittanssiin lisätään maadoitusvastuksen yli muodostuva nolla-admittanssi. Seuraavassa kuvassa 23 näemme edellä kuvattujen tavanomaisimpien verkko- ja vikatilanteiden admittanssien sijoittumisen koordinaatistoon.



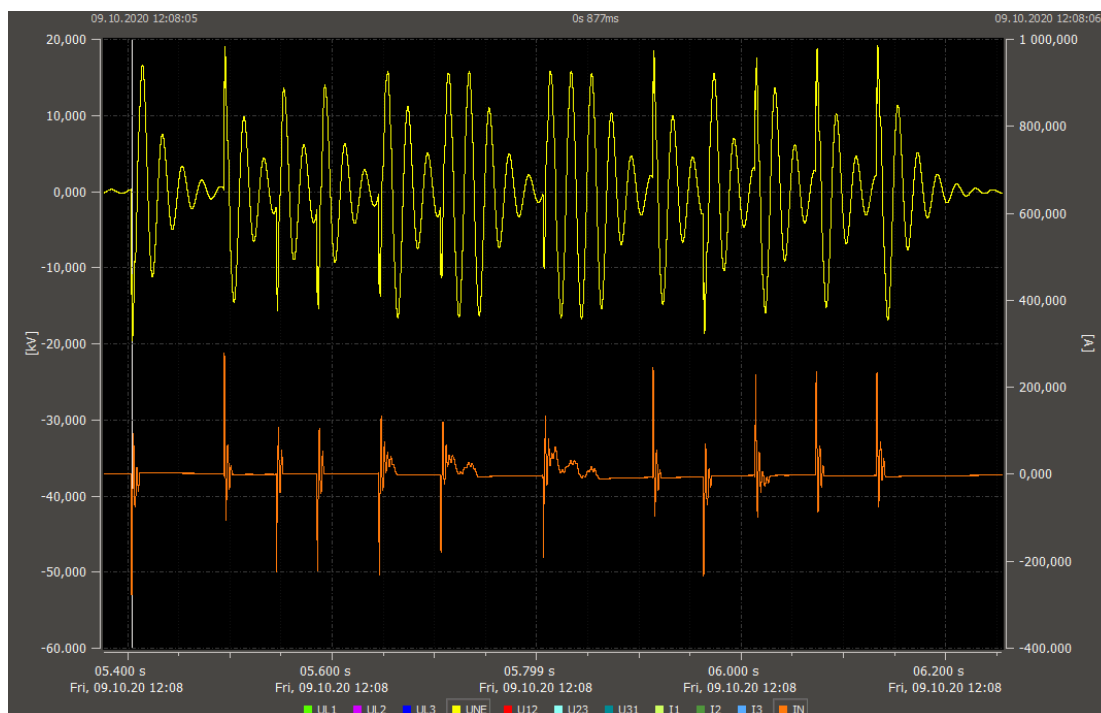
Kuva 23. Nolla-admittansien muodostuminen verkon vikatilanteessa ja niiden sijoittuminen koordinaatistoon. (REX 640 Technical Manual, ABB : 477)

Admittanssisuojan parempi herkkyys voidaan saavuttaa, jos käytetään nollavirran mittaukseen kaapelivirtamuuntajaa Holmgreen-kytkennän sijaan. Myös nollajännite on suositeltavaa mitata avokolmiokytkentää käyttäen. (REX 640 Technical Manual, ABB: 478.)

6.6 Katkeilevan vian maasulkusuojat

Katkeilevassa maasulussa vaiheen ja maan välillä syntyy, millisekunnin kymmenyksistä muutamien satojen millisekuntien välein, peräkkäisiä nollavirta- ja jännitepulsseja eli transientteja. Vian alkuhetkellä esiintyvät terävät transienttipiikit kestävät tyypillisesti vain noin millisekunnin, mutta esiintyvät virtapiikit voivat nousta hyvin korkeiksi, jopa tuhansiin ampeereihin. Katkeileva maasulku on tunnetusti hankala vika perinteisten, perustaajuisiin maasulkuvikoihin suunniteltujen maasulkusuojien havaittavaksi, sillä näiden vikojen virtapulsstit ovat monesti hyvin epämääräisiä ja risaisia taajuudeltaan. T. (Wahlroos, A. & Altonen, J. 2014, 4-5.)

Kuvassa 24 nähdään nollavirran ja -jännitteen käyttäytyminen tyypillisen katkeilevan maasulkuvian aikana kompensoidussa verkossa.



Kuva 24. Esimerkki nollajännitteen (U_0) sekä -virran I_0 transienteista katkeilevassa viassa. Kuvassa useita peräkkäisiä läpilyöntejä, eli valokaaria.

Kuten kuva 24 osoittaa, on virta-transientit hyvin teräviä piikkejä katkeilevassa viassa, mikä vaikeuttaa niiden havaitsemista huomattavasti. Havaitseminen periteisellä suunnatulla suojalla on vaikeaa. Vaihtoehtoisesti suojaus voidaan toteuttaa qu-

algoritmipohjaisena. Perinteiset ylivirta ja ylijännitesuojat on tarkoitettu hitaampien perustaaajuisten vaihteluiden tarkasteluun. Katkeilevat viat aiheuttavat suuria jännite- ja virtapiikkejä, jotka rasittavat verkon rakenteita ja eristyksen kestävyyttä. Riittävän suojaustason saavuttamiseksi ja lisävahinkojen välttämiseksi erillinen katkeilevan vian suojaus on siis hyvinkin tarpeellinen. Tutustutaan seuraavaksi muutamiin katkeilevan suojausvaihtoehtoihin.

6.6.1 Perinteinen katkeileva maasulkusuoja

Perinteiset katkeilevat suojat perustuvat peräkkäisten transienttipiikkien havaitsemiseen. Suoja voi olla joko suuntaamaton tai suunnattu ja havahtuu, kun asettelurajat ylittäviä transienttipulsseja ilmenee. Aseteltavia parametrejä ovat yleensä:

- transienttivirtapiikin havahtumisraja
- Uo-jännitteen havahtumisraja
- suunta: Forward / Reverse / Non-directional
- pulssilukumäärä
- Reset delay time
- Operate delay time.

Transienttivirtapiikin havahtumisraja määrittää nimensä mukaisesti havahtumisrajan virralle. Valmistajasta ja releestä riippuen virran havahtuminen voi olla sidottu Uo-jännitteeseen ja tälle määritetyn havahtumisrajan ylittymiseen. Uo-jännitteeseen sitomisella pyritään karsimaan havahtumisvirheitä.

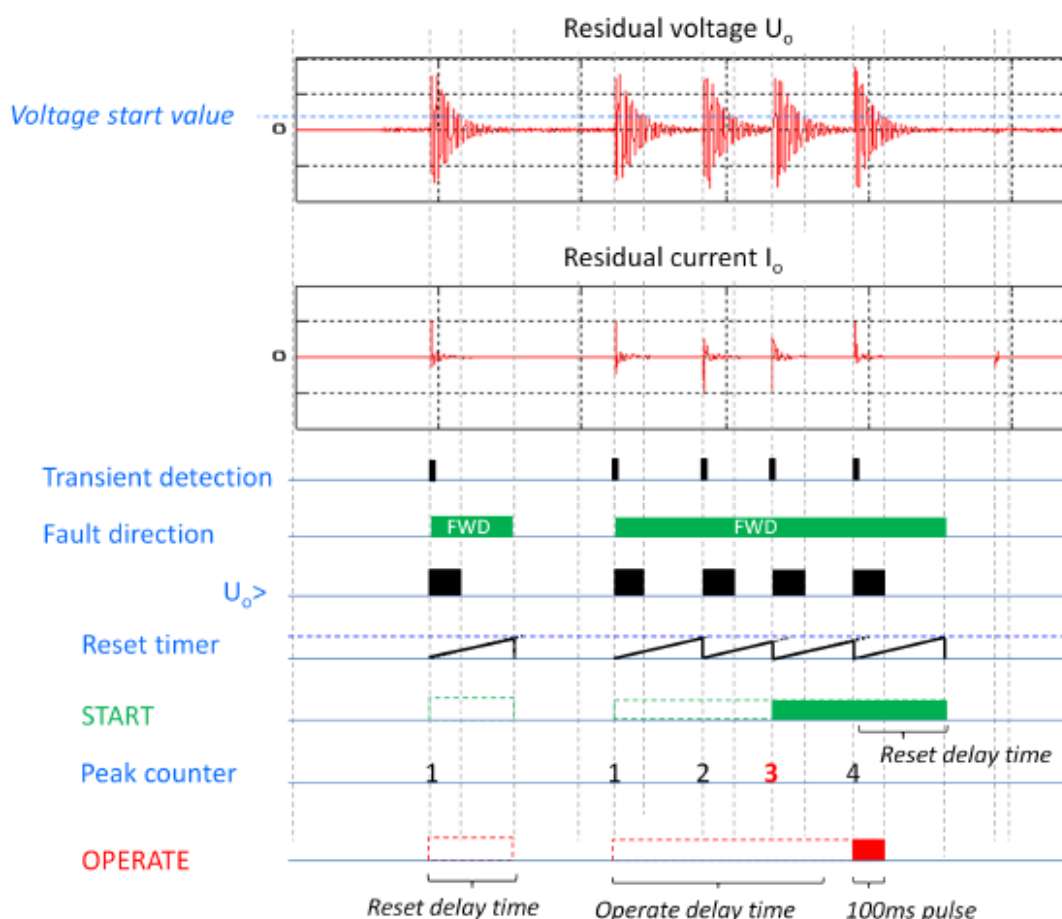
Yleensä releissä määritetään, onko suoja suunnattu vai suuntaamaton. Joissain tapauksissa suunnattulle tai suuntaamattomalle suojalle voi olla täysin omat parametrisointilohkot, mutta monesti tämä valitaan samassa suojassa yhdellä parametrilla, joita ovat forward, reverse tai non-directional.

Pulssilukumäärällä määritetään transienttien määrä, mikä tulee ilmetä suojan toimimiseksi. Yleensä määrä on valittavissa kutakuinkin väliltä 3-20 kpl.

Reset delay time (RDT) on määritettävä aikaparametri, minkä jälkeen suojan havahtuminen nollautuu, mikäli uusia transientteja ei ajan sisällä ole tapahtunut. RDT alkaa juosta aina uudelleen uuden ilmestyneen transientin kohdalta.

Operate delay time (ODT) on käytännössä määritettävä viive laukaisulle. Tämä aika alkaa juosta heti ensimmäisestä transientista. Jotta lopullinen laukaisu tapahtuu tämän ajan kuluttua, tulee pulssilukumäärän täytyä tämän ajan sisällä. Yleensä, mikäli ODT ehtii kulua loppuun ennen pulssimäärän täyttymistä, mutta RDT vielä juoksee ja seuraava transientti tämän ajan kuluessa ilmenee, seuraa välitön laukaisu.

Esimerkin osin perinteistyyllisestä REX 640 -releen katkeilevan suojan toiminnasta näemme kuvassa 25.



Kuva 25. Katkeilevan maasulkusuojan toiminta ABB:n REX 640 -releessä. (REX 640 Technical Manual, ABB : 465)

Kuten kuvan 25 toimintasekvenssi näyttää, suojaus kriteerit täyttyvät, kun 3 perättäistä transienttia on mitattu. Suoja antaa laukaisukäskyn, kun OPT on kulunut.

ABB:n REX 640 -releessä katkeilevan vian suojaus on sama suojauslohko edellä luvussa 6.4.3 esitetyn transienttisuojan kanssa ja parametreista vain valitaan kumpi suojaustapa on käytössä. Ero suojienvälillä on käytännössä vain *Peak counter limit* -parametri, millä määritetään, kuinka monen riittävän nopealla tahdilla esiintyneen transientin jälkeen suoja toimii.

Transienttipulssien lukumäärän laskentaan perustuvat myös Schneider Electricin VAMP-releiden suojausfunktiot. Suojauslogotimi mittaa U_o-jännitteen perustaajuista komponenttia sekä I_o-virran transientteja 625 µs:n välein. Tämä tarkoittaa, että 50 Hz:n yhdestä pulssista saadaan 32 mittausjaksoa kohti. Toimiakseen riittävän tarkasti ja nopeasti tulee U_o-jännitteen mittaus toteuttaa suoraan eikä laskennallisesti. Koska virtatranssientit ovat hyvin lyhyitä, kestoiltaan millisekunnin kymmenyksinä, ei edellä mainittu mittausaajuus aina riitä transienttien havaitsemiseksi. VAMP-releissä virtapulssit kuitenkin suodatetaan anti-aliasing eli valetiston estosuotimella, mikä suodattaa mittauskyvyn yli menevien transienttien vaikutusta signaaliin. Suodatus myös osin leventää suodatettavia transientteja, joten riittävän korkeat transientit, mistä suodatuu edes noin viidesosan mittaisia pulsseja mittausaajuuteen nähden, voidaan havaita. (Schneider Electric, VAMP 255 User manual: 100.)

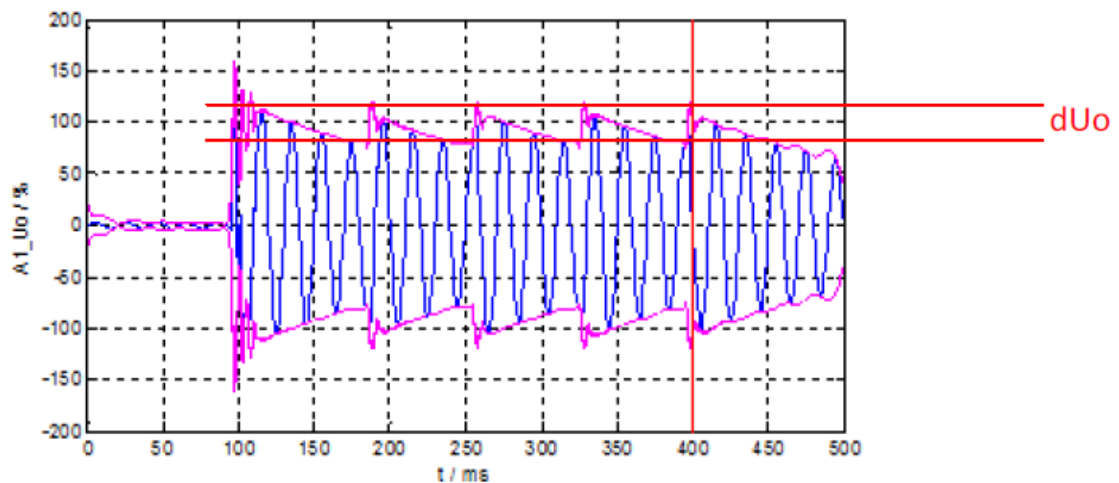
VAMP-releiden transienttisuoja pyrkivät myös paikantamaan viallisen lähdön perinteisellä nollavirran suunnan määrittämisellä. Vaikka suojauslogotimi on rakennettu herkemmäksi virran merkilliselle suunnalle ja mittausajankohdalle, + vai - , kuin mitatun virran todelliselle amplitudille, on silti huomattava että transienttien suuret heilahtelut vaikeuttavat suuresti suunnan määrittämistä kulman perusteella ja voivat aiheuttaa väärän suuntaisia tulkintoja.

6.6.2 A.Eberlen katkeileva qu²/qui-maasulkusuoja

Tämä katkeilevan vian suoja perustuu osin jo edellä luvussa 6.4.3 käsitellyyn A.Eberlen qu²-algoritmiin pohjautuvaan transienttisuojaan. Suojauksessa qu²-transientiaalgoritmi

tunnistaa transientit ja qui-algoritmi määrittelee, täyttääkö havaittu transienttivika katkeilevan vian kriteerit.

Osassa vanhempia suojausfunktioita katkailevan vian havainnointi perustui määritetyn aikaikkunan sisällä Uo-jännitteen nousemiseen toistuvasti yli suojassa määritellyn havahtumisrajan. Ongelmia tässä havainnointivavassa tuotti se, ettei Uo-jännite välttämättä laskekaan alle asetellun havahtumisrajan koko vian esiintymisaikana, jolloin uutta havahtumista ei tapahdu, vikalaskuri ei etene, eikä laukaisukriteerit näin ollen pääse täyttymään. EOR-D-releessä katkeilevan vian kriteerinä pidetäänkin määriteltävän havahtumisrajan sijaan Uo-jännitteessä esiintyvää vaihtelua. Parametreissa määritetään Uo-jännitteelle vaihteluarvo dU_o , minkä ylittyessä vika luetaan katkeilevaksi viaksi yksittäisen vian sijaan. Nollavirran minimirajalla puolestaan varmistetaan, ettei mittausteknisesti liian pienillä virroilla yritetä määrittää vian suuntaa. Kuvassa 26 näemme esimerkin Uo-jännitteen muutoksista eräänlaisen katkeilevan vian aikana sekä määritelty vaihteluväli dU_o jännitteen muutokselle vian tulkitsemiseksi katkeilevaksi viaksi.



Kuva 26. Yksi esimerkki Uo-jännitteen vaihtelulle katkeilevan vian aikana (Earth fault detection relay, Operating instructions manual: 89, A. Eberle GmbH & Co. KG)

Qui-algoritmi pohjainen katkeilevan vian tarkastelu siis osin poistaa ongelmat vioissa, missä Uo-jännite ei tipukaan peräkkäisten transienttien välissä riittävän alhaiseksi. Laukaisukriteerit määritetään tässä suojassa yhdessä Qu2-algoritmin kanssa.

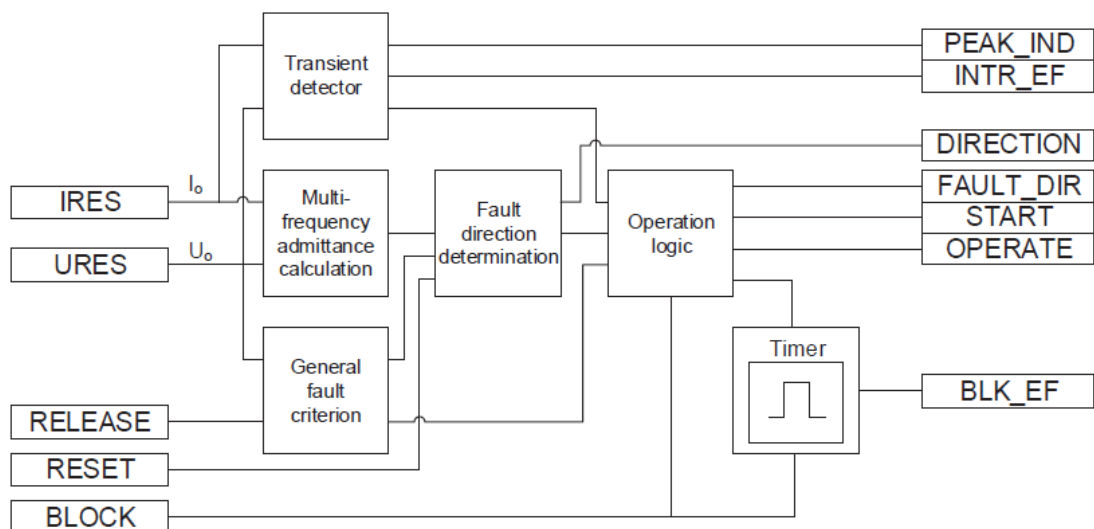
6.6.3 Monitaajuusadmittanssisuoja (MFADPSDE)

ABB:n markkinoille saattama monitaajuusadmittanssisuoja on ainakin valmistajan antamien tietojen mukaan yksi monikäyttöisimmistä maasulkusuojausalgoritmeista tähän asti. Suojausfunktion lähtökohtaisena tavoitteena on ollut yhdistää maasulkusuojaus yhdeksi toimivaksi suojaksi monien yksittäisiin vikoihin toimivien suojien sijasta. Sen luvataan kykenevän havaitsemaan viat, ovat ne sitten jatkuvia, katkeilevia tai transienttivikoja.

Monitaajuusadmittanssisuoja perustuu nimensä mukaisesti admittanssin valvontaan, missä kokonaisadmittanssi määritetään useasta ilmenevästä taajuuskomponentista pelkän perustaajuisen komponentin sijaan. Kun huomioon otetaan myös perustaajuudesta poikkeavia vikavirtoja ja jännitteitä, saavutetaan hyvä havaitsemiskyky myös kompensoidun verkon vikatilanteissa.

Kun maasulkuvirran kompensointi on käytössä, vikatilanteen sattuessa valtaosa perustaajuisesta vikavirrasta kompensoidaan Petersenin kelalla. Kela kompensoi tehokkaasti kuitenkin vain perustaajuisia vikavirtoja, jolloin jäljelle jäävästä vikavirrasta entistä merkittävämpi osa koostuu harmonisista vikavirroista.

Monitaajuusadmittanssisuoja perustuu toimintakarakteristiikaltaan kuvan 27 kaavioon.



Kuva 27. Monitaajuusadmittanssisuojan toimintakaavio (REX 640 Technical Manual, ABB : 541)

Monien suojiin tapaan tässäkin suojausalgoritmissa perustavana vian havaittajana ja funktion käynnistyskriteerinä toimii nollajännitteelle määritettävä kynnyisarvo, *Voltage Start Value (VSV)*. Vaihtoehtoisesti käynnistys voidaan tehdä etäohjatusti. Jännitteen kynnyisarvo tulee määritellä aina korkeammaksi kuin verkossa terveessä tilassa esiintyvä korkein mahdollinen nollajännite. Käytännössä korkein mahdollinen terveen tilan nollajännite saavutetaan resonanssipisteessä, jolloin kompensointi on täydellinen. VSV:lle voidaan määritellä kaikkiaan kolme eri suojausporrasta, jolloin matalampia portaita voidaan käyttää esimerkiksi hälyttävinä korkeaohmisten ja vikaimpedanssia sisältävien vikojen havainnointiin ja ylintä porrasta matalaohmisten suurten vikavirtojen vikoihin. Kun portaat porrastetaan ajallisesti, saadaan toteutetuksi kattava suojauskokonaisuus.

Kun nollajännitearvo ylitetään, monitaajuusadmittanssilaskenta käynnistyy. Kokonaisnolla-admittanssi lasketaan perustaajuuden lisäksi toisen, kolmannen, viidennen, seitsemännen ja yhdeksännen harmonisten virtojen ja jännitteiden antamana summana. Summa koostuu niiden taajuuksien admittansseista, joiden virta- ja jännitepulssit ovat havaittavissa. Perustaajuinen nolla-admittanssi saadaan kaavasta

$$\overline{Y}_0^1 = \frac{3 \cdot \overline{I}_0^1}{-\overline{U}_0^1} = G_0^1 + j * B_0^1 \quad (18)$$

, missä

- \overline{Y}_0^1 = perustaajuinen neutraaliadmittanssi
- $\overline{I}_0^1 = \frac{\overline{I}_A^1 + \overline{I}_B^1 + \overline{I}_C^1}{3}$ = perustaajuinen vaihevirta
- $\overline{U}_0^1 = \frac{\overline{U}_A^1 + \overline{U}_B^1 + \overline{U}_C^1}{3}$ = perustaajuinen jännite
- G_0^1 = perustaajuinen konduktanssi
- B_0^1 = perustaajuinen susceptanssi.

Harmoniset admittanssikomponentit saadaan vastaavasti kaavasta

$$Im \overline{Y}_0^n = \frac{3 \cdot \overline{I}_0^n}{-\overline{U}_0^n} = -j * B_0^n \quad (19)$$

, missä

- Yläindeksi (n), on harmonisen komponentin tunnus (2, 3, 5, 7 tai 9)

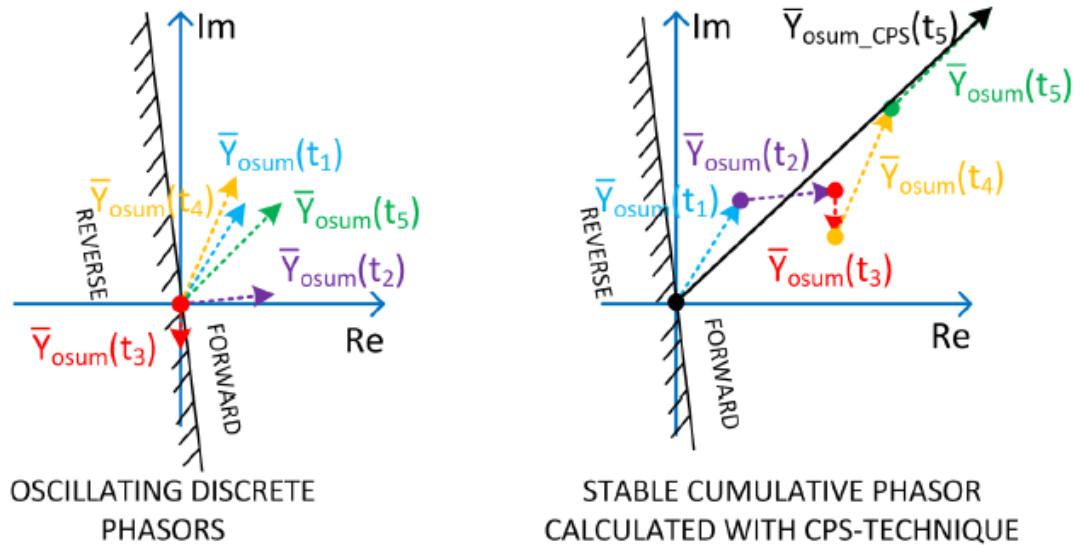
Lopuksi saadut admittanssikomponentit summataan yhteen seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\overline{Y_{osum}} = Re[\overline{Y_0^1}] + j * Im[\overline{Y_0^1} + \sum_{n=2}^9 \overline{Y_0^n}] = G_0^1 + j * B_{osum} \quad (20)$$

Katkeilevissa ja transienttisissa vioissa nopeasti heilahtelevat virta ja jännitepiikit aiheuttavat vaikeuksia vian suunnan vakaalle määrittämiselle virran ja jännitteen perusteella. Perinteisessä suojauksessa analoginen signaali muutetaan digitaaliseksi ottamalla siitä riittävä määrä näytteitä, minkä jälkeen tuloksesta muodostetaan vektorisuure, amplitudi ja kulma, DFT:tä eli diskreettiä Fourier muunnosta käyttäen. (Romppainen 2016.)

Vektorin suuruus ja suunta määräytyvät pitkälti signaalista otettujen näytteiden ottohetkestä, määrästä ja näytteenottotaajuudesta. Transienttien ja katkeilevien vikojen tapauksessa näytteenottotaajuus jää helposti liian pieneksi, jolloin saatavan vektorin suunta ja suuruus voivat peräkkäisillä mittauksilla heittää suuresti toisistaan. Tällöin yksittäisellä mittauksella tehtävä vian suunnan määrittäminen voi suurella todennäköisyydellä olla virheellinen.

Monitaajuusadmittanssisuojassa edellä kuvattua ongelmaa on ratkaistu käyttämällä kumulatiivista komponenttien summaustekniikkaa, *Cumulative Phasor Summing (CPS)*. CPS laskee kumulatiivisesti yhteen viiden eri aikana otetun mittaustuloksen kokonaistuloksen, jolloin yksittäinen mittaus ei määritä yksinään vian suuntaa ja virheen todennäköisyys pienenee merkittävästi. Kuva 28 esittää summaustekniikan periaatteen vektorimuodossa.



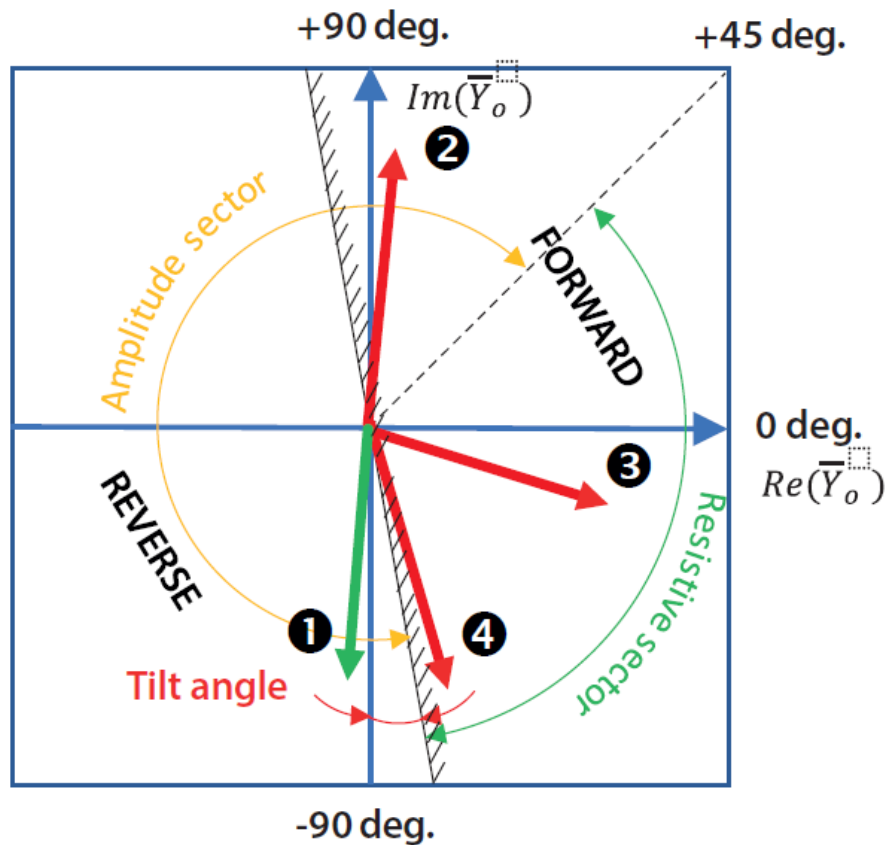
Kuva 28. CPS-summaustekniikan toimintaperiaate. (REX 640 Technical Manual, ABB: 545)

Kuvassa yksittäinen vektori vastaa yhtä admittanssin laskentatulosta ajan hetkellä $[t_n]$. Rele laskee admittanssisumman ensin ajanhetkellä t_1 , minkä jälkeen se summaa saatuun tulokseen seuraavan mittaushetken t_2 admittanssin, sitten t_3 admittanssin ja niin edelleen, kunnes 5 mittausta on tehty. Aikaikkuna, jona 5 mittausta suoritetaan, määräytyy määritellyn *Reset delay time*:n (RDT) perusteella. CPS-algoritmi suorittaa suunnan määrittämisen aina ajassa $1,2 \cdot \text{RDT}$. RDT:n tulee olla vähintään 500 ms jolloin, suunta saadaan määritettyä nopeimmillaan 600 ms kuluessa. Summatun tuloksen $\bar{Y}_{osum_CPS}(t_5)$ perusteella rele määrittää vian lopullisen suunnan. Kuvan mukainen vektorisumma saadaan siis kaavalla

$$\bar{Y}_{osum_CPS}(t_5) = \bar{Y}_{osum}(t_1) + \bar{Y}_{osum}(t_2) + \bar{Y}_{osum}(t_3) + \bar{Y}_{osum}(t_4) + \bar{Y}_{osum}(t_5) \quad (21)$$

Esimerkkikuvasta 28, voimme nähdä, kuinka yksittäinen hetkellinen tulos ajan hetkellä (t_3) aiheuttaisi vääräsuuntaisen tulkinnan vian todellisesta suunnasta, mutta kumulatiivisella summaustekniikalla suunta saadaan vastaamaan todellisuutta.

Tarkastellaan seuraavaksi, miten saatu admittanssi käyttäytyy eri tilanteissa. Kuva 29 esittää erilaisten vikatilanteiden vaikutuksen admittanssin suuntaan.



Kuva 29. Admittanssin suunta erilaisissa vikatilanteissa 1-4 (REX 640 Technical Manual, ABB: 552)

Tilanteessa 1 vika on taustaverkossa ja suojattavan lähdön admittanssin oletetaan olevan vallitsevasti kapasitiivinen. Esimerkki on pätevä vikatyypistä riippumatta. Tässä vikatilanteessa mahdolliset esiintyvät harmoniset osat kääntävät vektoria kohti negatiivista $Im(Y_0)$ -akselia. (REX 640 Technical Manual, ABB: 546.)

Tilanteessa 2 vika on suojattavalla lähdöllä ja verkko on maasta erotettu. Vikatilanne on pätevä myös kompensoidun verkon tilanteissa, kun harmoniset osakomponentit ovat vallitseva tekijä. Vektorisuunta on pätevä verkon kompensointiasteesta riippumatta ja kasvava harmonisten osuus kääntää vektoria kohti positiivista $Im(Y_0)$ -akselia. (REX 640 Technical Manual, ABB: 546.)

Tilanteessa 3 ja 4 vallitsee korkeaohminen vika suojattavalla lähdöllä eikä harmonisia komponentteja ole. Verkko on kompensoitu. Kun harmonisia komponentteja ei ole läsnä, vektorin suunta määräytyy kompensointiasteen perusteella. Kun verkkoa

ylikompensoidaan, vektori kääntyy kohti negatiivista $\text{Im}(Y_0)$ akselia. (REX 640 Technical Manual, ABB: 546.)

Kuten tavallista, monitaajuusadmittanssisuojassakin nollavirran suuruus on yksi havahtumiskriteereistä. Kuitenkin monista suojausfunktioista poiketen havahtumiskriteerinä on mitatun nollavirran sijaan stabiloitu nollavirta. Stabiloitu nollavirta lasketaan perustaajuisesta stabiloidusta admittanssista kertomalla se nimellisellä, eli vikaa edeltävällä, vaihejännitteellä. Ensiksi stabiloitu perustaajuinen admittanssi saadaan kaavasta

$$\bar{Y}_{0\text{stab}}^1 = \frac{3 \cdot \bar{I}_{0\text{CPS}}^1}{-\bar{U}_{0\text{CPS}}^1} = G_{0\text{stab}}^1 + j * B_{0\text{stab}}^1 \quad (22)$$

, missä

- $\bar{Y}_{0\text{stab}}^1$ = stabiloitu admittanssiestimaatti laskettuna perustaajuisista komponenteista CPS-tekniikalla
- $\bar{I}_{0\text{CPS}}^1$ = perustaajuinen nollavirta laskettuna CPS-tekniikalla
- $\bar{U}_{0\text{CPS}}^1$ = perustaajuinen nollajännite laskettuna CPS-tekniikalla.

Koska admittanssi on virran ja jännitteen suhde toisiinsa, ei tuloksen suuruusluokan kannalta ole merkitystä, lasketaanko suhdeluku yhdestä vai useammasta yhteen lasketuista mittauksista. Kumulatiivisesti summatuista useasta virta ja jännitetäyteestä saadaan kuitenkin selkeästi vakaampi ja varmempi lopputulos. Stabiloitu virta saadaan kaavalla

$$\bar{I}_{0\text{stab}}^1 = (G_{0\text{stab}}^1 + j * B_{0\text{stab}}^1) * U_{\text{baseres}} = I_{0\text{Cosstab}}^1 + j * I_{0\text{Sinstab}}^1 \quad (23)$$

, missä

- U_{baseres} = järjestelmän nimellinen vaihejännite.

Huomioitavaa on, että stabiloidun nollavirran laskennassa käytetään nimellistä vaihejännitettä. Kaavassa oletetaan, että katkeileva vika on yleensä ”jäykkä” (vikavastukseton) maasulkuvika kaapelin vaipan ja johtimen välillä, mistä seuraa

nollajännitteen kasvaminen vaihejännitteen suuruiseksi. Stabiloitu laskennallinen virta mahdollistaa vian mallintamisen jatkuvana maasulkuna, jolloin vian poiskytkentä voidaan tehdä samoja jatkuvan vian parametrejä käyttäen. (Wahlroos & Altonen 2017.)

Kun nollavirta lasketaan stabiloidusta admittanssista, päästään eroon vikaresistanssin vaikutuksesta tulokseen. Tämä on seurausta siitä, että nollavirta ja -jännite kasvavat tai pienenevät samassa suhteessa vikaresistanssin muuttuessa. (REX 640 Technical Manual, ABB: 549-550.)

Stabiloitu nollavirta on suure, mitä suojausfunktio vertaa asetettuun kynnyksarvoon. Verkon käyttötavasta riippuen algoritmi vertaa saadun stabiloidun virran resistiivistä tai kapasitiivista virran osaa. Haluttaessa tarkkailtava osakomponentti voidaan myös määrittää itse.

Monitaajuusadmittanssisuoja on suhteellisen uusi suojausfunktio, mitä on vielä vähäisesti käytössä. Tulevaisuus näyttää, kuinka toimivaksi suojausratkaisuksi tämä suoja osoittautuu.

7 Maasulkutilanteiden havaitsemiseen vaikuttavat tekijät

Edellä käyty teoria sekä erilaiset suojaustavat osoittavat hyvin, kuinka monitahoinen ilmiö maasulkutilanne on ja kuinka monet asiat vaikuttavat maasulkuilmiöön. Olennaisesti vaikuttavia tekijöitä ovat maadoitustapa, verkon rakenne, galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus, maaperän resistiivisyys ja vikaresistanssin suuruus. Mainittujen määreiden lisäksi vika voi esiintyä joko pysyvänä tai katkeilevana, yksi- tai useampivaiheisena verkon tai kuorman puolelta maadoittuneena.

Maasulkuvian käyttäytyminen on suuresti riippuvainen verkon käyttötavasta ja siitä, ajetaanko sitä maasta erotettuna, maadoitettuna suuren vai pienen impedanssin yli vai sammutettuna eli kompensoituna Petersenin kelalla. Maadoitustapa vaikuttaa suuresti vian aikana esiintyviin nollajännitteisiin ja -virtoihin. Suoraan ei voida todeta jonkin maadoitustavan olevan paras ratkaisu, ja siksi maadoitustapaa valittaessa huomioidaan verkon käytön asettamat vaatimukset, turvallisuus sekä ympäristötekijät. Esimerkiksi resistanssin yli maadoitettuja verkkoja käytetään teollisuuden ratkaisuissa, missä

mootteita ja laitteita halutaan suojata vikatilanteessa teräviltä virta- ja jännitepiikeiltä, mutta samalla nopea vian irrottaminen mahdollistetaan ja henkilöturvallisuus varmistetaan. Suurten resitanssien yli maadoitus taas pienentää vian aikaista maasulkuvirtaa niin pieneksi, että verkon käyttöä on mahdollista jatkaa, mikäli henkilöturvallisuus ei viallisen verkon käytöstä vaarannu. Standardi SFS 6001 määrittää, että Suomessa verkon käyttö yksivaiheisessa maasulussa on sallittua korkeintaan kahden tunnin ajan, kun maasulun sijaintia ei tiedetä, mutta voidaan todeta, ettei viasta aiheudu ilmeistä ja välitöntä vaaraa. Kun sijainti on selvitetty ja vaarattomuus todettu, voidaan käyttöä tarvittaessa jatkaa pidempäänkin. Kuten edellä teoriassa todettiin, käytetään Suomessa vallitsevien maadoitusolosuhteiden vuoksi keskijänniteverkkoja yleensä maasta erotettuna tai sammutettuna. Jotta esiintyvien vikatilanteiden kirjoa voidaan jollain tasolla rajata, keskitytään suojausfunktioiden vertailussa vain maasta erotettujen ja sammutettujen verkkojen vikatilanteisiin.

7.1 Näytteenottotaajuus

Aikaisemmin esiteltyjen suojausratkaisujen perusteella voimme todeta, että maasulun suojausfunktiot perustuvat lähes poikkeuksetta vian aikana esiintyvien maasulkuvirran (I_o) ja nollajännitteen (U_o) sekä näiden välisten suhteiden tarkkailuun. Tämä on ymmärrettävää, sillä virta ja jännite ovat yksinkertaisesti sähkövirrassa esiintyvät mitattavat suureet, ja ne sisältävät kaiken tarjolla olevan tiedon viasta. Vian havaitsemisen kannalta olennaista on, miten näitä suureita havainnoidaan ja hyödynnetään.

Yksi tärkeimmistä osa-alueista vian havainnoinnissa on näytteenottotaajuus. Mitä suurempi on suureiden näytteenottotaajuus, sitä tarkemmin vian aikaisia tilanteita voidaan tarkastella. Toisaalta mitä suurempi näytteenottotaajuus on, sitä enemmän mittausdataa kertyy ja sitä enemmän datan analysointi vaatii prosessointitehoja ja aikaa. Korkeampi näytteenottotaajuus vaatii suojareleeltä enemmän, mikä näkyy aina suojauksen hinnassa. Näytteenottotaajuuden opimointi on siis suojauksen kannalta hyvin oleellinen asia. Vian havaitsemisen kannalta oleelliset asiat tulee saada mitatuksi, mutta turhaa dataa tulisi välttää, jotta riittävän nopea ja kustannustehokas suojaus voidaan toteuttaa.

7.2 Suojausfunktioiden vertailua

Itse vikatilanne voidaan suojauksen kannalta jakaa kahteen osa-alueeseen: vian alkuhetkeen sekä jatkuvan tilan vikaan. Kuten aiemmin transienttisuoja läpi käydessä todettiin, vian alkuhetkellä verkossa esiintyy perustaajuisen komponentin rinnalla transienttiset virta- ja jännitesuureet, mitkä vaimenevat ajan kuluessa pois. Kun transientit ovat vaimenneet, jäävät viasta jäljelle perustaajuiset nollavirta ja -jännite.

Koska muodostuvat transientit ovat riippumattomia, onko verkko sammutettu vai maasta erotettu, on ollut järkevää hyödyntää näitä ilmiöitä vikasuojauksessa. Transienttien havaitseminen on olennainen osa etenkin katkeilevien maasulkuvikojen suojausratkaisuja, sillä jatkuvan tilan osaa viasta ei esiinny. Jatkuvan tilan esiintymättömyys on ongelma esimerkiksi nollavirran ja jännitteen suuruuden ja suunnan mittaukseen perustuville perinteisille suojoille, sillä selkeää ja vakaata virta- ja jännitekomponenttia ei esiinny. Vian alkuhetkellä nopeataajuiset jännite ja virtapulsstit ylittävät perinteisten suojausalgoritmien näytteenottotaajuudet siinä määrin, että näytteistä laskettava virran suunta voi suurella todennäköisyydellä olla väärä. Tätä ongelmaa on korjattu uusissa vikasuojausfunktioissa ja esimerkki tästä on kumulatiivinen vian suunnan määrittäminen monitaajuusadmittanssisuojoissa, luvussa 6.6.3.

Edellä luvussa 6.4.2 käsiteltiin yhtä ensimmäisistä markkinoilla olevista transienttisuojoista, Wischer-suojautapaa. Suoja perustui vian alussa esiintyvän transientin ensimmäisen aallon tarkkailuun. Suoja on vuosien saatossa todettu hyvinkin varmatoimiseksi, matalaohmisten vikojen tarkkailussa, kunhan vain vian ensimmäinen aalto saadaan varmasti mitatuksi. Ongelmat tässä suojausessa ovat 50 Hz vikakomponentin suodatus kaistanpäästösuodattimella, minkä seurauksena kaikki alle 100 Hz:n taajuudet suodatetaan rankalla kädellä pois tutkittavasta transientista. Kun verkon vikavastus kasvaa, transientit vaimenevat nopeasti, jolloin suoja ei enää käytännössä näe koko vikaa. Voimakkaasti kapasitiiviset verkot aiheuttavat myös tälle suojaustavalle ongelmia. Mitä suurempia osia suojatusta verkosta kaivetaan maan alle kaapeliksi, sitä kapasitiivisempia verkot ovat, mistä seuraa, että muodostuvien varaustansienttien taajuudet tippuvat aina vain matalammiksi. Käytännön tilanteita on tullut vastaan, missä voimakkaasti kapasitiivisen verkon transientit ovat olleet vain liki 100 Hz:n luokkaa, mitkä Wischer-suojauksessa suodatetaan hyvin suurelta osin pois.

Voidaan siis todeta, että 50 Hz:n komponentit ovat yksi tärkeä osakokonaisuus vian havaitsemisessa. (Loos: 70-71.)

EOR-D:n qu_2 -algoritmiin perustuva transienttisuoja mahdollistaa myös korkeampiresistanssisien vikojen havaitsemisen reletekniikan suorituskyvyn kehittymisen myötä. Nykyaikainen prosessointiteho ja tallennuskapasiteetti mahdollistavat, että vikatilanteessa suojausfunktio voi käsitellä ja linearisoida tallennettua dataa vikahetken lisäksi myös ajalta hieman ennen vikaa. Linearisointi käytännössä karsii terveen tilan nollavirrat ja -jännitteet, jolloin tuloksiin vaikuttaa vain viasta syntyneet arvot. Toteutettu adaptiivinen lienearisointi poistaa myös rengasverkoissa mahdollisesti muodostuvat impedanssieroista johtuvat kuormavirtojen epätasaiset jakautumiset, jolloin suojausta voidaan käyttää myös rengasverkoissa.

Perinteiset suunnatut maasulkusuojat toimivat jatkuvan tilan vioissa tehokkaasti, kunhan vikaimpedanssi ei kasva liian suureksi. Vikaimpedanssin kasvaessa virta pienenee ratkaisevasti, jolloin vian havainnointi vaikeutuu. Virran ja jännitteen kulmaeroon perustuvassa suojauksessa pitää myös muistaa, että kulma muuttuu ratkaisevasti, kun verkko kompensoidaan, minkä seurauksena asetelut pitää määrittää erilaisiksi kompensoituun ja kompensoimattomaan verkkoon. Siksi releistä onkin erikseen määriteltävissä kompensoidun ja kompensoimattoman verkon asetelut ja releelle tuodaan erikseen tieto, milloin kompensointi on kytketty verkkoon. Releen havainnointikykyä kompensoidussa verkossa voidaan parantaa edelleen, kun verkkoon kytketään resistiivistä virtaa lisäävä kelan rinnakkaisvastus.

Admittanssisuojaus on hyvä vaihtoehto edellä kuvatulle suunnatulle maasulkusuojalle. Admittanssisuojauksen etu on tarkkailtava suure eli admittanssi, mikä on virran ja jännitteen suhde. Suhde on riippumaton, vaikka tulos laskettaisiin kumulatiivisesti summatuista useammista tuloksista, sillä virta ja jännite muuttuvat vikaresistanssin muuttuessa samassa suhteessa. Kun admittanssin laskenta toteutetaan virran ja jännitteen muutokseen perustuvana, voidaan vikaresistanssin vaikutusta tulokseen karsia, mikä omalta osaltaan parantaa suojauksen selektiivisyyttä. ABB:n toteuttama myös harmoniset taajuudet huomioon ottava suojaus parantaa havainnointikykyä entisestään kompensoitujen verkkojen tilanteessa, missä perustaaajuinen komponentti on hyvin pieni. Monista hyvistä puolistaan huolimatta admittanssisuojauskin vaatii tarkkaavaisuutta suojausparametrejä määritettäessä. Liian pieni kynnyksjännitteen arvo

voi aiheuttaa turhia vikatilanteita. Tästä saimme hiljattain omakohtaista kokemusta virhelaukaisujen muodossa tehdessämme maasulkukokeita eräällä asemalla. Huomioitavaa on, että muiden suojien tapaan virran- ja jännitteen mittauksessa mahdollisesti aiheutuvat virheet voivat ratkaisevasti heikentää suojauksen varmatoimisuutta, mikä tulee suojausparametreissa huomioida.

Harmoninen suojaus on suojausratkaisu, mitä voidaan hyödyntää matalaresistanssisissa maasulkuvikatilanteissa, kun harmonisia vikavirtoja on havaittavissa. Harmoninen suojaus ei yksinään toimi suojausratkaisuna, mutta sitä voidaan käyttää niin sanottuna lisäsuojana varmistettaessa vian suuntaa. Harmoniset vikavirrat käyttäytyvät verkossa samantapaisesti kuin perustaajuiset vikavirrat maasta erotetussa verkossa riippumatta, onko verkko maasta erotettu vai kompensoitu. Harmoniselle suojaukselle riittää siis yhdet asetellut. Suunnatun maasulkusuojauksen tapaan, mikäli suojaus halutaan toimivan myös kahden johtolähdön ratkaisuisissa, tulee vian suunnan määrittäminen toteuttaa virran ja jännitteen kulman perusteella.

8 EOR-D keskitetty maasulkusuojarahat

Kuten edellä käydystä materiaalista voidaan todeta, maasulkuvikat ovat hyvin moninaisia ja riippuvat monista eri tekijöistä. Yksittäinen suojausratkaisu ei ole kaiken kattava suojaus maasulkutilanteisiin, mistä syystä releissä on tarjolla useita suojausfunktioita, mitä käytetään rinnakkain erilaisten vikojen havainnointiin.

Perinteisesti vikasuojauksia toteutetaan vain kennoreleellä suojattavan lähdön parametrejä tarkkailemalla, jolloin suojaus ei tiedä taustaverkossa olevien lähtöjen vikavirroista mitään. Keskitetyssä maasulkusuojauksessa sama rele saa virta ja jännitemittaustiedot useilta eri lähdöiltä, jolloin se voi hyödyntää myös taustaverkossa esiintyviä suuria vian suunnan määrittämisessä.

A.Eberle:n EOR-D keskitetty maasulkusuojarahat yhdistää johtolähdöiltä saatavaa dataa, jolloin myös taustaverkon suuria vikojen paikantamisessa voidaan hyödyntää. Yksittäinen EOR-D-rele mahdollistaa jopa neljän erillisen johtolähdön samanaikaisen tarkkailun. Releitä voidaan ketjuttaa samaan 4 releen ryhmäksi, jolloin kaikkiaan 16 johtolähtöä voidaan yhdistää yksittäiseksi valvontakokonaisuudeksi. Tällöin yksi rele

toimii ryhmässä master-releenä muiden operoidessa slave-roolissa. Tarvittaessa EOR-D-releitä voidaan koostaa vieläkin laajemmiksi kokonaisuuksiksi yhteistä kommunikointiprotokollaa hyödyntäen.

Kuten monet suoja-releet, myös EOR-D-rele pitää sisällään useita suojausfunktioita. Kun suojausfunktiot vielä hyödyntävät useilta johtolähdöiltä saatavaa mittausdataa, kattava suojausratkaisu saavutetaan. Releessä yhdistyvät seuraavat suojausfunktiot:

- transientti- ja katkeilevien vikojen suojaus qu_2 ja qui - algoritmeilla
- wattimetrinen $\cos(\varphi)$ menetelmään perustuva suoja
- harmoninen suoja
- $\sin(\varphi)$ -menetelmä
- pulssimenetelmä.

Suojausfunktiot esiteltiin edellä pulssimenetelmää lukuunottamatta, sillä tämä menetelmä vaatii kompensointijärjestelmän rinnalle kytkettävää erillistä pulssituslaitteistoa, mistä syystä sitä käytetään verrattain vähän. Tässä se käydään pikaisesti läpi.

Pulssimenetelmää voidaan hyödyntää kompensoidussa verkossa, kun kompensointikelan rinnalle, yleensä tehoapukäämiin, kytketään erillinen kellotettava kapasitanssi, mitä kytketään ja irrotetaan verkosta tietyllä pulssisuhteella. Kun ylikompensoituun verkkoon kytketään kapasitanssi, kytkennän seurauksena verkon kompensointi lähestyy resonanssitilaa, jolloin viallisen vaiheen vikavirta pienenee ja tarveiden vaiheiden vikavirrat kasvavat. Virtojen muuttumisesta voidaan terveet ja viallinen lähtö erottaa toisistaan. Pulssimentelmä on varmatoiminen vaihtoehto maasulkuvikojen paikantamiseen jakorajamuutoksien avulla, kun verkkoa ajetaan maasulussa ja vika irrotetaan verkosta pienellä alueella vasta sen sijainnin tarkan määrittämisen jälkeen.

8.1 EOR-D-releen vikaloki

Tarkastelemalla EOR-D-releestä saatavaa vikalogitiedostoa, voidaan havaita EOR-D:n suojausfunktioiden havahtumat eri vikatilanteissa. Vikalogi tallentaa havahtumistiedot ja ajat niiltä suojausfunktioilta, mitkä on otettu käyttöön ja mitkä viasta havahtuvat. Kustakin käyttöön otetusta suojausfunktioista logitiedostoon tallentuvat tiedot voi tarkemmin määritellä suojausfunktion parametriasetuksissa.

Tässä työssä EOR-D:n toimintaa tarkastellaan asiakkaalle toimitettujen ja jakeluasemille asennettujen EOR-D-releiden vikalogien perusteella. Vikalokit on tallenteita syksyllä sähköasemilla tehdyistä maasulkukokeista, missä maasulut toteutettiin Multirel Oy:n rakentamalla maasulkukärryllä. Tarkasteltavat releet oli asennettu muutamalle maaseutujakeluasemalle hoitamaan katkeilevien vikojen vikasuojaus. Jäykät viat hoidetaan asemilla edelleen johtolähtökohtaisilla suojarelleillä, mutta näissäkin EOR-D on asetettu hälyttäväksi.

Maasulkukärryssä vian kytkentä toteutetaan kärryyn asennetulla erillisellä katkaisija-erotin-kojeistolla, jolloin vian kesto aika voidaan määritellä halutun pituiseksi. Käytännössä viat voidaan ajaa vaikka käytössä olevassa verkossa, jolloin aseman releiden havahtumia tarkastellaan, mutta vika irrotetaan verkosta ennen laukaisuun asti pääsemistä. Tehdyissä maasulkukokeissa viat kuitenkin ajettiin laukaisuun asti, jolloin johtolähdön, johon vika kytkettiin, syötettävät kuormat siirrettiin väliaikaisesti toisen aseman kuormiksi.

8.2 EOR-D-releen asettelut

Ensimmäiseksi releelle tulee määrittää peruskonfiguraatiot, kuten yhteyasetukset ja sähköasemakonfiguraatio, eli virta- ja jännitemuuntajien muuntosuhteet, mitä johtolähtöjä on suojattavana yms. Sähköasemakonfiguraation perusteella rele voi tulkitua muun muassa, millä kiskolla mikäkin johtolähtö kussakin tilanteessa on, mikäli releelle on tuotu johtolähtöjen katkaisijatiedot. Tieto auttaa relettä jakamaan johtolähdöt myös omiksi ryhmiikseen jo ennen vikatilannetta, mikä osaltaan nopeuttaa vian paikantamista. Kuva 30 esittää esimerkkinä asemalla 1 käytössä olevan relekonfiguraation.

	BB 1	BB 2	BB 3	Cubicle	CB	CB	ID	BI	ID	Current	kni	Voltage	knu	Remarks
1	U12								E1:			U12	230/230	Usync
2	Uo								E1:			Uen1	11836/100	Une
3														
4	x			J03		Q0		ON	E1:	Io1	70/1			J03
5														
6	x			J04		Q0		ON	E1:	Io2	70/1			J04
7														
8	x			J05		Q0		ON	E1:	Io3	70/1			J05
9														

Kuva 30. EOR-D-releen asemakonfiguraatio asemasta, jolla kolme johtolähtöä

Asemakonfiguraation jälkeen releelle määritetään nollajänniteraja, eli kynnysjännite, minkä tulee ylittyä, jotta yksikään suojausfunktio voi käynnistyä. Nyt tarkasteltavissa maasulkukokeissa molempien asemien EOR-D-releelle oli suojien toiminnan nollajänniterajaksi määritetty 10 % vaihejännitteestä, eli mahdollisesta suoran maasulun jännitteestä. Seuraavaksi kullekin käyttöön otettavalle suojalle määritellään omat parametrinsa. Tarkastellaan maasulkukokeissa käytössä olleiden suojien, transientti-, qui- eli katkeilevan, harmonisen sekä wattimetrisen suojan konfigurointiparametrit läpi niiltä osin, kun ne vaikuttavat suojan toimintaan.

Transienttisuojan parametristö nähdään kuvasta 31:

Eor-D

- Modules
- Station Config
- System
- Transients
- qui
- Harmonics
- Wattmetric
- Pulse
- Relays/LEDs

Transients active		<input checked="" type="checkbox"/>
Earth fault threshold	<input type="text" value="10"/>	% Vnom
Transient-threshold	<input type="text" value="10,0"/>	% Vnom
Ice minimum current	<input type="text" value="2,5"/>	A prim.
Threshold high impedance	<input type="text" value="20,0"/>	% of transient-threshold
Minimum rotation	<input type="text" value="5,0"/>	grad/rotation
Stationary earth fault after	<input type="text" value="60"/>	ms
Signalling		
Signalling	<input type="text" value="all transients"/>	
Signalling delay	<input type="text" value="0,6"/>	s
Signalling duration	<input type="text" value="0:05"/>	(h:)min:s
Reset input	<input type="text" value="--"/>	<input type="text" value="none"/> <input type="checkbox"/> Inv
Duration sign.direct	<input type="text" value="200"/>	ms
Logfile entry		
Logfile entry	<input type="text" value="coming"/>	
Extra log on evaluation		
Extra log on evaluation	<input type="text" value="if signalling"/>	
Pause between records	<input type="text" value="10"/>	s
Blocktime after 1. message	<input type="text" value="0"/>	s
First period of recording		
Uo min	<input type="text" value="15"/>	% of transient-threshold
dUo deviation	<input type="text" value="15"/>	% of transient-threshold
Frequency check	<input type="text" value="0"/>	wps

Kuva 31. EOR-D-releen transienttisuojan parametristö

Transienttisuojalle määritetään yleisen Uo-ajan lisäksi oma Uo-rajana (Transient threshold). Seuraavaksi määritetään kynnysvirta (Ice minimum current). Kolmantena *Threshold high impedance* määrittää rajan, mitä verrataan linearisoituun

nollajännitearvoon linearisoinnin jälkeen. Mikäli arvo ylittyy, tulkitaan vika korkeaimpedanssiseksi. *Minimum rotation* on käytännössä rotaation ja kulmakertoimen suhdeluku. Jos rotaatio on suhdeluvun verran suurempaa kuin saatu qu-käyrän kulmakerroin, määritetään vian suunta rotaation perusteella. Muussa tapauksessa käytetään kulmakerrointa. *Stationary earth fault after* -arvolla määritetään aika, minkä jälkeen vika tulkitaan jatkuvaksi viaksi. *Signalling*-arvo määrittää, mitkä transientit aiheuttavat hälytys- tai laukaisuviestin. Samassa lohossa viestille voidaan määrittää myös viive sekä viestin kestoaika. *Logfile entry* -parametri vaikuttaa ratkaisevasti, missä kohtaa vikatiedot tallennetaan lokitietokantaan. Suojan toiminnan kannalta tärkeitä parametrejä ovat vielä *First period of recording*-lohkossa olevat *Uo min* sekä *dUo*. Jos *Uo* pysyy alle *Uo min*-rajan ensimmäisen mittaus syklin läpi, tehdään linearisointi välittömästi. Muussa tapauksessa linearisointi tehdään vasta, kun *Uo* pysyy *dUo*-vaihtelurajan sisällä.

Qui-suojalle määritetään seuraavan kuvan mukaiset parametrit:

qui active	<input checked="" type="checkbox"/>
dUo threshold	<input type="text" value="15,0"/> % Vnom
Ice minimum current	<input type="text" value="30,0"/> A prim.
Supervision time	<input type="text" value="500"/> ms
Signalling duration	<input type="text" value="0:15"/> (h):min:s
Reset input	-- <input type="text"/> none <input type="checkbox"/> Inv
Logfile entry	<input type="text" value="coming"/>
Extra log on evaluation	<input type="text" value="Yes"/>
Cyclic log	<input type="checkbox"/>
Every	<input type="text" value="300"/> s

Kuva 32. EOR-D-releen Qui-suojausfunktion parametrit

Qui-suojassa parametrilla dU_0 määritetään vaihtelurajat, minkä ylittyessä perättäiset nolllajännitteen nousut luetaan katkeilevaksi maasulkuviaksi. Muut määriteltävät parametrit ovat miniminollavirta tilanteessa, sekä aikaikkuna, *Supervision time*, minkä sisällä jännitteen vaihtelun tulee tapahtua.

Harmonisen suojan parametrit ovat seuraavat:

Kuva 33. EOR-D-releen harmonisen suojan parametrit

Tässä suojassa *Ice minimum current* -arvo määrittää, minkä rajan ylittävät virrat aiheuttavat suojan hälytyksen. Virtaraja ei ole suoraan nolllavirtaa, vaan siihen vaikuttaa, minkä taajuisia vikavirtoja suojalla tarkkaillaan. Tarkkailtava taajuus voi olla joko perustaajuus, kolmas tai viides harmoninen tai vaihtoehtoisesti itse määritelty taajuus, mikäli esimerkiksi erillistä yliaallon syöttöä verkkoon (ripple control system) käytetään. Virran minimiraja tässä suojassa määritetään seuraavan kaavan perusteella:

$$I_f = I_{50} * \frac{\omega_f}{\omega_{50}} * \frac{U_f}{U_{50}} * \text{earth fault threshold (in \%)} \quad (24)$$

, missä

- Alaindeksi $f =$ arvo, joka vastaa tarkkailtua taajuutta tai on laskettu käyttäen tätä taajuutta
- $\omega =$ kulmanopeus laskettuna alaindeksissä määrätyllä taajuudella.

Näiden parametrien lisäksi harmoniseen suojausfunktioon voi määrittellä esim. kulmarajoja mitatulle virralle sekä käytetäänkö vian suunnan tulkinnassa virran ja jännitteen kulmaa vai ei.

Viimeisenä wattimetrisen suojan parametrit:

Wattmetric active

Earth fault threshold % Unom

Copy 1st-->all

Minimum current primary, minimum angle	E1:1	0,5 A	2 °
	E1:2	0,5 A	2 °
	E1:3	0,5 A	2 °
	E1:4	0,5 A	2 °

Min di (loops) %

Measuring cycles

Retain 1st signal

Reset input Inv

All "Forward"

Signalling delay s

Signalling duration (h):min:s

Wattm. outweighs Harm. Inv

Logfile entry

Cyclic log

Every s

Wattmetric Increase

Gate time s

Gate input Inv

Message duration (h):min:s

Reset input Inv

Kuva 34. EOR-D-releen wattimetrisen suojan parametrit

Tässä suojassa määritetään jokaiselle johtolähdölle erikseen miniminollavirta sekä kulma, joiden tulee ylittyä jotta hälytysehdot voivat täyttyä. *Wattmetric Increase* -lohkossa voidaan määrittää signaalilähde releelle, millä tiedotetaan lisävastuksen

kytkemisestä verkkoon resistiivisen virran lisäämiseksi. Tämän lisäksi *Gate time* määrittää, kuinka pitkä suojan mittaussykli lisätyllä resitiivisellä virralla voi olla.

8.3 SA1:n maasulkukoetulokset

Tarkastellaan ensiksi SA1:tä saatuja maasulkukoetallenteita ja EOR-D-releen lokitietoja. Yksivaiheinen maasulkukoe tehtiin seuraavissa kytkentätilanteissa:

1. maasulku 10 k Ω :n vikavastuksella sammutetussa verkossa, lisävastus verkossa
2. maasulku 5 k Ω :n vikavastuksella sammutetussa verkossa, lisävastus verkossa
3. suora maasulku sammutetussa verkossa, lisävastus verkossa
4. suora maasulku sammutetussa verkossa, lisävastus irti verkosta
5. maasulku 2,5 k Ω :n vikavastuksella maasta erotetussa verkossa
6. maasulku 2,5 k Ω :n vikavastuksella sammutetussa verkossa, lisävastus irti verkosta
7. katkeileva maasulkuvika.

Ennen kokeiden aloitusta voitiin kelan viritys tarkastaa kelan säätäjän lokitiedoista. Säätäjä antoi seuraavat arvot viritykselle:

```
2020-10-08 10:55:45,849 Resonance curve Ires= 26,9A Iw= 9,9A Ures= 0,57V
2020-10-08 10:55:45,940 BOF 14: Tuned come Ipos= 30,4A
2020-10-08 10:55:45,940 BOF 53: Search go Une= 0,54V
```

Kuva 35. SA1:n kompensointilaitteiston säätäjän lokitiedot viritystasosta ennen maasulkukokeita.

Säätäjän tiedoista näemme, että kelan resonanssipiste on 26,7 A. Laskennallinen jäännösvirta on 9,9 A. Jos jäännösvirta ennen kuormitusvastuksen kytkentää on tiedossa, voidaan arvosta päätellä, onko lisävastus verkossa. Tässä tapauksessa se oli. Kun kela on aseteltu arvoon 30,4 A, on tilanne verkossa 3,5 A ylikompensoitu. Nollajännite on tässä viritystilassa 0,54 V.

Aseman suojausasettelussa EOR-D-rele on laukaisuvastuussa katkeilevien maasulkujen vioista, mikä antaa vain hälytyksen jäykistä vioista. Johtolähtöjen

suojareleet vastaavat suunnatusta jäykkien vikojen suojauksesta antaen vastaavasti katkeilevista vioista pelkän hälytyksen. Johtolähtöjen suojareleiden asettelut maasulkukokeissa olivat seuraavat:

Kompensoitu verkko:

- Uodir > 20 %
- Iodir > 1,47 A
- Todir > 0,7 s

Maasta erotettu verkko:

- Uodir > 10 %
- Iodir > 1,12 A
- Todir > 0,32 s

EOR-D-releen asettelut nähtiin edellä luvussa: 8.2, kun käytössä olevat suojausasettelut käytiin läpi. Kertaukseksi listataan vielä tärkeimmät:

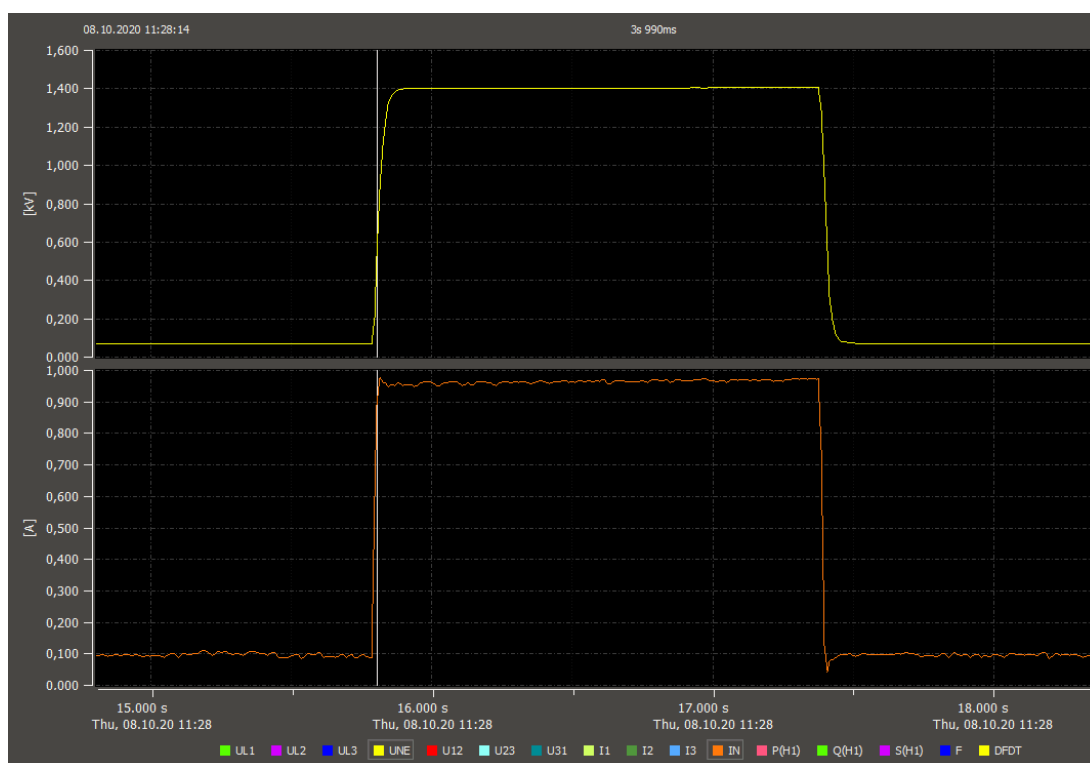
- Uo threshold > 10 % (Kaikille suojille)
- Transient
 - Ice min > 2,5 A
 - Minimum rotation 5 (grad/rotation)
 - Stationary earth fault after 60 ms
 - First period of recording: Uo min > 15 % ja dUo 15 %
 - Logfile entry: coming, Extra logfile: if signaling
- Qui
 - dUo 15 %
 - Ice min > 30 A
 - Supervision time 500 ms
 - Logfile entry: coming
- Harmonics
 - Ice min > 2 A
 - Min angle 2°
 - Logfile entry: coming + going
- Wattmetric
 - Ice min > 0,5 A (kaikki lähdöt)

- Min angle 2° (kaikki lähdöt)
- Logfile entry: coming + going.

EOR-D:n suojissa on huomioitavaa, että Wattmetric-suoja on tarkoitettu vain sammutetun verkon suojausfunktioksi sen tarkkailla vain resistiivistä jäännösvirtaa. Muut suojausfunktiot toimivat sekä maasta erotetussa että sammutetussa verkossa.

8.3.1 SA1, MSK 1: Komp., 10 kΩ:n vika

Ensimmäisessä kokeessa tehtiin maasulku 10 kΩ vikaresistanssin läpi kompensoidussa verkossa. Rinnalle kytketty kuormitusvastus oli 100 kW. Lähtökohtaisesti voidaan odottaa, että tällainen vikaresistanssi aiheuttaa vain pienen lo-virran sekä suhteellisen matalan Uo-jännitteen. Kuvasta 36 näemme viasta aiheutuneet RMS-arvot Uo ja Io, jotka mitattiin vialliselta johtolähdöltä A.Eberle:n PQ-Mobile tehonalysointilaitteella:



Kuva 36. SA1, msk 1: Kompensoitu verkko, 10 kΩ vika, kuormitusvastus kytketty. Uo ja Io RMS-arvot.

Uo nousee tilanteessa 1,4 kV:iin ja Io arvoon 0,96 A. Vikavirta on hyvin pieni, vaikka kuormitusvastus on kytketty, sillä vikaresistanssi on hyvin suuri. Uo jää kokeessa alle

20 %:n, joten johtolähtöjen suunnattujen releiden suojat eivät reagoi. EOR-D:ssä asetus on kuitenkin 10 %, joten se havahtuu. EOR-D tallensi viasta seuraavat lokitiedot:

```

2020-10-08 11.28.17,326 qu2_Wischer           El:      1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000005
2020-10-08 11.28.17,326 Ice                  El:      -20,33    0,67    14,35    0,00
2020-10-08 11.28.17,326 Rotation          El:      0,29    0,00    0,07    0,00
2020-10-08 11.28.17,387 qu2_Wischer DE       El:      1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000006
2020-10-08 11.28.18,142 Earth fault      come     Grp:1 BB:1 Uampl=2034,2V
2020-10-08 11.28.18,361 Transient          come Ln  El:1 Fault record: 00000006
2020-10-08 11.28.18,361 Transient          come BB  El:3 Fault record: 00000006
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr              Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr              come Ln  El:1 Iampl=1,3431A -168,0° Iw=-1,3138A
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr              El:2 Iampl=0,091987A -75,0° Iw=0,023765A
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr              El:3 Iampl=3,6223A -89,7° Iw=0,021976A
2020-10-08 11.28.19,457 Earth fault      go      Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics          Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics          El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics          El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics          El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.28.21,150 Wattmetr              Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.28.21,150 Wattmetr              go Ln  El:1

```

Kuva 37. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 1: Kompensoitu verkko, 10 kΩ:n vika, kuormitusvastus kytketty.

Kuvasta nähdään ensimmäisenä transienttisuojan tallenne:

```

2020-10-08 11.28.17,326 qu2_Wischer           El:      1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000005
2020-10-08 11.28.17,326 Ice                  El:      -20,33    0,67    14,35    0,00
2020-10-08 11.28.17,326 Rotation          El:      0,29    0,00    0,07    0,00
2020-10-08 11.28.17,387 qu2_Wischer DE       El:      1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000006
2020-10-08 11.28.18,142 Earth fault      come     Grp:1 BB:1 Uampl=2034,2V
2020-10-08 11.28.18,361 Transient          come Ln  El:1 Fault record: 00000006
2020-10-08 11.28.18,361 Transient          come BB  El:3 Fault record: 00000006

```

Kuva 38. Transienttisuojan tallenne, SA1, msk 1: Kompensoitu verkko, 10 kΩ:n vika, kuormitusvastus kytketty.

Vika on määritelty oikein lähdölle 1. Kuvassa: "1:L", L = Line ja lähdön varauskuvaajan kulmakerroin on negatiivinen. Koska vika on suuriresistanssinen, ei alkutransientteja ja niistä aiheutuvaa rotaatiota juuri ole muodostunut ja vian tulkinta on tehty kulmakertoimen perusteella. Suoja on myös määrittänyt lähdön 3 taustaverkoksi. Lähtö 2 on niin lyhyt johtolähtö, että varautumista on muodostunut hyvin vähän, Ice vain 0,69 A, mistä syystä tätä lähtöä ei ole määritelty taustaverkoksi "B", B = Busbar. Mittauslähtö 4, ei ole kytketty lainkaan, joten näemme vain 0,00 arvot. Tämän jälkeen näemme välissä tallentuneen tiedon, että Uampl on 2034,2 V, eli U_o-huippuarvo on vian alkuhetkellä ollut noin 2 kV ja vika on kiskolla 1. Tämä tallentuu, kun U_o ylittää asetteluvarvon. Arvo vastaa likimain PQ-Mobilen saamaa mittaustulosta 2001,5 V. Lopuksi on tulostunut vielä lisämerkinnät vioista: viallinen lähtö E1:1, eli EOR-D rele 1, mittauslähtö 1 ja taustaverkon lähtö E1:3. Vikatilanteen näkyminen suunnan määrittäminenkin ovat

tapahtuneet oikein, mikä vikaresistanssin suuruus huomioiden on erinomainen suoritus EOR-D-releeltä, kun yleisesti yli 500 Ω vikaresistanssin omaavien vikojen näkemistä pidetään hyväksyttävänä suorituksena.

Seuraavaksi vikalokiin on tallentunut Wattmetric-suojan tiedot:

```

2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr           Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr       come Ln  E1:1 Iamp1=1,3431A -168,0° Iw=-1,3138A
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr           E1:2 Iamp1=0,091987A -75,0° Iw=0,023765A
2020-10-08 11.28.19,036 Wattmetr           E1:3 Iamp1=3,6223A -89,7° Iw=0,021976A
2020-10-08 11.28.19,457 Earth fault     go       Grp:1 BB:1

```

Kuva 39. Wattmetric-tallenne, SA1, msk 1: Kompensoitu verkko, 10 k Ω :n vika kuormitusvastus kytketty.

Ensin on tieto, että vika on kiskostolla 1. Tämän jälkeen seuraa johtolähtökohtaiset lo-virtatiedot: kokonaisvirta Iamp1 sekä Iw, eli resistiivinen virta. Resistiiivisistä virroista nähdään, että lähdön 1 virta on suurin ja vastakkaisuuntainen muihin lähtöihin nähden, mistä viallinen lähtö voidaan päätellä. Näemme myös, etteivät taustaverkon resistiiviset komponentit ole suuria, jolloin valtaosa resistiivisestä virrasta kulkee kuormitusvastuksen kautta. Wattimetrinen suoja on määritetty tallentamaan tieto myös vian poistumisesta, mikä näkyy lokitiedoissa, kuva 37, vielä harmonisen suojan tietojen jälkeen.

Viimeisenä lokitietona ensimmäisestä maasulkukokeesta on harmonisen suojan tiedot:

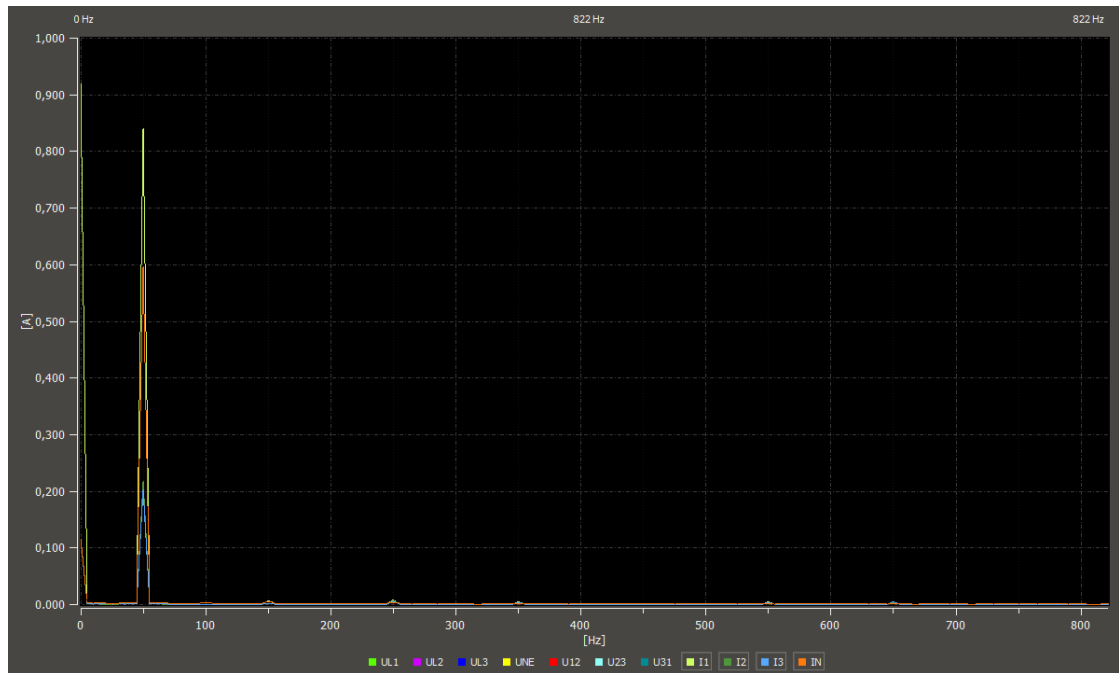
```

2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics           Grp:1 BB:1 Uamp1=0,0V
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics           E1:1 Iamp1= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics           E1:2 Iamp1= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.28.21,150 Harmonics           E1:3 Iamp1= 0,000A 0,0°

```

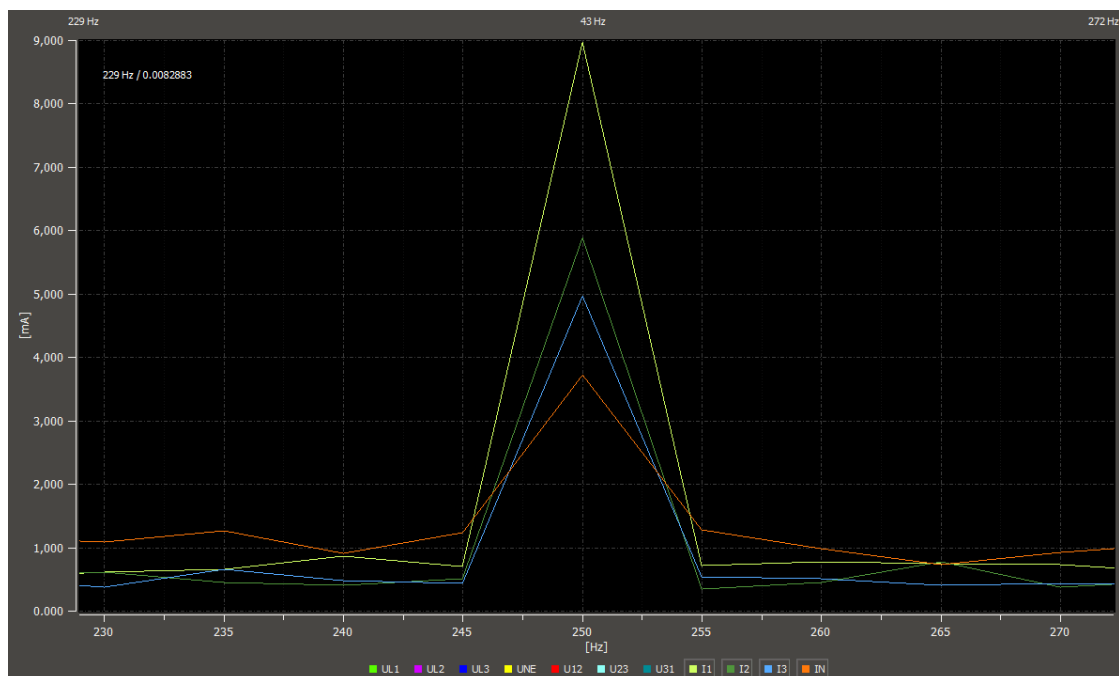
Kuva 40. Harmonisen suojan tallenne, SA1, msk 1: Kompensoitu verkko, 10 k Ω vika, kuormitusvastus kytketty.

Harmonisen suojan vikatalenne ei kerro viasta oikeastaan mitään. Suoja on havahtunut, sillä U_o-asetteluraja on sama kuin muille suojille, eli 10 %. Suoja on aseteltu tarkkailemaan 250 Hz:n komponenttia, mutta vian ollessa korkeaohminen ei harmonisia vikavirtoja juuri muodostu. Kun PQ-mobilien tallenteesta otetaan virroista FFT-muunnos, eritaajuiset komponentit vikavirrasta eritellään. Kuvasta 41 nähdään, ettei harmonisia virtoja juuri ole verkossa.



Kuva 41. SA1, msk 1: FFT-muunnos vikavirrasta.

Lähempi tarkastelu ja zoomaus vain 250 Hz:n vikakomponentin kohdalle osoittaa, että 250 Hz:n vikavirta on muutamia milliampeereja, riippuen mitattavasta vaiheesta ja nollavirta alle 4 mA.



Kuva 42. SA1, msk 1: FFT-muunnos 250 Hz:n vikavirroista.

8.3.2 SA1, MSK 2: Komp., 5kΩ:n vika

Toinen maasulkukoe oli verkon kytkennän osalta vastaava kuin ensimmäinen, mutta 5 kΩ:n vikaresistanssilla. EOR-D-releen vikalokitiedot tilanteesta ovat seuraavat:

```

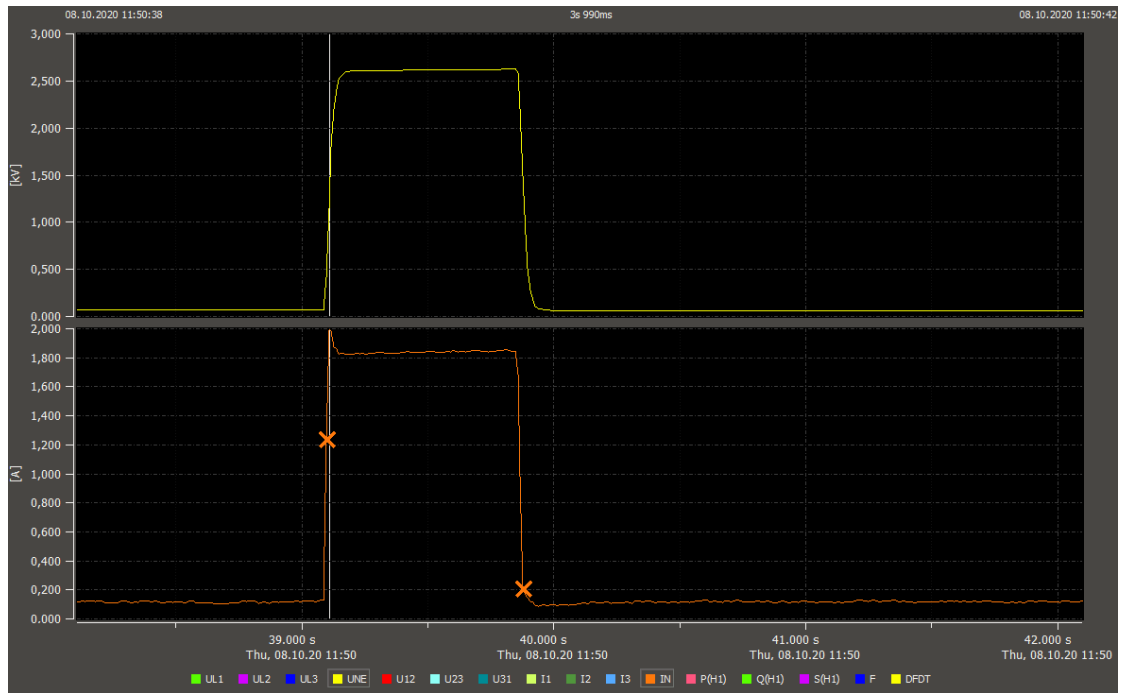
2020-10-08 11.50.39,601 qu2_Wischer          El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000007
2020-10-08 11.50.39,601 Ice                 El: -28,99 0,78 21,89 0,00
2020-10-08 11.50.39,601 Rotation            El: 1,74 0,01 0,03 0,00
2020-10-08 11.50.39,662 qu2_Wischer DE      El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000008
2020-10-08 11.50.40,382 Earth fault         come Grp:1 BB:1 Uampl=3790,3V
2020-10-08 11.50.40,382 Transient           come Ln El:1 Fault record: 00000008
2020-10-08 11.50.40,382 Transient           come BB El:3 Fault record: 00000008
2020-10-08 11.50.41,029 Earth fault         go Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.50.43,081 Harmonics          Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 11.50.43,081 Harmonics          El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.50.43,081 Harmonics          El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.50.43,081 Harmonics          El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 11.50.43,081 Wattmetr          Grp:1 BB:1
2020-10-08 11.50.43,081 Wattmetr          El:1 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 11.50.43,081 Wattmetr          El:2 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 11.50.43,081 Wattmetr          El:3 Iampl=0A 0,0° Iw=0A

```

Kuva 43. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 2: Kompensoitu verkko, 5 kΩ:n vika, kuormitusvastus kytketty.

Tallennetiedot ovat loogiset. Uo on kasvanut, kun vikaresistanssi on pienentynyt. Transienttisuoja on nähnyt vian, mutta kun tarkastellaan vian kestoajaa PQ-Mobilen tallenteesta, kuva 44, näemme, että vika on kestänyt vain noin 780 ms suunnatun suojan laukaistessa vian irti verkosta. Ensimmäisessä kokeessa 10 kΩ:n vika kesti 1600 ms.

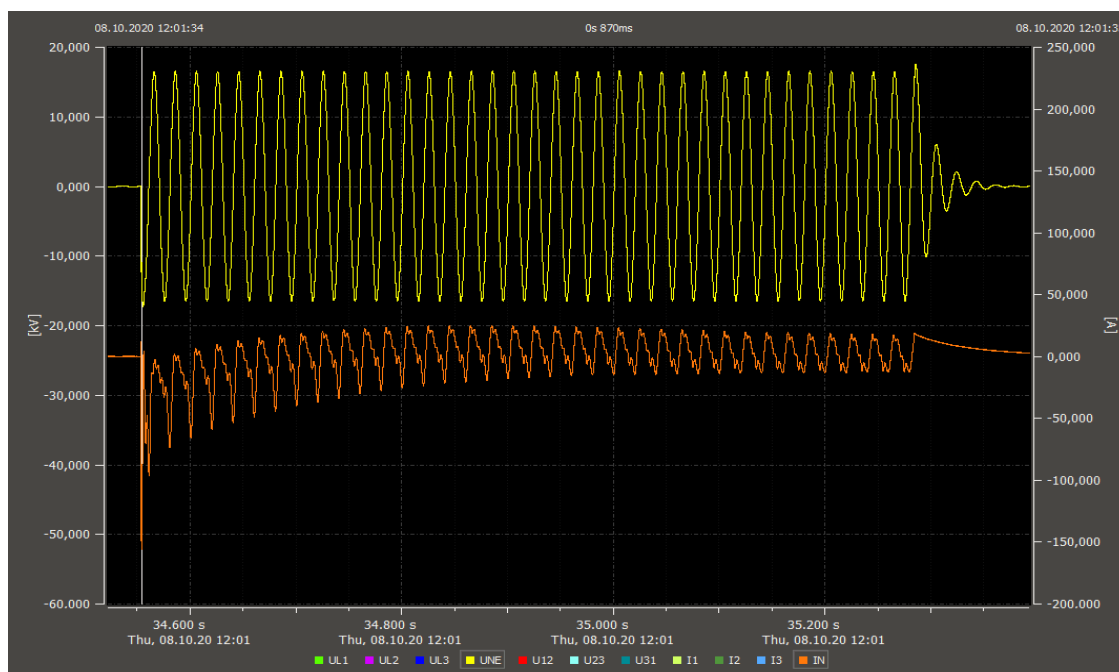
Wattmetric-suojan tuloksessa ei näy virtojen mittaustietoja. Vikavirta on toisessa kokeessa lähes kaksinkertainen ensimmäiseen nähden, kuva 44, mikä on loogista vikaresistanssin pienentyessä puoleen. Wattmetric-suojaan aseteltu viive vian ilmoittamiselle on 600 ms, mikä voi olla syynä, ettei toisen kokeen suuntatiedot ole tallentuneet lokitietoihin ja pelkkä havahtuminen näkyy. Koska vikavirta ja -jännite ylittävät helposti kennoreleeseen asetellut suunnatun suojan arvot 20 % ja 1,47 A, joten suunnattu johtolähtökohtainen suojaus on toiminut kuten pitää.



Kuva 44. SA1, msk 2: Kompensoitu verkko, 5 k Ω :n vika, kuormitusvastus kytketty. Uo ja Io RMS-arvot.

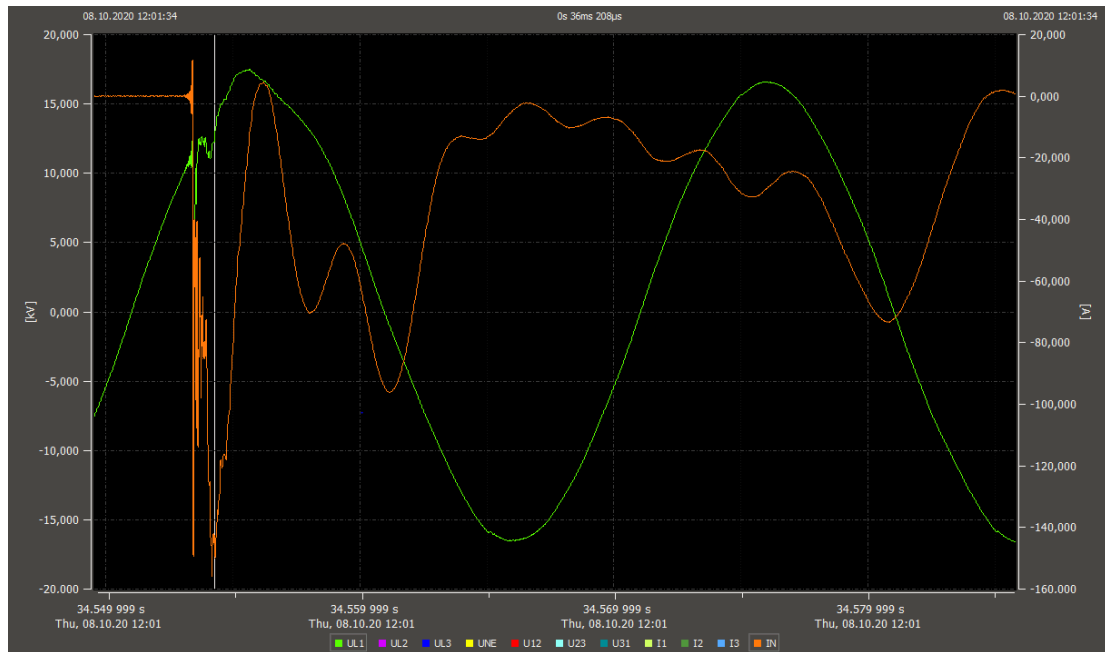
8.3.3 SA1, MSK 3: Komp., suora maasulku

Kolmas vikatilanne piti alun alkaen olla 2,5 k Ω :n vika, mutta kytkentävirheen takia vika muodostuikin suoraksi maasuluksi sammutettussa verkossa, kuormitusvastus kytkettynä. Vahinko osoittautui tulosten kannalta hyvin mielenkiintoiseksi. Suorassa maasulussa resistiivisen komponentin puute mahdollistaa harmonisten vikavirtojen ja säröytymien selkeän muodostumisen, mitkä näkyvät hyvin nollavirran kuvaajasta, kuvassa 45. Säröytyneen vikavirran lisäksi vikavirran alkuosa sisältää selkeän tasavirtakomponentin, mikä vaimenee aikanaan pois.



Kuva 45. SA1, msk 3: Kompensoitu verkko, suora maasulku, kuormitusvastus kytketty. Uo- ja lo-kuvaajat.

Tasavirtakomponentti muodostuu, mikäli vian alku ei tapahdu vaihejännitteen huippuarvon kohdalla. Vian alkuhetki on nähtävissä seuraavassa kuvassa:



Kuva 46. SA1, msk 3: Vian alkuehki. Kuvassa viallisen vaiheen L1 jännite sekä lo-virta.

EOR-D tallenne msk 3 -tilanteesta on seuraava:

```

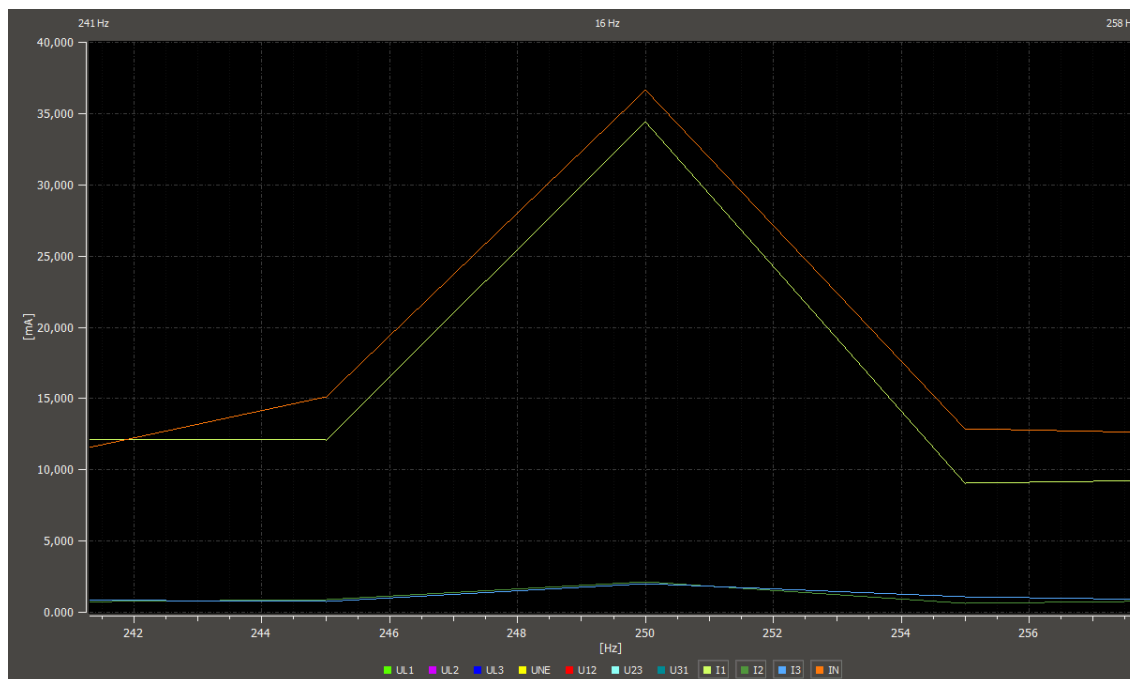
2020-10-08 12.01.35,040 qu2_Wischer           El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000009
2020-10-08 12.01.35,040 Ice                 El: -43,09 0,90 35,37 0,00
2020-10-08 12.01.35,040 Rotation          El: 498,10 0,55 -39,77 0,00
2020-10-08 12.01.35,101 qu2_Wischer DE       El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000010
2020-10-08 12.01.35,609 Earth fault         come      Grp:1 BB:1 Uampl=14091,2V
2020-10-08 12.01.35,833 Transient          come Ln   El:1 Fault record: 00000010
2020-10-08 12.01.35,833 Transient          come BB   El:3 Fault record: 00000010
2020-10-08 12.01.36,482 Earth fault         go        Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.01.38,175 Harmonics          Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 12.01.38,175 Harmonics          El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.01.38,175 Harmonics          El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.01.38,175 Harmonics          El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.01.38,175 Wattmetr          Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.01.38,175 Wattmetr          El:1 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 12.01.38,175 Wattmetr          El:2 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 12.01.38,175 Wattmetr          El:3 Iampl=0A 0,0° Iw=0A

```

Kuva 47. SA1 EOR-D-vikaloki, msk 3: Kompensoitu verkko, suora maasulku, kuormitusvastus kytketty.

Vikatallenteesta nähdään, kuinka U_o on noussut noin vaihejännitteen suuruiseksi. Hetkellinen transienttinen vikavirta on hyvin suuri, transienttisuojan hetkellisarvon ollessa 43 A. Koska vikaresistanssia ei ole, muodostuu paljon harmonista vikavirtaa, mikä nähdään transienttisuojan arvoissa suurena rotaationa viallisella johtolähdöllä. Kuten aiemmissakin tapauksissa vika on kestänyt alle 800 ms kennoreleen suunnatun suojausten toimiessa, joten vain transienttisuoja on tallentanut tarkempia tietoja vikalokiin. Laukaisu on tapahtunut siitäkin huolimatta, että vikavirrassa on esiintynyt

voimakasta säröä. Kun tarkastellaan harmonisia vikavirtoja, kuva 48, voidaan havaita, että 250 Hz:n harmonista vikavirtaa esiintyy huomattavasti aiempia kokeita enemmän, mutta ei riittävästi että tulokset näkyisivät harmonisen suojan tallenteessa. 250 Hz:n FFT-otannasta näemme myös, kuinka suorassa maasulussa harmoniset vikavirrat keskittyvät purkautuvalle vaiheelle 1 muiden vaiheiden harmonisten virtojen ollessa verrattain vähäisiä. Ilmiö tukee EOR-D-releen transienttisuojan rotaation määrää viallisella vaiheella.



Kuva 48. SA1, msk 3: Suora maasulku, FFT-muunnos 250 Hz:n vikavirroista.

8.3.4 SA1, MSK 4: Suora maasulku, kuormitusvastus viiveellä

Neljännessä maasulkukokeessa kuormitusvastuksen ohjausta muutettiin niin, että vastus kytkeytyy verkkoon vasta vian aikana. Muuten tässäkin kokeessa oli kyseessä suora maasulku kompensoidussa verkossa. EOR-D-releen tallenne tilanteesta on seuraava:

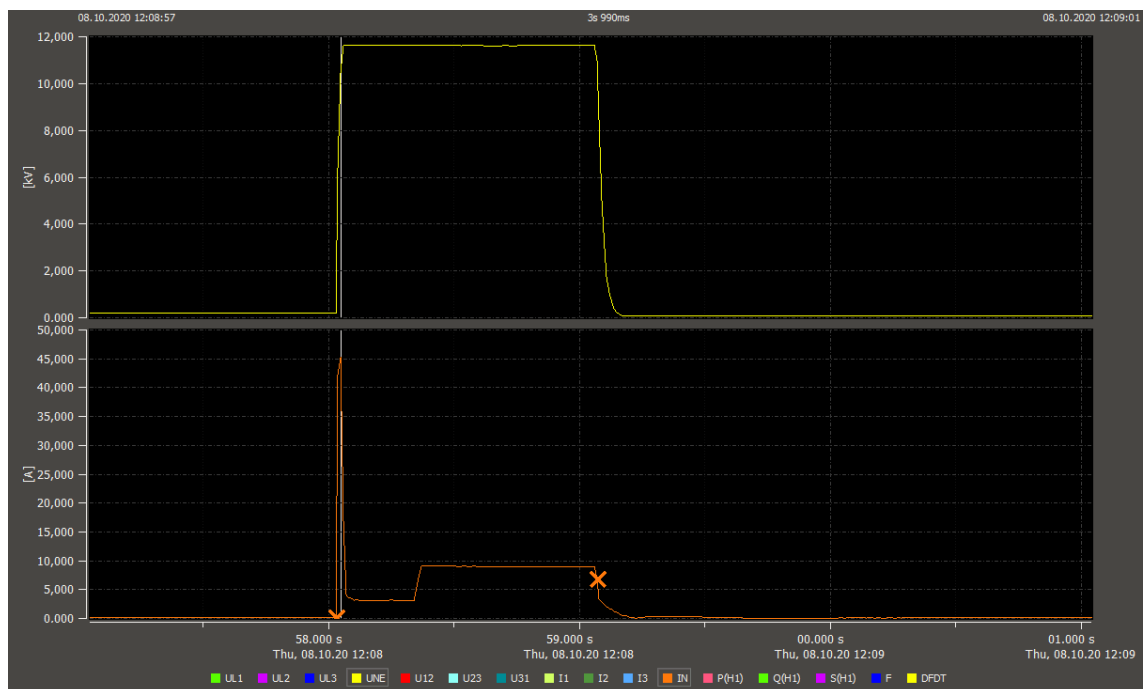
```

2020-10-08 12.08.58,529 qu2_Wischer           El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000048
2020-10-08 12.08.58,529 Ice                 El: -30,87 0,90 28,57 0,00
2020-10-08 12.08.58,529 Rotation          El: 188,15 0,90 -43,43 0,00
2020-10-08 12.08.58,589 qu2_Wischer DE      El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000049
2020-10-08 12.09.00,202 Earth fault         come Grp:1 BB:1 Uampl=13891,1V
2020-10-08 12.09.00,425 Transient          come Ln El:1 Fault record: 00000049
2020-10-08 12.09.00,425 Transient          come BB El:3 Fault record: 00000049
2020-10-08 12.09.01,117 Wattmetr           Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.09.01,117 Wattmetr         come Ln El:1 Iampl=3,9582A -158,8° Iw=-3,6901A
2020-10-08 12.09.01,117 Wattmetr           El:2 Iampl=0,52259A -94,0° Iw=-0,036762A
2020-10-08 12.09.01,117 Wattmetr           El:3 Iampl=13,605A -92,4° Iw=-0,57729A
2020-10-08 12.09.01,323 Earth fault         go Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.09.03,182 Harmonics          Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 12.09.03,182 Harmonics          El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.09.03,182 Harmonics          El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.09.03,182 Harmonics          El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.09.03,182 Wattmetr           Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.09.03,182 Wattmetr         go Ln El:1

```

Kuva 49. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 4: Kompensoitu verkko, suora maasulku, kuormitusvastus kytkeytyy viiveellä.

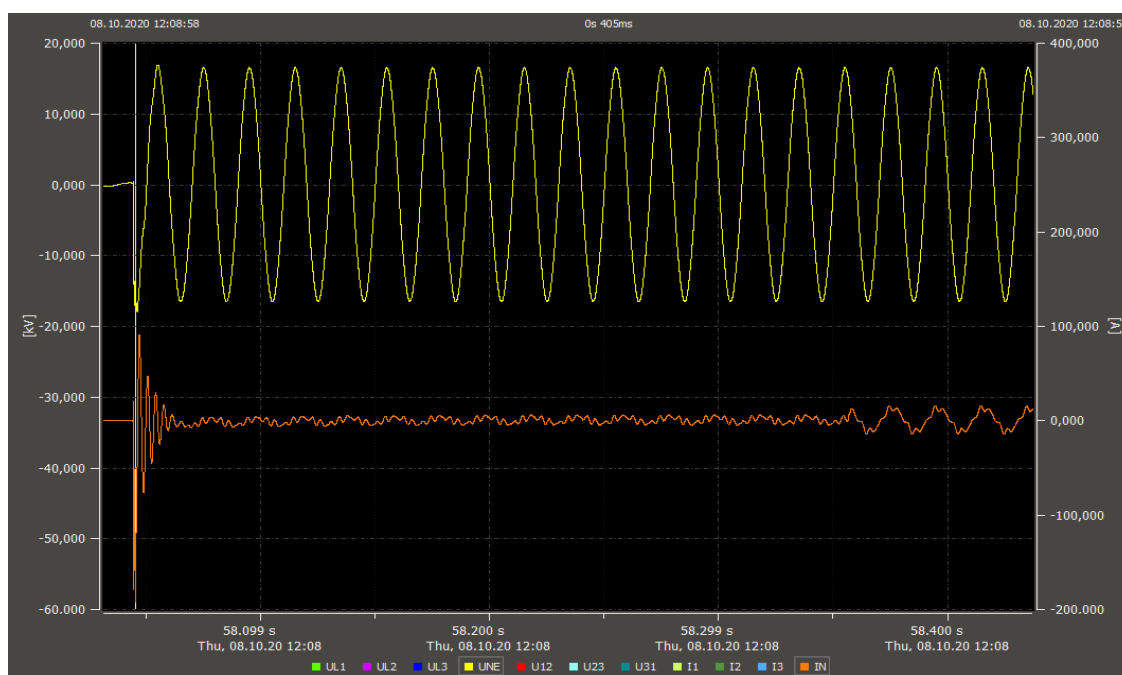
EOR-D-releen tallenteesta voidaan todeta, että vian kestoajan ollessa pidempi myös Wattmetric-suojia ehti mukaan ja tallensi vikavirtatiedot. PQ-Mobilen RMS-tallenteesta, Kuvasta 50 nähdään, kuinka vikavirta kasvaa kuormitusvastuksen kytkeytyessä verkkoon.



Kuva 50. SA1, msk 4: Kompensoitu verkko, suora maasulku, kuormitusvastus kytkeytyy vian aikana. Uo ja Io RMS-arvot.

Kuva 50 osoittaa, kuinka msk 4 -vikatilanne on verkossa kauemmin, ennen kuin suunnattu suojaus puuttuu peliin ja laukaisee vian verkosta. Kennoreleen suunnattu

suojaus laukaisee vasta, kun kuormitusvastus kytkeytyy verkkoon ja vikavirta kasvaa suuremmaksi. Kuvasta nähdään, että vikavirran RMS-arvo ennen kuormitusvastuksen kytkeytymistä on noin 3 A, mikä sinällään pitäisi riittää suunnatun suojan laukeamiseen. Kun huomioidaan, että kompensointi oli toteutettu 3 A ylikompensoituna, voidaan todeta vikavirran ennen kuormitusvastuksen kytkemistä olevan pääosin kapasitiivista, mistä syystä resistiivistä vikavirtaa tarkkaileva suunnattu suoja ei ole lauennut ennen kuormitusvastuksen kytkentää. Kuva 51 osoittaa myös, kuinka harmoninen ja transienttinen suoran maasulkun vikatilanteen nollavirran alkuosa on.



Kuva 51. SA1, msk 4: Uo- ja Io-kuvaajat vian alkuosassa ja hetkellä, kun kuormitusvastus kytkeytyy.

8.3.5 SA1, MSK 5: Maasta erotettu, 2,5 kΩ:n vika

Viidennessä maasulkukokeessa testattiin suojauksen toimintaa maasta erotetussa verkossa vikaresistanssin ollessa 2,5 kΩ. EOR-D tallensi tilanteesta vikalokiin seuraavat tiedot:

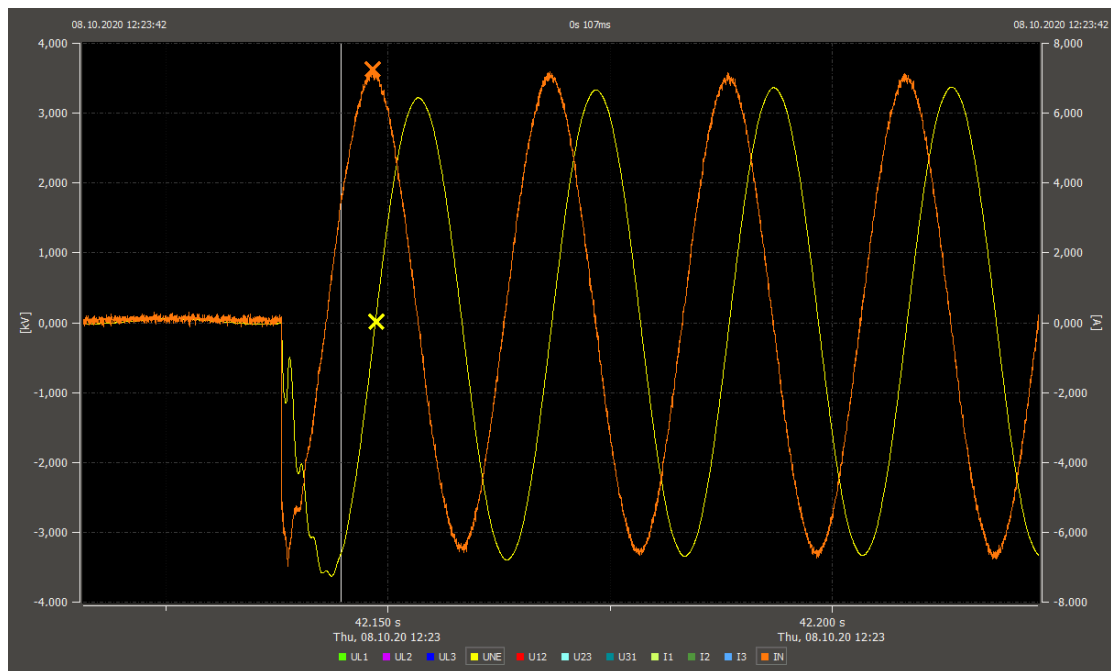
```

2020-10-08 12.23.42,621 qu2_Wischer           El: 1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000052
2020-10-08 12.23.42,621 Ice                 El: -21,25   0,69    21,98   0,00
2020-10-08 12.23.42,621 Rotation          El: -0,97    0,11    0,44    0,00
2020-10-08 12.23.42,682 qu2_Wischer DE      El: 1:L      2:-      3:B      4:- Fault record: 00000053
2020-10-08 12.23.43,144 Earth fault      come      Grp:1 BB:1 Uampl=1743,2V
2020-10-08 12.23.43,507 Earth fault      go        Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.23.43,507 Transient      come Ln   El:1 Fault record: 00000053
2020-10-08 12.23.43,507 Transient      come BB   El:3 Fault record: 00000053
2020-10-08 12.23.46,186 Harmonics      Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 12.23.46,186 Harmonics      El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.23.46,186 Harmonics      El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.23.46,186 Harmonics      El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.23.46,186 Wattmetr      Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.23.46,186 Wattmetr      El:1 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 12.23.46,186 Wattmetr      El:2 Iampl=0A 0,0° Iw=0A
2020-10-08 12.23.46,186 Wattmetr      El:3 Iampl=0A 0,0° Iw=0A

```

Kuva 52. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 5: Maasta erotettu verkko, 2,5 kΩ:n vika.

Kun tallennetta verrataan kompensoidun verkon vikatilanteisiin, huomataan, että U_o-jännite on vian aikana huomattavasti matalampi. Vikatilanne on kestänyt vain 360 ms, joten Wattmetric-suoja ei ole vielä tallentanut vikatilannetta lokiin. Vian kestoaika on hyvin linjassa kennoreleen suojauksen laukaisuaikakriteerin kanssa, missä vian laukaisuviiveeksi on asetettu 320 ms:iin. PQ-Mobilen tallenteesta, kuva 53, nähdään hyvin virran ja jännitteen välinen 90° vaihesiirto.



Kuva 53. SA1, msk 5: Maasta erotettu verkko, 2,5 kΩ:n vika. U_o ja I_o vaihesiirtokulma.

8.3.6 SA1, MSK 6: Komp., 2,5 kΩ:n vika, kuormitusvastus viiveellä

Koska suorassa maasulussa vikavirrat olivat säröytyneitä, testattiin kuudennessa maasulkukokeessa vielä uudelleen vikavastuksen kytkeytymistä vian aikana verkkoon 2,5 kΩ:n viassa. Tilanteesta tallentuivat seuraavat vikalokitiedot:

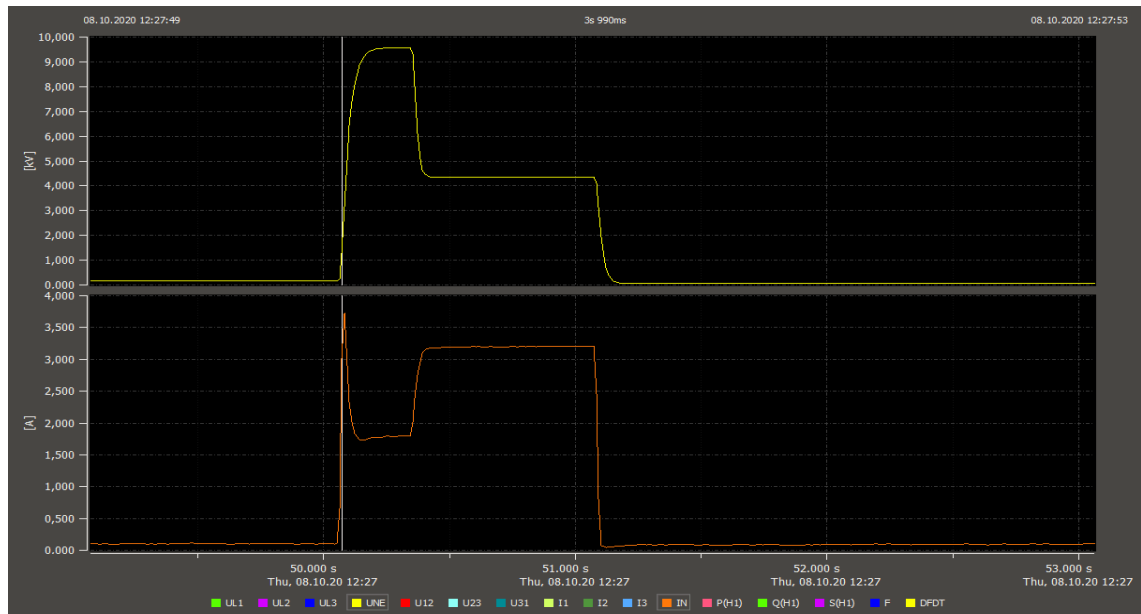
```

2020-10-08 12.27.51,559 qu2_Wischer           El:   1:L   2:-   3:B   4:- Fault record: 00000056
2020-10-08 12.27.51,559 Ice                El:  -16,21  0,83  20,74  0,00
2020-10-08 12.27.51,559 Rotation          El:   11,02  0,13  0,40  0,00
2020-10-08 12.27.51,619 qu2_Wischer DE    El:   1:L   2:-   3:B   4:- Fault record: 00000057
2020-10-08 12.27.52,071 Earth fault      come   Grp:1 BB:1 Uampl=4994,9V
2020-10-08 12.27.52,527 Transient          come Ln El:1 Fault record: 00000057
2020-10-08 12.27.52,527 Transient          come BB El:3 Fault record: 00000057
2020-10-08 12.27.53,157 Wattmetr          Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.27.53,157 Wattmetr          come Ln El:1 Iampl=2,5556A -160,9° Iw=-2,4153A
2020-10-08 12.27.53,157 Wattmetr          El:2 Iampl=0,25293A -96,8° Iw=-0,029984A
2020-10-08 12.27.53,157 Wattmetr          El:3 Iampl=7,8303A -91,4° Iw=-0,19512A
2020-10-08 12.27.53,362 Earth fault      go     Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.27.54,108 Harmonics          Grp:1 BB:1 Uampl=0,0V
2020-10-08 12.27.54,108 Harmonics          El:1 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.27.54,108 Harmonics          El:2 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.27.54,108 Harmonics          El:3 Iampl= 0,000A 0,0°
2020-10-08 12.27.55,444 Wattmetr          Grp:1 BB:1
2020-10-08 12.27.55,444 Wattmetr          go Ln El:1

```

Kuva 54. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 6: Kompensoitu verkko, 2,5 kΩ:n vika, kuormitusvastus kytkeytyy vian aikana.

MSK 6:n vian kesto-aika oli riittävä myös EOR-D:n Wattmetric-suojan toiminnalle ja suunnan määrittämiselle. Suunta määrittyi oikein. Uo-jännite on vastaavaa maasta erotetun verkon vikatilannetta korkeampi. Vian suunta on transienttisuojassa määritetty kulmakertoimen avulla, sillä 2,5 kΩ:n vika on pienentänyt viasta seuraavaa rotaatiota merkittävästi. Kun katsotaan vielä PQ-Mobilen tallennetta vikatilanteesta, kuva 55, näemme, kuinka tällaisessa tilanteessa lisävastuksen kytkeytyminen vaikuttaa selvästi Uo-jännitteeseen laskevasti ja Io-virtaan kasvattavasti, kun aikaisemmassa suorassa maasulussa lisävastuksen vaikutus Uo-jännitteeseen oli lähes olematon.



Kuva 55. SA1, msk 6: Kompensoitu verkko, 2,5 kΩ:n vika, kuormitusvastus kytkeytyy vian aikana. Uo ja Io RMS-arvot.

8.3.7 SA1, MSK 7: Katkeileva vika

Viimeisenä, seitsemäntenä, vikatilanteena suoritettiin katkeileva maasulkuvika kompensoidussa verkossa. Nyt EOR-D-rele toimi laukaisevana suojana. EOR-D tallensi tilanteesta seuraavat lokitiedot:

```

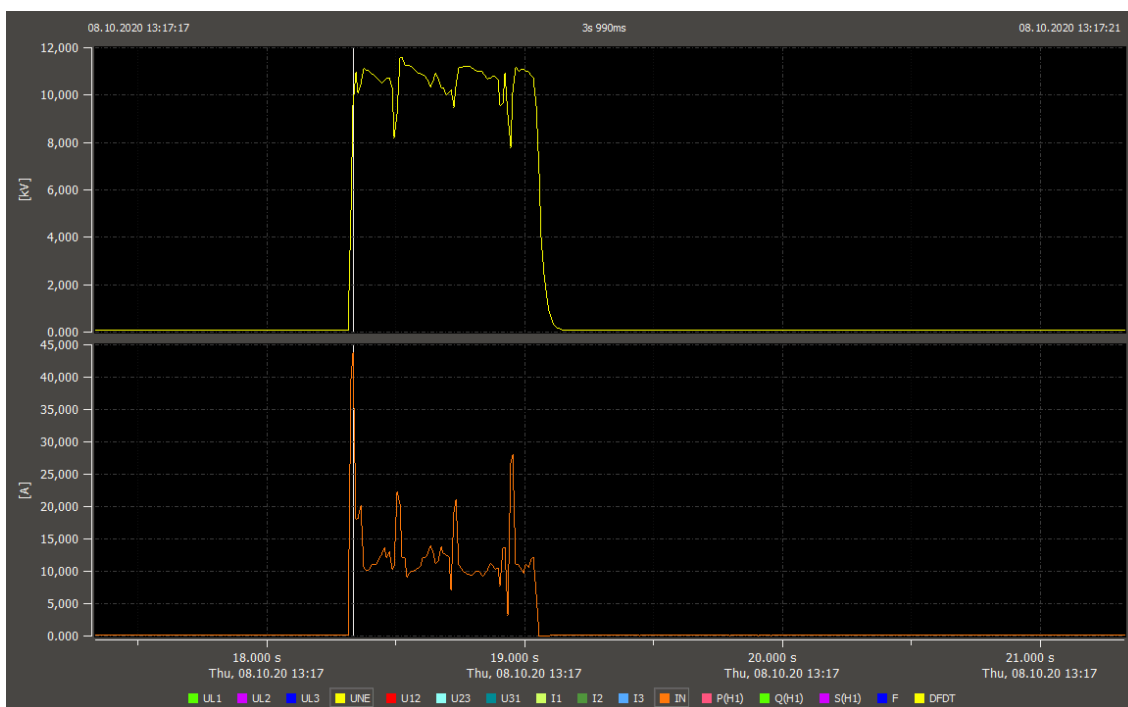
2020-10-08 13.17.19,800 qu2_Wischer           El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000066
2020-10-08 13.17.19,800 Ice                  El: -9,82 1,69 7,49 0,00
2020-10-08 13.17.19,800 Rotation           El: 155,09 1,33 -24,85 0,00
2020-10-08 13.17.19,859 qu2_Wischer DE       El: 1:L 2:- 3:B 4:- Fault record: 00000067
2020-10-08 13.17.19,992 qui                 El: 1:L 2:- 3:B 4:-
2020-10-08 13.17.19,992 qui_N vorwärts     El: 4 0 0 0
2020-10-08 13.17.19,992 qui_N rückwärts    El: 0 0 0 4
2020-10-08 13.17.19,992 qui_gradient        El: -77,72 1,49 36,85 0,00
2020-10-08 13.17.20,395 Earth fault         come Grp:1 BB:1 Uamp1=14744,8V
2020-10-08 13.17.20,395 qui                 come Ln El:1
2020-10-08 13.17.20,395 qui                 come BB El:3
2020-10-08 13.17.20,625 Transient           come Ln El:1 Fault record: 00000067
2020-10-08 13.17.20,625 Transient           come BB El:3 Fault record: 00000067

```

Kuva 56. SA1:n EOR-D-vikaloki, msk 7: Kompensoitu verkko, katkeileva vika.

Katkeilevassa viassa transienttisuojan algoritmossa rotaatiota kertyy paljon, mikä osoittaa hyvin viallisen johtolähdön. Transienttisuoja on nähnyt vian oikein lähdölle 1. Transienttisuojan lisäksi nyt uutena suojana qui-suojaalgoritmi on havahtunut Uo-jännitteen ylitettyä aseteltu 15 %:n vaihtelu mittaussekvenssin aikana. Qui-suojan tallenteessa näkyy transienttisuojan tavoin vian sijainti eri johtolähdöiltä katsottuna, "L"

vai ”B”. Kulmakertoimen sijaan tallenteesta näkyy 4 transienttia eli läpilyöntiä lähdöille 1 ja 3. Lyhyen toisen johtolähdön vuoksi tälle lähdölle ei ole tallentunut transienttihavaintoja. Uo-jännitteen vaihtelu transienttien aikana voidaan nähdä PQ-Mobilen tallenteesta:



Kuva 57. SA1, msk 7: Kompensoitu verkko, katkeileva vika. Uo ja Io RMS-arvot.

Kuva 57 näyttää, kuinka Uo laskee aina ennen uutta läpilyöntiä, jolloin Io ja Uo tekevät jälleen uuden piikin. Tämä katkeileva vika on hyvä esimerkki tilanteesta, missä Uo-jännite ei laske lähelle nollaa peräkkäisten läpilyöntien aikana. Tässä tapauksessa myöskään vikavirta ei laske nolnaan missään vaiheessa, joten tässä tapauksessa myös jäykkiin maasulkuihin keskittyvien suojiin, kuten suunnattu suoja, omaa kohtuulliset edellytykset nähdä vika.

8.4 SA2:n maasulkukoetulokset

Aseman 2 maasulkukoetulokset ovat hyvin samankaltaiset, eikä niitä siksi ole mielekäästä käydä kokonaisuudessaan läpi. Suojausratkaisu oli toteutettu samantapaisesti kuin asemalla 1. Aseman 2 kokeissa sää oli siinä määrin kuivempi, että katkeileva maasulkuvika saatiin toteutetuksi puhtaampana, mistä syystä katkeileva vika oli selkeästi katkeileva. Tarkastellaan siis vielä SA2:lta saadut katkeilevan maasulkukokeen koetulokset. Tilanteesta aseman 2 EOR-D-releen saama tallenne:

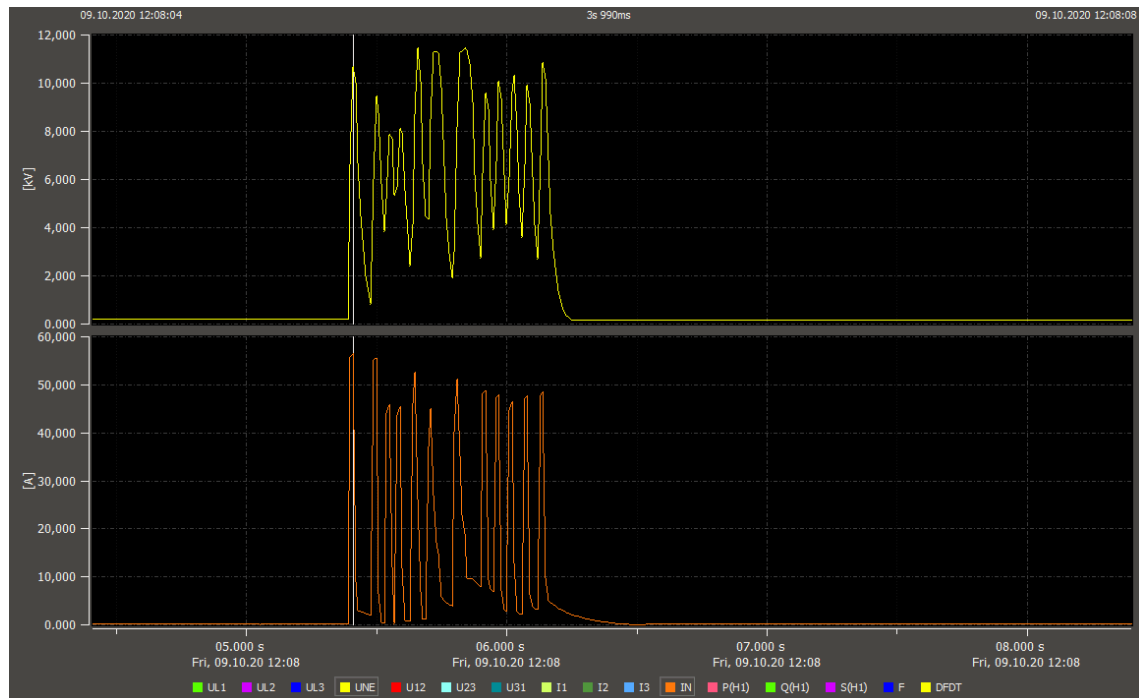
```

2020-10-09 12:08:06,494 qu2_Wischer DE          E1:  1:B    2:B    3:L    4:-  Fault record: 00000088
2020-10-09 12:08:06,703 qui                  E1:  1:-    2:B    3:L    4:-
2020-10-09 12:08:06,703 qui_N vorwärts  E1:   0     0     5     0
2020-10-09 12:08:06,703 qui_N rückwärts E1:   0     5     0     0
2020-10-09 12:08:06,703 qui_gradient  E1:  2,17   3,90  -10,10  0,00
2020-10-09 12:08:07,033 Earth fault   come      Grp:1 BB:1 Uampl=2737,5V
2020-10-09 12:08:07,033 qui          come BB  E1:2
2020-10-09 12:08:07,033 qui          come Ln E1:3
2020-10-09 12:08:07,493 Transient         come BB  E1:1 Fault record: 00000089
2020-10-09 12:08:07,493 Transient         come BB  E1:2 Fault record: 00000089
2020-10-09 12:08:07,493 Transient         come Ln  E1:3 Fault record: 00000089

```

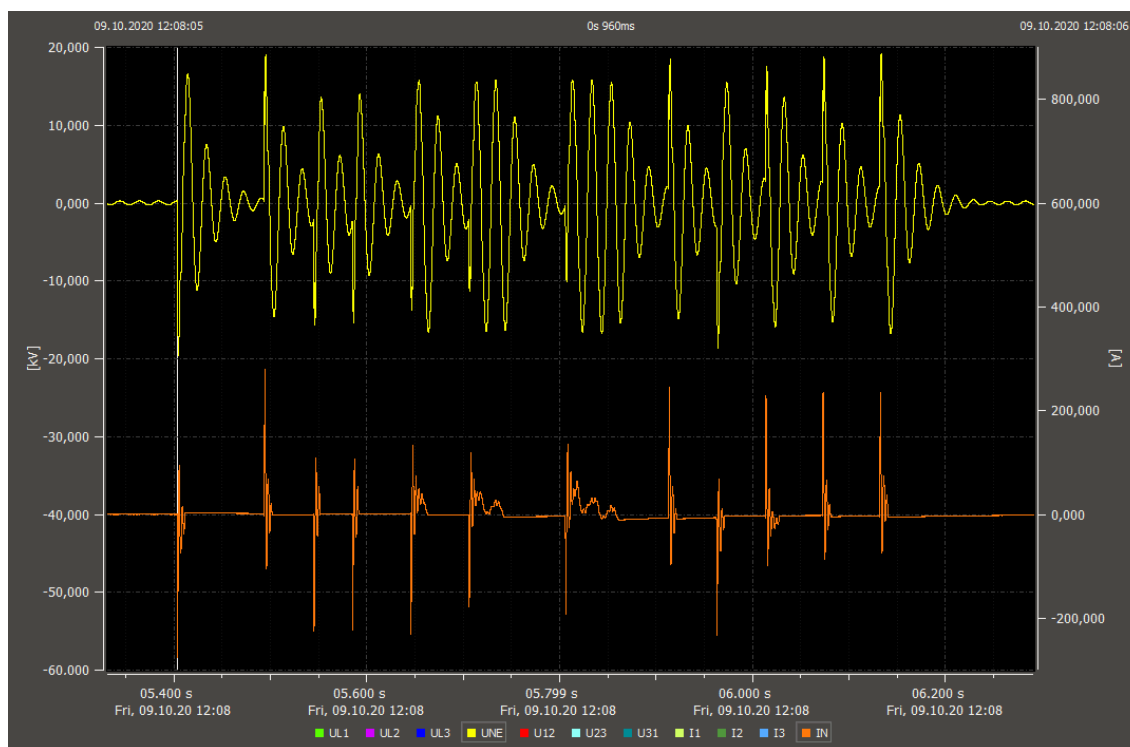
Kuva 58. SA2:n EOR-D-vikaloki, msk 6: Kompensoitu verkko, katkeileva vika.

Viasta saatu PQ-Mobile:n RMS-tallenne näyttää seuraavalta:



Kuva 59. SA2, msk 6: Kompensoitu verkko, katkeileva vika. Uo ja Io RMS-arvot.

Kuten näemme, vikatilanteessa Uo ja Io tippuvat aina läpilyöntien välissä lähes nolnaan. Vielä paremmin tämä on nähtävissä Uo:n ja Io:n aalto-kuvaajista:



Kuva 60. SA2, msk 6: Kompensoitu verkko, katkeileva vika. Uo ja Io kuvaajat.

Vikatilanne on hyvin selkeä ja nyt vain EOR-D-releen katkeileva qui-suoja on tallentanut vikatilanteesta tarkemmat tiedot lokitietokantaan. Transientisuojausta nähdään tallenteessa vain viallisen lähdön ja taustalähtöjen määritykset.

9 Yhteenveto ja pohdinta

Työn aikana kävi selväksi, kuinka laajalla kirjolla suojausratkaisuja on tarjolla. Johtolähtökohtaiset kennoreleetkin sisältävät poikkeuksetta useita suojausfunktioita. Nykyaikaisissa kennoreleissä maasulkusuojat ovat varsin laadukkaita ja näkevät maasulkuviat useimmissa vikatilanteissa. Haastavimpia vikoja suojauksen kannalta olevat katkeilevat sekä korkeaohmiset viat tuottavat edelleen haastetta suojaukselle. Työssä tarkastellut kennoreleet ovat toimivia johtolähtökohtaisessa suojauksessa, ja ne on suunniteltu toimimaan etenkin säteittäiskäytöissä.

Tässä työssä käsitellyt maasulkukokeet osoittavat, että EOR-D-rele kykenee näkemään maasulkuvikatilanteet hyvin moninaisissa vikatilanteissa. Kokeissa asemilla käytössä ollut kennoreleistys toimi suunnitellusti lähes kaikissa vioissa. Suuri 10 k Ω :n vikatilanne jäi suunnatulta suojaukselta havaitsematta osin asetteluarvojen rajatessa suojauksen havahtumista. Toisaalta suunnatussa suojauksessa on suositeltavaa pitää kynnyksarvot riittävän korkeina, jotta suojan havahtuvissa vioissa vikavirta on riittävän suuri ja selkeä, jolloin virhelaukaisut saadaan pidettyä vähäisinä. EOR-D-rele näki myös 10 k Ω :n viat moitteetta, joten voidaan todeta sen tuovan lisäarvoa korkeaohmisten vikojen havaitsemisessa. Tarkastelluissa maasulkukokeissa maasulku toteutettiin pisimmillään noin kilometrin päässä sähköasemalta. Kun otetaan huomioon, että muodostuvat transientit ovat vaimeampia, mitä kauempana asemasta maasulku tapahtuu, olisi tarkastelemisen arvoista tehdä vielä muutama koe EOR-D-releelle tilanteissa, missä maasulku toteutetaan hyvin pitkän johtolähdön päässä. Mikäli tällaisessa tilanteessa rele näkisi vielä 10 k Ω vian, voitaisiin sitä pitää lähes aukottomana suojana.

EO-R-D rele tarjoaa lisäarvoa myös katkeilevien vikojen suojaukseen, sillä ainakin tehtyjen kokeiden valossa rele näkee katkeilevat vikatilanteet vian muodosta ja esiintymistavasta riippumatta. EOR-D-releen hankkiminen asemille, missä ei vielä haluta saneerata kennokohtaista releistystä, mutta halutaan kasvattaa maasulkusuojauksen toimintavarmuutta, on suositeltavaa.

EO-R-D-rele auttaa vian paikantamisessa, kun vian sijaintia määritetään kytkentärajoja muuttamalla. Kun EOR-D-rele tarkkailee useaa johtolähtöä, sama rele näkee vian vaihtumisen johtolähdöltä toiselle käytännössä välittömästi. Välittömyyttä lisää, että vian tilannetta tarkkaillaan syklisesti läpi koko vian kestoajan.

Rengaskäyttöjä ei Suomessa vielä juurikaan harrasteta, mutta Keski-Euroopassa rengasverkkokäyttöä esiintyy. Tämä on nähtävissä EOR-D-releen suunnittelussa sen sisältäessä useita ominaisuuksia rengasverkkokäyttöihin. Rengasverkossa maasulkuvikatilanteet muuttuvat raktaisevasti, jolloin suojausratkaisut on suunniteltava erikseen rengaskäyttöön sopiviksi. Keskitetty suojausratkaisu on edukas rengasverkossa tapahtuvissa vikatilanteissa, kun renkaan eri johtolähdöillä kulkevia vikavirtoja voidaan tarkkailla. Renkaassa tapahtuvassa viassa vikavirta jakautuu vikaimpedanssien suhteessa, jolloin rakenteeltaan samankaltaisten johtolähtöjen tilanteessa lyhin tie vikapaikkaan voidaan selvittää.

EOR-D-releessä käytössä olevat suojausfunktiot hyödyntävät useammilta johtolähdöiltä saatavaa mittausdataa. Releessä käytössä olevat suojausfunktiot ovat kuitenkin toiminnaltaan sen kaltaisia, että ne periaatteessa ovat kykeneviä määrittämään vian suunnan vain yhdeltä johtolähdöltä saatavan mittaustiedon turvin. Viiallisen ja terveiden johtolähtöjen käyttäytyminen kulkee aina käsikädessä, mistä syystä laskennallisesti vikaa tarkasti käsiteltäessä voidaan vain yhden johtolähdön mittaustiedoilla vian suunta poikkeuksetta selvittää. Suojien toiminnan kannalta ei ole siis näyttöä, että myös taustaverkosta saatava mittausdata olisi ratkaisevassa roolissa suojausfunktioiden toiminnassa. Kuitenkin on selvää, että esimerkiksi EOR-D-rele ei pystyisi lokitietoja aivan nykyisessä laajuudessaan tallentamaan ilman useiden johtolähtöjen tarjoamaa mittausdataa.

Työn aikana kartoitettiin EOR-D-releiden käyttäjäkokemuksia myös Helen sähköverkko Oy:ltä. Käyttäjäkokemuksia antoivat Helenin relesuojauksen johtava asiantuntija Mika Loukkalahti sekä suojausasiantuntija Jari Virtanen. Helen on Suomen tasolla tällä hetkellä oikeastaan ainoa, joka käyttää suojausta kompensoidussa verkossa vain hälyttävänä ja ajaa vikatilanteessa verkkoa maasulussa, mikä on mahdollista verkon ollessa lähes täysin maakaapeliverkkoa. Vika paikannetaan mahdollisimman tarkasti kytkentärajoja muuttaen, minkä jälkeen vain pieni osa verkosta irrotetaan, jolloin jakelukatkosten määrä saadaan minimoiduksi. Helen toteuttaa vikojen havainnointia useilla päällekkäisillä suojausfunktioilla, millä varmistetaan että viat varmasti nähdään oikein ja ne saadaan tehokkaasti poistetuksi. EOR-D-releistys toimii siis lisäsuojana ennen kaikkea apuna vikojen paikantamisessa. Kokemusten perusteella EOR-D-rele on auttanut vikojen paikantamisessa. Ne ovat toimineet vikatilanteissa tehokkaasti ja mahdollistavat vikojen ripeän paikantamisen. Loukkalahden mukaan EOR-D-releillä on

havaittu tapahtuvan kennoreleitä vähemmän vian päälle-pois-räpsytystä, mikä on aiheuttanut jonkin verran haasteita hälytysratkaisujen toteuttamisessa.

Kokonaisuutena voidaan todeta EOR-D-releen tuovan lisäarvoa maasulkusuojaukseen monissa tilanteissa. Keskitetty suojausratkaisu on hyvä lisä etenkin vikojen paikantamisessa. On kuitenkin huomionarvoista, että tulosten perusteella ei voida suoraan nimetä kennoreleille selkeitä heikkouksia, sillä tehdyissä testeissä kennoreleet toimivat varsin hyvin. Markkinoilla olevia kennoreleitä on lisäksi kymmenittäin, joten kattavan vertailun tekeminen olisi valtaisa työ. Multirel on aiemmin toteuttanut kenttätestejä, missä kennoreleet eivät ole nähneet vikoja läheskään yhtä hyvin. Syitä releiden toimimattomuuteen näissä tilanteissa on kuitenkin useita, kuten esimerkiksi asetteluparametrit tai mittamuuntajien aiheuttama virhe, joten yksin releiden syyksi ei näitä tilanteita voi laittaa.

Tulevaisuus näyttää, mihin maasulkusuojaus kehittyy. Tällä hetkellä Suomessa kennokohtaisella suojauksella on vahva rooli. Mielenkiintoista on, voitaisiinko tulevaisuudessa sähköasemien suojauksia toteuttaa täysin kahdennettuna keskitettynä suojausratkaisuna, missä johtolähtökohtainen suojaus jätettäisiin kokonaan pois. Näin voitaisiin saavuttaa asemakohtaisesti säästöjä, mutta tietysti suojausajattelu pitäisi toteuttaa täysin erilaisesta näkökulmasta ja samalla varmistaa, että suojauksen toimintavarmuus saadaan ylläpidettyä.

Lähteet

- 1 Lakervi E. & Partanen J., 2008. Sähköjälkeluteknikka. Helsinki. Gaudeamus Helsinki University Press.
- 2 ABB:n TTT-käsikirja, 2000-07.
- 3 Standardi SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset. 5. painos.
- 4 A. Eberle GmbH & Co. KG, Earth fault detection relay – Model EOR-D, Operating instructions manual, 2014.
- 5 Schneider Electric, VAMP 255 User manual, 2018.
- 6 ABB Distribution Solutions, REX 640 Technical Manual 13.2.2020.
- 7 Wahlroos, A. & Altonen, J. 2014. Application of novel multi-frequency neutral admittance method into earth-fault protection in compensated MV-networks. ABB Oy Medium Voltage Products Finland.
- 8 Gernot Druml, A.Eberle GmbH&CoKG – Germany, Qu-algorithm for detecting earth-faults.
- 9 PARTANEN Jarmo 2011. Sähköjälkeluteknikka luentomateriaali [verkkoaineisto]. LUT Energy. Saatavissa: <https://docplayer.fi/11512091-BI20a0500-sahkonjälkeluteknikka.html> Luettu 3.12.2020.
- 10 Romppainen, P. 2016. Diskreetti Fourier-muunnos ja sen hyödyntäminen signaalien spektrien muodostamisessa. Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B. Kajaani: Kaajaanin ammattikorkeakoulu.
- 11 Wahlroos, A. & Altonen, J. 2017. Compensated neutral networks and multifrequency admittance protection. SEAPAC 17 – APB5 – Melbourne March 14th-15th. CIGRE. 1-44.
- 12 Loos M. 2014, PhD thesis: Single Phase to Ground Fault Detection and Location in Compensated Network.

- 13 Helen Sähköverkko Oy , sähköpostikysely: johtava asiantuntija Mika Loukkalahti ja suojausasiantuntija Jari Virtanen.
- 14 Mörsky J. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna.
- 15 Nikander A., Mäkinen A. 2017, Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Tampere. Raportti/Tampereen Teknillinen Yliopisto, Sähköenergiatekniikan laboratorio.
- 16 Elovaara J. & Haarla L. 2011, Sähköverkot I - Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta.
- 17 Elovaara J. & Haarla L. 2011, Sähköverkot II - Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet.