



Pyry Korpikoski

Keskijänniteverkon vikaindikointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

4.4.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Pyry Korpikoski
Otsikko:	Keskijänniteverkon vikaindikointi
Sivumäärä:	26 sivua
Aika:	4.4.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Save Lanin perustaja Lauri Jurvanen Lehtori Kai Virta

Keskijänniteverkko on altis monenlaisille vioille. Vikoja aiheuttavat sää ja luonnonilmiöt. Suomessa yli puolet keskijänniteverkosta on avojohtoverkkoa. Näissä osissa jakeluverkkoa on käytössä perinteisiä vikasuojauksia, jotka eivät havaitse kaiken tyyppisiä vikoja tarpeeksi tarkasti. Etenkin korkean impedanssin vian aiheuttama pieni vikavirta voi jäädä suojareleen asetteluarvoa pienemmäksi, jolloin vika jää havaitsematta. On myös tärkeää tietää vian suuruus ja vikapaikan sijainti. Uudenlainen teknologia mahdollistaa paremmat mahdollisuudet vikojen tarkempaan havaitsemiseen ja paikantamiseen. Algoritmeja ja koneoppimista voidaan käyttää perinteisten vikasuojauksien tukena.

Tässä insinööriyössä tutkitaan erilaisia vikoja, vian suojauksia ja uudenlaisia ratkaisuja vian indikoimista varten keskijänniteverkossa. Etenkin keskitytään keskijänniteverkon avojohtoverkon vikoihin. Antureiden avulla saadaan mittausnäytteitä eri puolilta verkkoa. Mittausnäytteitä voidaan algoritmien avulla prosessoida, jotta voidaan havaita vika mahdollisimman tarkasti. Sähköverkkooyhtiöillä on velvollisuus parantaa sähkön toimitusvarmuutta, ja uudenlaiset vikaindikaattorit perinteisen vikasuojauksen kanssa voisivat lyhentää verkon keskeytysaikoja. Niillä voidaan saada tarkka tieto vikapaikasta, mikä helpottaa vian korjaamista. Pienien vikojen aikainen havaitseminen vikaindikoinnin avulla voi ennaltaehkäistä isompien vikojen syntymistä. Tässä insinööriyössä kerätään tietoa vikaindikoinnista ja asioista, jotka on tärkeä huomioida vikaindikoinnissa. Institute of Electrical and Electronics Engineers on kansainvälinen järjestö, jonka tieteellisiä julkaisuja on käytetty insinööriyön lähteenä.

Tavoitteena oli tutustua keskijänniteverkon erilaisiin vikoihin ja vikojen indikoimisen keinoihin. Tuloksena on algoritmien ja antureiden käyttäminen etenkin korkean impedanssin vikojen tarkempaan indikointiin ja havaitsemiseen.

Avainsanat: keskijännite, sähkötekniikka, vikaindikointi, avojohto, korkean impedanssin vika

Abstract

Author: Pyry Korpikoski
Title: Medium Voltage Overhead Line Fault Indication
Number of Pages: 26 pages
Date: 4 April 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automation and electrical engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Lauri Jurvanen, Founder of Save Lan Oy
Kai Virta, Senior Lecturer

Medium voltage overhead power lines are prone to many kinds of faults. Faults are caused by weather conditions and natural phenomenon. In Finland over a half of distribution network consists of overhead power lines. These parts of distribution network have older fault protection solutions, which are not accurate enough to detect all faults. Especially high impedance faults cause a low fault current. Set values of fault protection can be higher than fault current. Also, it is important to detect magnitude and location of fault. New technologies allow new opportunities for better, more accurate fault detection. Algorithms and machine learning can be used to improve existing fault protection on substations.

The purpose of this work was to study fault types in medium voltage distribution network and find new solutions to detect faults, especially concerning overhead power lines. It is possible to wirelessly measure currents with sensors all over the distribution network. After gathering measuring data of currents, it is needed to process it with algorithm to detect faults accurately. Electricity network companies have responsibility to improve delivery reliability. Adding modern fault indication to existing power lines can reduce the downtime of distribution network. They can also help to put fault locations on map which can make it easier to fix fault part of the network. Detecting even small faults can help prevent them turning to bigger faults. Goal in this work was to gather information from different sources about fault indication and fault types of medium voltage distribution network in Finland. Scientific publications of the Institute of Electrical and Electronics Engineers were used as sources for this thesis work.

Goal in this thesis was study fault types and indication, as a result, there is information about fault indication algorithms. Based on this study, it can be established that there are algorithms for fault indication that are more accurate than traditional fault detection systems and high impedance faults are most difficult to recognize without algorithms and fault indication.

Keywords: medium voltage, fault indication, overhead power line, electrical engineering, high impedance fault

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Keskijänniteverkko	2
2.1	Keskijänniteverkon olosuhteet ja vian aiheuttajat	4
2.2	Erotettu, sammutettu ja maadoitettu verkko	5
3	Erilaiset vikatilanteet keskijänniteverkossa	7
3.1	Maasulku	8
3.2	Korkean impedanssin vika	8
3.3	Korkean impedanssin maasulku	9
4	Vian tunnistamisen keinoja ja algoritmeja	10
4.1	Perinteiset vikasuojat	12
4.2	Älymuuntamon relesuojat	13
4.3	Algoritmit ja tiedon keräys	15
4.3.1	SDI	15
4.3.2	MACI	18
4.4	Maasulkuvirta, summavirta ja nollajännite	18
4.5	Vikaindikaattori pylväässä	21
4.6	Itsenäisesti toimiva vikaindikaattori johdolla	23
5	Pohdinta	25
	Lähteet	26

1 Johdanto

Keskijänniteverkot ovat kaikista yleisimpiä vikapaikkoja sähkönjakeluverkossa. Siksi on tärkeää, että verkossa tapahtuvien vikojen tunnistaminen on mahdollisimman nopeaa ja tarkkaa. Sähkökäyttäjille tarjotaan hyvälaatuista ja luotettavasti toimivaa sähköä. Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia yleisimpiä vikatilanteita keskijänniteverkossa ja selvittää erilaisia viantunnistamis- eli indikointi keinoja. Tarkoituksena on tutkia keskijänniteverkon yleisiä piirteitä ja rakennetta.

Uudenlaisille vikojen indikointikeinoille voisi olla käyttöä keskijänniteverkon paikoissa, joihin on hankala päästä. Sähköverkot voivat sijaita syrjäisillä alueilla, ja talvella olosuhteet vaikeuttavat entisestään vikapaikan tarkkaa ja nopeaa kartoitusta. Joskus viat voivat olla hankalasti havaittavissa perinteisillä johtolähdön suojalaitteistoilla. On olemassa edistyneempiä vikaindikaattoreita, jotka sijaitsevat lähempänä vikapaikkaa. Ne mahdollistavat pienempien vikavirtojen havaitsemisen sähköverkossa. Vikaindikaattoreita pystyy lisäämään vanhoihin keskijänniteverkkoihin perinteisten vikasuojalaitteiden tueksi. Lisäksi verkon tilaa voidaan seurata etäkäyttönä. Juuri keskijänniteverkoissa tapahtuu suurin osa haitallisista vikatilanteista ja niiden havaitseminen vähentäisi haittoja. Haitat voivat olla taloudellisia, terveydellisiä ja eläimille haitallisia.

Vikaindikaattorin tärkein tehtävä on auttaa havaitsemaan vikapaikan sijainti tarkasti ja antaa hälytys johdon suojalaitteistoille. Jos vika on riittävän iso, voidaan vikaantunut sähköverkon osa erottaa verkosta. Se helpottaa vikojen korjaamista. Nykyaikaiseen tekniikkaan perustuvia vikaindikaattoreita on kokeiltu käytännössä, mutta ainakaan vielä ne eivät ole kovin yleisiä. On olemassa vikaindikaattorilaitteita, jotka asennetaan johtopylvääseen, ja vikaindikaattoreita jotka asennetaan johdolle. Johdolla sijaitseva vikaindikaattorin anturi lähettää dataa langattomasti keskusyksikölle eli monitorointilaitteelle. Yleensä käytetään radio- taajuutta langattomaan tiedonsiirtoon.

Ongelmaksi voi tulla anturin virtalähteen toteutus. Vikaindikaattorin anturi tarvitsee toimiakseen katkeamattoman virtalähteen. Pylväälle asennettuun laitteeseen täytyy tuoda virtajohto, josta laite saa käyttövirran. Se nostaisi asennuksen vaativuutta ja kustannuksia. Vikaindikaattorilaitteessa voi olla myös akku, joka tekee asentamisesta nopeampaa ja helpompaa. Se ei kuitenkaan välttämättä riitä tarpeeksi pitkään talven olosuhteissa. Toimiva ratkaisu virtalähteeksi vikaindikointilaitteelle voisi olla asennus johdolle ja sen virtalähteeksi induktiokäämi. Käämi vois indusoida sähköenergiaa laitteelle suoraan keskijännitejohdosta. Se olisi helppo asentaa ja toimisi itsenäisesti virran saannin osalta. Vikaindikaattori olisi näin ollen itsenäisesti toimiva. Se ei tarvitsisi ylläpitotoimia.

Vikavirranmittauslaitteiston pitää pystyä paikantamaan mahdollisimman tarkasti, missä kohtaa avojohtoverkkoa vika ilmenee. Se olisi arvokasta, jotta vian aiheuttamat mahdolliset materiaalivahingot ja sähkökatkot saadaan pidettyä vähäisinä.

ABB valmistaa älymuuntamoita, joissa on suojalaitteistoja johtolähdöille. Ne ovat Suomessa monessa paikassa yleisesti käytössä. Älymuuntamossa on suojalaitteet, joissa on useita asetteluarvoja eri tyyppisille vioille. Suojauslaite pystyy myös määrittämään vikavirran suunnan. Sen avulla saadaan tietoa, millä johtolähdöllä vika on. Niitä käytetään maakaapeleille ja avojohdoille. Verkko-yhtiö Elenia on ottanut käyttöön ABB:n älymuuntamoita. (Muuntamoratkaisut.)

2 Keskijänniteverkko

Sähkönjakelussa keskijännite on 1–36 kV. Sitä suurempi jännite on suurjännite, ja sitä pienempi jännite on pienjännite. Kantaverkossa käytetään pääasiassa suurjännitettä. Keskijänniteverkkoa tarvitaan siirtämään sähköä suurjänniteverkosta sähköenergiaa jakelumuuntajille sopivaan pienjänniteverkkoon. Teho keskijänniteverkossa on yleensä 1–3 megawatin luokkaa. Yleisin Suomessa toimiva keskijännite on 20 kV. Se alennetaan muuntamoilla tarvittavaan kulutukseen sopivaan 400 V:n jännitteeseen. Suomessa keskijänniteverkossa voi olla

paikoittain tilanne, että nollajohdin puuttuu ja se on maadoitettu tähtipisteestä. (Lakervi & Partanen 2008.)

Suomessa tyypillinen keskijännitejohto on päällystämätön avojohto, joka on sammutettu sammutuskuristimella. Keskijänniteverkko on suurimmaksi osaksi rakennettu silmukkaverkoksi, mutta on myös säteittäin rakennettuja osia. Etenkin syrjäisimmillä, vähemmän rakennetuilla alueilla on käytössä pitkiä avojohtoväyliä. Sähköasemilla keskijännitejohdon suojana toimivat ylivirtarele, maasulkurele ja jälleenkytkentäreleet. Keskijänniteverkossa tapahtuu 90 % sähkökäyttäjille tapahtuvista keskeytyksistä. Se toimii myös yleensä vaihtoehtoisena sähkönsiirtoväylänä, jos suurjänniteverkossa on keskeytyksiä. (Nikander & Järventausta 2017.)

Kuvasta 1 nähdään avojohtojen olevan Elenian keskijänniteverkossa yleisiä. Elenian säävarma verkko on maakaapeliverkkoa. Maakaapelointia löytyy enemmän taajamista ja kaupungeista. Syrjäisimmillä alueilla on enemmän vioille altista keskijänniteavojohtoverkkoa.

Elenian sähköverkko 31.12.2021	Pituus	Säävarman verkon osuus
Koko verkko	76 100 km	60 %
Keskijänniteverkko	28 550 km	56 %
Pienjänniteverkko	46 250 km	62 %

Kuva 1. Elenia Säävarman verkon osuus Elenian palvelemalla alueella (Elenia säävarman verkon tarina).

Sähkön toimitusvarmuuden parantamiseksi sähköverkkoa on siirretty keskeltä metsää teiden varsille. Tarkoituksena on ennaltaehkäistä ja estää vikojen syntyminen. Maakaapeloinnin lisääminen parantaisi toimitusvarmuutta, mutta

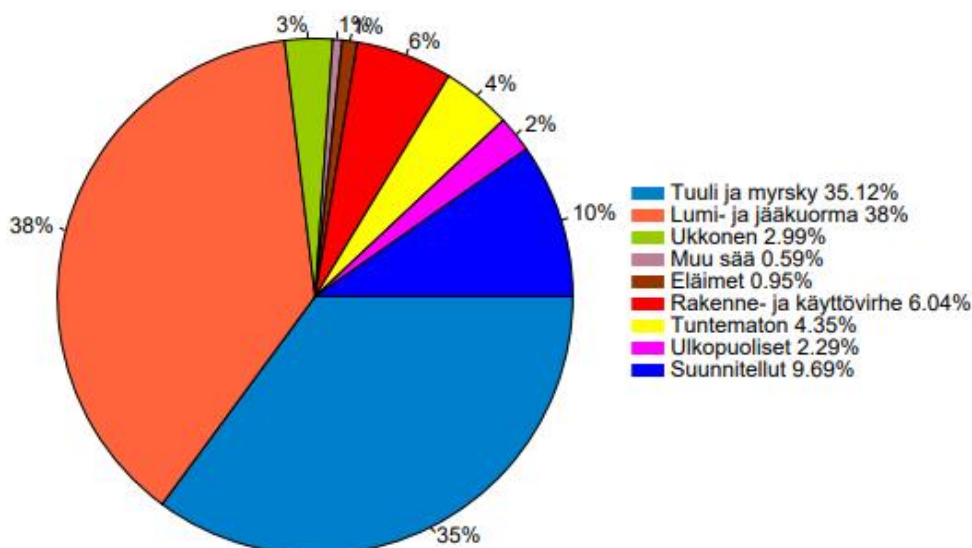
maakaapeli on huomattavasti kalliimpaa rakentaa. Suurin osa keskijänniteverkosta on silti vielä avojohtoa, joka on vioille altis. (Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje.)

On olemassa muovipäälysteisiä PAS-keskijännitejohtoja. Ne estävät vian syntymistä, kun johtimet osuvat yhteen. Niillä saadaan vian ilmaantumisen todennäköisyyttä pienennettyä ilman, että se kuitenkaan maksaisi yhtä paljon kuin maakaapelointi.

Sähkömarkkinalaki (2023) kannustaa ja ohjaa verkkoyhtiöitä panostamaan sähkön laadun ja toimintavarmuuden parantamiseen. Keskijänniteverkon suojausk-sille on asetettu vaatimuksia standardissa SFS 6001 (2018). Jakeluverkon vika ei saa aiheuttaa koskaan yli kuuden tunnin keskeytystä. Jos sähkömarkkinalain määräämiä laatuvaatimuksia sähkönjakelussa ei täytetä, on sähkön käyttäjä oikeutettu lain mukaisiin korvauksiin. (Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje.)

2.1 Keskijänniteverkon olosuhteet ja vian aiheuttajat

Suomessa talvi aiheuttaa haasteita avojohtoille. Kuura aiheuttaa johdon päälle tykkylunta, ja se painaa johtoja maahan. Avojohtoa kulkee syrjäisillä alueilla, joten niiden huoltaminen voi olla haastavaa. Etenkin vanhat sähköverkon osat voivat kulkea keskellä metsää eli huollon ja ylläpidon kannalta haastavissa paikoissa. Johdon omistavan verkkoyhtiön huoltoryhmän on hankala päästä matkustamaan vikapaikalle, ja matkustaminen voi olla hidasta. Perinteisillä vikasuojauksilla voidaan saada vikavirran suunta ja suuruus, mutta sen avulla tarkan vikapaikan löytäminen pitkällä sähkölinjalla on hankalaa. Kuvasta 2 nähdään keskijänniteverkon vikojen aiheuttajat ja niiden keskeytysaikojen osuudet. Keskijännitejohdot ovat alttiita vikatilanteille, ja ne aiheuttavat ison osan sähkönjakelun häiriöistä. (Nikander & Järventausta 2017.)



Kuva 2. Keskeytysaikojen aiheuttajien tilasto Suomen keskijänniteverkossa (Keskeytystilasto).

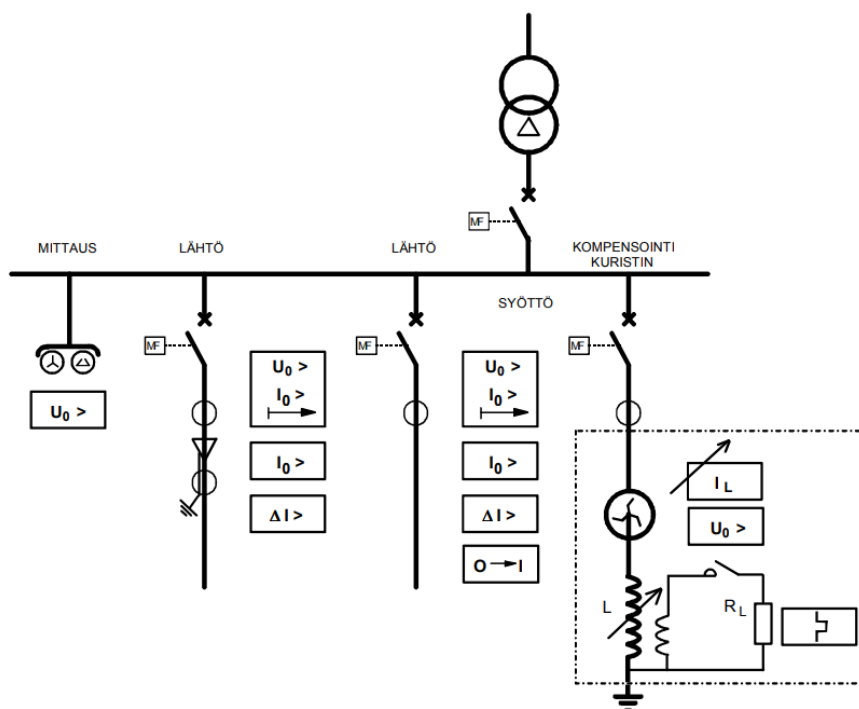
Keskijänniteverkon avojohdoille voi ilmaantua monen tyyppisiä vikoja, joita aiheuttavat sää ja luonnonilmiöt. Mahdollisia vian aiheuttajia ovat salamanisku, katkennut pylväs, pudonnut johto, maahan painautunut johto ja sähkölaitteistojen viat. Pelkästään tuuli, myrskyt, jääkuorma ja lumi aiheuttavat 73 % koko Suomen keskijänniteverkon vioista. (Keskeytystilasto.)

2.2 Erotettu, sammutettu ja maadoitettu verkko

Esiintyvien vikojen laatuun vaikuttaa myös se, miten verkko on kytketty suhteessa maan potentiaaliin. Vikojen laatuun vaikuttaa, saadaanko maadoitukset tehtyä tarpeeksi kestäviksi eli onko maadoitusresistanssi johtoväylällä riittävä.

Tähtikytkennässä sähköverkon maan ja tähtipisteen välille syntyy maasulussa jännite, jota kutsutaan nollajännitteeksi. Erotetussa verkossa vikavirta on kapasitiivista. Erotettu verkko on Suomessa yleisessä käytössä, koska maadoitusresistanssi on monissa johtoväylissä liian pieni. Se on kuitenkin haastava vikatilanteiden sattuessa, koska maan ja vaiheen potentiaalien ero on suuri.

Sammutettu verkko on monessa paikassa käytössä Suomessa, minkä kytkentää kuva 3 esittää. Sammutetussa verkossa kapasitiivista vikavirtaa pyritään kompensoimaan tähtipisteeseen kytketyllä kuristimella. Kuristin mitoitetaan kapasitiivisen maasulkuvirran mukaan, joka vaihtelee paikoittain. Suojauksessa voidaan asetteluarvot asettaa vikapaikan pätötehon mukaan tai sitten seurata kuristimen yli kulkevaa nollavirtaa ja -jännitettä. Kuva 3 esittää jälkimmäistä tilannetta. Kuristin pienentää maasulussa vikapaikassa kulkevaa maasulkuvirtaa. Maasulkuvalokaaret vähenevät, ja ne voivat jopa sammua itsestään. Keskijänniteverkossa on vain harvoin muuntajan tähtipiste käytössä. Sen takia käytetään maadoitusmuuntajaa. Kompensointiaste K kertoo kuinka paljon kapasitiivisesta vikavirrasta on kompensoitu kuristimella.



Kuva 3. Sammutetun verkon rakenne ja vikojen suojaus nollajännitteen avulla (ABB:n TTT-käsikirja 2000).

Verkko on sammutettu silloin kun K on 1. Silloin maasulkuvirta kulkee kuristimen kautta. Sammutetun verkon etuja ovat pienempi oikosulun ja valokaaren riski, koska vikavirta on pienempi. Se on myös sähköturvallisempi vikatilanteissa, ja vian poistaminen vaatii vähemmän jälleenkytkentöjä. Haittana

sammutetussa verkossa on kompensoinnin aiheuttama epäsymmetria. Tämä vaikuttaa maasulkusuojaukseen niin, että ylivirtasuojauksen asetteluarvo ei voi olla yhtä pieni kuin erotetussa verkossa. Siitä seuraa suurempi nollajännite maasuluissa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Yleensä kuristimen induktanssia voidaan säätää. Sen seurauksena vian kautta kulkee jäännösvirta. Ne voivat johtua häviöistä ja yliaalloista verkossa. Sähköverkossa pyritään siihen, että kompensointiaste on lähellä arvoa 1. Kuitenkaan arvo ei voi olla tasan 1, koska se aiheuttaa resonansseja verkossa. Yleensä alikompensoidaan kompensointiaste arvoon 0,9–0,95. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

3 Erilaiset vikatilanteet keskijänniteverkossa

Keskijänniteverkko on Suomessa suurilta osin avojohtoa. Se altistaa verkon erilaisille vikatilanteille. Se on altis säälle ja luonnonilmiöille. Koko verkon toiminta ei saa keskeytyä yksittäisestä viasta johdolla. Sähkönjakelun pitää olla luotettava sen käyttäjille. Avojohtoilla esiintyviä vikoja ovat oiko- ja maasulut. Oikosulut tapahtuvat, kun vaiheet pääsevät koskemaan toisiaan. Pahin tilanne on kolmivaiheinen oikosulku, koska vikavirrat ovat suuria. Toisaalta kolmivaiheiset maasulut ovat helpommin suojattavissa, koska johdolle syntyy suuria virtoja yhdelle tai useammalle vaiheelle.

Oikosulku aiheuttaa kuormitusvirtaa suuremman vikavirran. Niitä voi syntyä jos johdon eriste vioittuu ja sähkö pääsee johtamaan sen läpi. Vaiheiden välille voi myös osua jokin esine, joka saa vaiheet oikosulkuun. Oikosulkuviat eivät ole niin yleisiä ja niiltä osataan suojautua. Vikojen ennakointia voi aina parantaa. (Lakervi & Partanen 2008: 28.)

Oikosulkuja vastaan voidaan tehdä tehokkaasti toimivat suojaukset, koska suuret vikavirrat on helpompi havaita. Oikosulkusuojaus toimiikin yleensä niin, että

on laskettu johdolle kolmivaiheinen oikosulkuvirta, josta voidaan määrittää sopiva asetteluarvo releelle. Jos asetteluarvo ylittyy, relesuojaus havahtuu ja viallinen johtolähtö erotetaan verkosta. Verkon vikojen tyyppiin vaikuttaa, miten verkossa olevat muuntajat on kytketty ja paljonko verkosta on avojohtoa tai maakaapelia. Maakaapelit lisäävät kapasitiivista kuormaa verkossa. (Nikander & Järventausta 2017.)

3.1 Maasulku

Johtimen eristeet voivat kuluja sään tai mekaanisen rasituksen vaikutuksesta. Se voi aiheuttaa vian, kun johdin osuu esimerkiksi puunoksaan. Sen kautta syntyy vikavirta puun kautta maahan eli maasulku ja maasulkuvirta. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa vikaresistanssin suuruus. Verkon osan riittävä maadoitus pienentää maasulkuvirtaa. Avojohtoon pylvään eristeet voivat myös vioittua, jolloin maasulku syntyy pylvään kautta maahan. Maasulkuvika voi aiheuttaa vaarallisia ja haitallisia kosketusjännitteitä vikapaikalle. Voi syntyä myös katkeilevaa maasulkua, joka johtuu satunnaisista läpilyönneistä. Tätä voidaan kutsua katkeilevaksi maasuluksi. Maasulkuvirta voi vaihdella ajoittain paljon, ja vika voi edetä ajan myötä suuremmaksi. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Keskijänniteverkossa suojarleet mittaavat nollajännitteitä ja summavirtoja. Niille on asetettu asetteluarvot, joiden ylittäminen antaa hälytyksen tai vikailmoituksen, joka katkaisee vioittuneen johtolähdön verkosta. Suojarle voi myös seurata epäharmonisia komponentteja, joita syntyy maasulun aikana. (Jurvanen 2022.)

3.2 Korkean impedanssin vika

Monesti verkkovikojen etsiminen perustuu jännitteiden ja virtojen mittaamiseen jakeluverkon solmukohdissa, kuten sähköasemilla ja muuntamoilla. Kun virta kasvaa yllättäen yhdessä kohtaa verkkoa nopeasti, voidaan sen arvioida johtuvan viasta jakeluverkossa. Vian havaitsemiseen voidaan käyttää ylivirtasuojaa. Korkean impedanssin vika on kuitenkin sellainen vikatilanne, jossa jokin

huonosti johtava materiaali, jolla on korkea impedanssi on vaiheen ja maan välissä tai vaiheiden välissä. Likaantunut vaihejohdon eriste voi aiheuttaa myös korkean impedanssin vian, kun eristys heikkenee. Vikavirta voi olla mitä vain nollan ja sadan ampeerin välillä. Vikavirta ei välttämättä nouse tarpeeksi, jotta neliöllisen keskiarvoon eli tehollisarvoon perustuvat ylivirtasuojalaitteet toimisivat. Tämän tyyppiset viat voivat olla vaarallisia, koska viat voivat jäädä kokonaan huomaamatta. (Kagan & Matsuo 2016.)

Haasteena on saada korkean impedanssin viat tunnistettua luotettavasti ja ilman, että tulee vääriä hälytyksiä. Pitää huomioida muusta kuin viasta johtuvat virran muutokset jakeluverkossa, kuten syötettävän kuorman muutos. Korkean impedanssin vika voi myös olla hyvin dynaaminen. Esimerkiksi pudonnut vaihejohto voi liikkua maassa sähkömagneettisesta voimasta, syntyy satunnaisia valokaaria ja eriste voi hiljalleen hajota muuttaen vian johtavuutta. Väärät hälytykset vikavirrasta voivat tulla haitallisimmiksi kuin hyödyt vikavirran havaitsemisesta. (Nikander & Järventausta 2017.)

Älymuuntamot pystyvät tunnistamaan vikoja yleensä noin 5000 ohmin vikaresistanssiin asti. Sen jälkeen vikavirrat ovat liian pieniä asetteluarvoille (Jurvanen 2022).

3.3 Korkean impedanssin maasulku

Korkean impedanssin maasulku aiheutuu yleensä, kun vaihejohdin osuu maahan. Hajonnut pylväk tai jääkuorma johtimen päällä voi pudottaa johdon maahan. Korkean impedanssin viaksi voidaan sanoa yli 10 kilo-ohmin vikoja. Suurimmillaan impedanssi voi vikatilanteessa olla satojatuhansia ohmeja. Viat aiheuttavat epälineaarista kuormaa ja usein läpilyöntejä johdon eristyksen läpi. Epälineaarisuus tarkoittaa sitä, kun kuorman ottama virta on eri muotoista kuin johtimeen tuleva syöttöjännite. Jakeluverkossa se tarkoittaa, että kuorman ottama virta ei ole sinimuotoista. Lineaarinen kuorma ottaa verkosta virtaa sinimuotoisesti. Reaktiivisuus ja sen aiheuttama pelkkä vaiheen siirto eivät ole epälineaarista kuormaa, koska virran muoto säilyy ja vaihe-ero muuttuu.

Kompensoinnin säätäminen voi aiheuttaa tämän tyyppisiä muutoksia sähköverkossa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Maasulun aiheuttama epälineaarinen kuorma aiheuttaa yliaalloja eli verkon taajuuden monikertoja. Harmoniset yliaallot ovat kokonaisluvun monikertoja verkon taajuuteen verrattuna, ja epälineaariset yliaallot eivät ole kokonaisluvun monikertoja. (Nikander & Järventausta 2017.)

Maasulun virran suuruuteen vaikuttaa myös se, miten verkon nollajohdin on kytketty verkon muuntajilla. Yleisimmät nollajohtimen kytkennät jakeluverkossa ovat erotettu nollajohdin maasta, maadoitettu nollajohdin ja maadoituskäämillä kompensoitu nollajohdin eli sammutettu verkko. Suomessa käytetään erotettua nollajohtoa ja reaktanssin kautta maadoitettua nollajohtoa eli kompensoitua verkkoa. Joissain paikoissa joudutaan käyttämään maasta erotettua nollajohtoa, koska ei saada riittävää maadoitusta aikaiseksi. Maadoituskäämi estää valokaaren syntymisen ja tekee maasulusta hallittavamman ja helpommin tunnistettavan. Maasta eristetty nollajohdin aiheuttaa maasulun aikana pienen vikavirran, ja sitä saadaan vielä pienemmäksi kytkemällä maan ja nollan väliin sopiva vastus. Maadoitettu nollajohto aiheuttaa maasulun aikana vikavirran jatkuvaa dynaamista vaihtelua. (Earth fault in compensated networks.)

Yksi yleinen maasulun aiheuttaja on, kun puun oksa osuu vaihejohtimeen. Puun aiheuttama vikaresistanssi on tyypillisesti kesäisin 15–200 kilo-ohmia. Talvella lumen peittämän puun aikaansaama vikaresistanssi on vielä suurempi, muutamiiin megaohmeihin asti. Näin suurien vikaresistanssien maasulut ovat perinteisten suojarleiden asetteluarvojen ulkopuolella. (Nikander & Järventausta 2017.)

4 Vian tunnistamisen keinoja ja algoritmeja

Maasulkujen tehokkaampaan ja luotettavampaan tunnistamiseen mitatuista jännite- ja virtanäytearvoista voidaan käyttää erilaisia algoritmeja. Tavoitteena on tunnistaa pieniä vikavirtoja, jotka syntyvät suuresta vikaimpedanssista.

Vikavirtoja aiheuttavien maasulkujen sijainti halutaan saada selville mahdollisimman tarkasti ja nopeasti. Tämä edellyttää jatkuvaa näytteiden ottoa useista eri kohdista sähköverkkoa. Niiden avulla voidaan esimerkiksi todeta, jos verkossa on lisääntynyt epälineaarinen kuorma tai vaiheiden yhteenlaskettu nollavirta muuttuu nopeasti. Kerättyä mittaustietoa voidaan vertailla keskenään tarkkuuden parantamiseksi.

Kuvan 4 esittämä virheprosentti kertoo, kuinka monta väärää hälytystä algoritmi antaa. Matalammilla näytteenottotaajuuksilla algoritmi voi antaa hälytyksen viasta, vaikka vikaa ei olisi. Tällöin voidaan vahingossa tulkita normaalista käytöstä johtuvat suureiden muutokset vioiksi.

Sampling Frequency (kHz)	Required Time (ms)		Error (%)
	Max	Average	
1	11	9.5	2.1
2	5.6	4.9	1.15
5	2.3	1.9	0.98
10	1.09	0.94	0.75

Kuva 4. Näytteenottotaajuuden vaikutus vikojen havaitsemisen virheprosenttiin 1–10 kHz (Payam & Samet 2021.).

Yhden kHz:n näytteenottotaajuus on virheprosentin kannalta riittävä, mutta algoritmin nopeus eli vian havaitsemisaika ei ole riittävä. Kun näytteenottotaajuus nostetaan arvoon 2 kHz, on havaitsemisaika alle 5 ms, joka on riittävä. Virheprosentti on silloin noin 1,15 %. (Payam & Samet 2021.)

Vikojen havaitseminen parantuu, kun näytteenottotaajuutta nostetaan. Mitä korkeampi taajuus on, sitä enemmän tarvitaan vian havaitsemislaitteistolle virtalähteeltä tehoja. Algoritmien laskeminen suuremmalla näytteenotolla vaatii myös enemmän laskentatehoa. On kuitenkin olemassa taso, jossa vikojen tunnistamisen tarkkuus ei enää merkittävästi parane. (Payam & Samet 2021.)

4.1 Perinteiset vikasuojat

Perinteisesti sähköjakeluverkoissa vikasuojat eli suojarleet ovat sähköasemilla muuntajien kanssa ja muuntamoissa. Maa- tai oikosulkuvian syntyessä vikavirta on usein niin suuri, että perinteisten vikasuojien asetteluarvot riittävät niiden havaitsemiseen. Sähköasemilla ja muuntamoilla sijaitsee mittamuuntaja eli virtamuuntaja, joka muuntaa verkossa kulkevan virran mittaukseen sopivaan suuruuteen. Suojarele seuraa mittamuuntajien kautta virran suuruutta. Suojareleillä on asetteluarvot, joiden ylittyessä ne laukeavat ja katkaisijat erottavat verkosta vikaantuneen osan. Eri tyyppisille vioille on erilaisia asetteluarvoja suojarleellä. Todella vanhoissa sähköasemissa voi olla erilliset releet ylivirrälle ja oikosululle. 2000-luvun puolella rakennetuissa sähköasemissa on yleensä käytössä yksi suojarle yhdelle johtolähdölle.

Suojareleessä on useita asetteluarvoja eri suojauksiin. Asetteluarvojen suuruuksiin vaikuttavat suurimmat ja pienimmät vikavirtatasot, komponenttien virtakesoisuudet ja lähdön suurimmat kuormitusvirrat. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Tällä periaatteella toimii suojarleen ylivirtasuojaus, jolla on myös havahtumisaika. Se määrittää, kuinka pitkän ajan jälkeen hälytys palautuu normaaliin tilaan. Ylivirtareleitä on erilaisia riippuen verkon rakenteesta. Kaikki ylivirtasuojaukset eivät tunnista vikavirran suuntaa, eli ne eivät ole suunnattuja. Ne eivät sovi silmukoituun verkkoon, jossa vikavirran havaitsemisessa täytyy huomioida sen suunta. Suunnan havaitseva ylivirtasuojaus eli suunnattu ylivirtasuojaus tarkastelee virran ja jännitteen vaihe-eroa. Tällöin se toimii myös silmukoidussa verkossa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Distanssirelesuojausta käytettäessä voidaan tunnistaa maasulut vähintään 20 ohmiin asti. Se ei riitä Suomessa, koska on pystyttävä tunnistamaan maasulku vähintään 500 ohmiin asti. (Elovaara & Haarla 2011a.)

Differentiaalirele laskee mittamuuntajille tulevien ja lähtevien virtojen summan. Se suojaa mittamuuntajien välissä olevan verkonosan. Differentiaalirele havahtuu 30 ms:n ajassa vian havaitsemisen jälkeen.

Nollavirtarele mittaa sähköaseman muuntajan toisista vaihevirtojen summaa. Nollavirtareleitä on suunnattuja ja suuntaamattomia.

Avojohtoilla keskijänniteverkossa tehdään automaattisesti toimivia jälleenkytkentöjä. Salaman isku avojohdolle on yleinen vian aiheuttaja, ja sen aiheuttama vika voidaan saada palautettua jälleenkytkentöjä tekevällä automatiikalla. Automaatiikka toimii niin, että se pitää vikapaikan jännitteettömänä tarpeeksi pitkään, jotta valokaari ehtii sammua ja ilman jännitelujuus on riittävä vikapaikassa. Jännitelujuuden palautuessa voidaan johdon sähkönsyöttö jälleenkytkä. Valokaaren aiheuttaman ilman ionisoitumisen takia jännitelujuus ei heti palaudu riittävä tasolle. (Elovaara & Haarla 2011b.)

Verkon suojauksella voidaan välttää mahdollinen viasta aiheutuva vahinko ihmisille, eläimille ja laitteistoille. Maasulku voi aiheuttaa vaarallisen jännitteen vikapaikan ympäristöön, jos maan ominaisvastus on pieni. Lähellä olevilla sähköasemilla voi jännitteen potentiaali kasvaa vaarallisen suureksi.

4.2 Älymuuntamon relesuojat

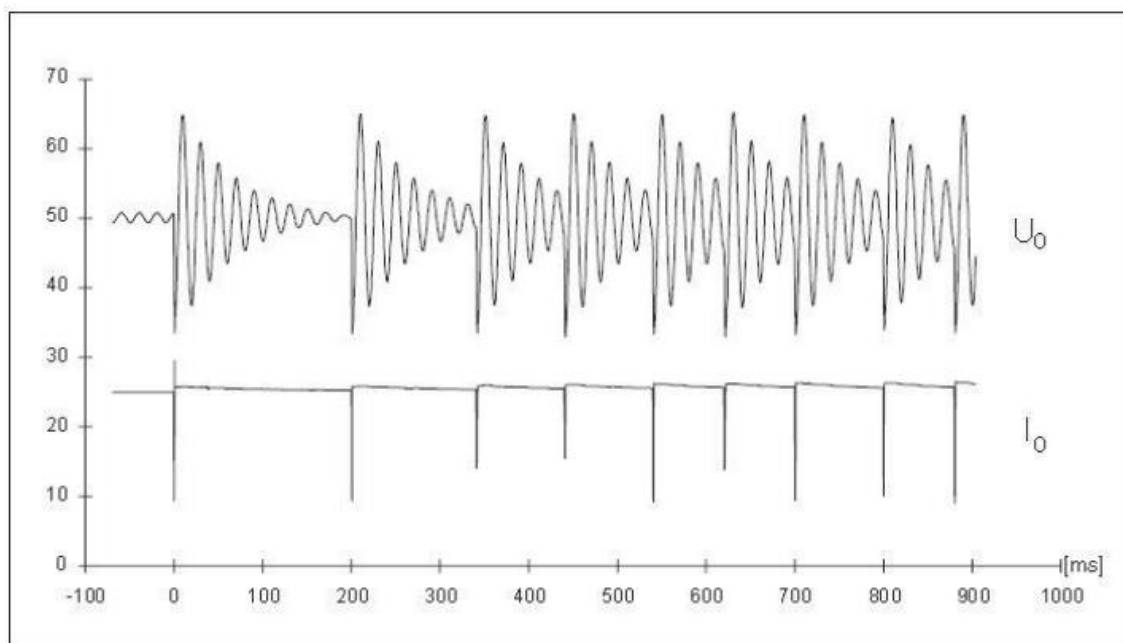
Perinteiset relesuojat on korvattu älymuuntamon johdonsuojilla, joissa on erilaisia asetteluarvoja eri tyyppisille vioille. Eri asetteluarvoja voi tarkastella relekoestuspöytäkirjasta. Sähkökatkojen määrää ja pituutta pyritään aina pienentämään. Se vaatii tarkempaa ja nopeampaa jakeluverkon vikojen tunnistamista ja korjaamista. Automaatio sähköasemilla auttaa näissä haasteissa. Älymuuntamo voidaan seurata ja ohjata etäkäyttönä. Siellä on automaatiolla toimivia johdonsuojia yhden suojalaitteiston sisällä. Tämä helpottaa vikojen ennakoinnissa ja sähköaseman tilan seurannassa huomattavasti. Älymuuntamon rakenne ja kojeet voidaan tehdä tarpeen mukaisesti. Keskijännitekojeistoja saa eri kokoonpanoilla.

Tutkitaan erään älymuuntamon relekoestuspöytäkirja. Siitä nähdään, minkälaisia raja-arvoja ja suojia 20 kV:n johtolähdöllä on. Ylivirtasuojia on asetettu laukaisemaan erottimen auki, jos vaiheilla kulkevan virran arvo on suurempi kuin

120 A. Aikaa vian ilmenemisestä suojan toimintaan menee 0,2 s. Vaihekatko-suoja on asetettu hälyttämään, kun kahden vaiheen välinen virtojen ero on yli 20 %. Tällainen tilanne voi syntyä, jos yhdelle vaiheelle on tullut maasulku tai salama on iskenyt vaiheeseen. Havahtumisaika on 2 s. (Jurvanen 2022.)

Suunnattu maasulkusuoja havaitsee yhteen suuntaan verkolla kulkevan vikavirran. Nollajännitteen täytyy olla suurempi kuin 2200 V ja vikavirran täytyy olla suurempi kuin 2 A, jotta suojaus havahtuu. Nollajännitettä esiintyy myös normaalitilassa sammutetussa verkossa, joten sen asettelu on suurehko 11 % nimellisjännitteestä. Näillä asetteluarvoilla ei aina pystytä havaitsemaan korkean impedanssin vikoja, sillä korkean impedanssin vika pystyy aiheuttamaan pienemmän kuin 2 A:n vikavirran. (Jurvanen 2022.)

Katkeileva maasulku voidaan tunnistaa summavirran ja nollajännitteen avulla. Kuva 5 esittää, kuinka katkeileva maasulku saa aikaan selkeästi havaittavia muutoksia nollajännitteessä.



Kuva 5. Maasulkuvirran ja nollajännitteen kuvaajat katkeilevan maasulun aikana (ABB TTT-käsikirja 2000).

Katkeileva maasulku on maakaapeliverkossa yleisempi vika. Sen voi aiheuttaa kaapelin vikaantunut eriste. Lämpilyönnit ovat hetkittäisiä, ja se aiheuttaa vikavirran katkeilevan laadun. Se aiheuttaa myös yliaaltoja ja transienttijännitteitä eli nopeita suureen muutoksia. ABB on kehittänyt tämän tyyppiin vikatilanteisiin monitaajuusadmittanssisuojan. Suojaus havaitsee nolajännitteen ja maasulkuvirran välisen kulman, josta vika havaitaan. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

4.3 Algoritmit ja tiedon keräys

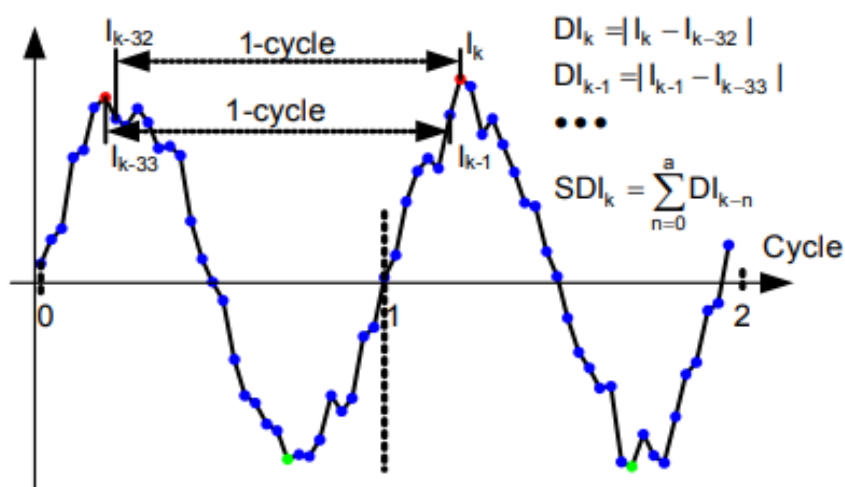
Uudenlaisissa vikasuojissa voidaan käyttää hyväksi langatonta tiedonsiirtoa johdoilla sijaitsevilta antureilta. Näitä voidaan kutsua vikaindikaattoreiksi. Niiden mittaamia näytteitä voidaan soveltaa erilaisilla algoritmeilla jotta vikoja voidaan havaita tarkasti. Vian paikantaminen onnistuu parhaiten, jos vikaindikaattoreita on tasaisin välimatkoin johdoilla ja sähköverkossa. Ne pystyisivät keskustelemaan keskenään langattomasti. Algoritmit ovat digitaalisilla laitteilla, joita voidaan ohjata etäkäyttönä. Tietotekniikan kehittyessä algoritmien käyttäminen vikasuojassa on kannattavampaa. Tiedon prosessointi ja tallentaminen on parantunut paljon niistä ajoista, kun perinteiset vikavirtasuojat on kehitetty. Nykyisen teknologian avulla voidaan parantaa viantunnistamista ja tarkkuutta. Mittaustietoja voidaan tallentaa palvelimille. Niitä voidaan käyttää myöhemmin apuna vikojen tutkimisessa ja laskemisessa.

4.3.1 SDI

Virtojen erojen summan (Sum of Difference Current, SDI) laskemalla saadaan tietoa sähköjohdolla olevista vioista, jotka yleensä muuttavat virran sinimuotoa eli kuormittavat verkkoa epälineaarisesti. Sen arvioimiseen käytetään virtamuuntajan tyyppisten antureiden mittaustietoja. Ne mittaavat johdolla kulkevaa virtaa johdon sähkömagneettisen kentän muutoksesta jokaisesta vaiheesta. (Hou 2007.)

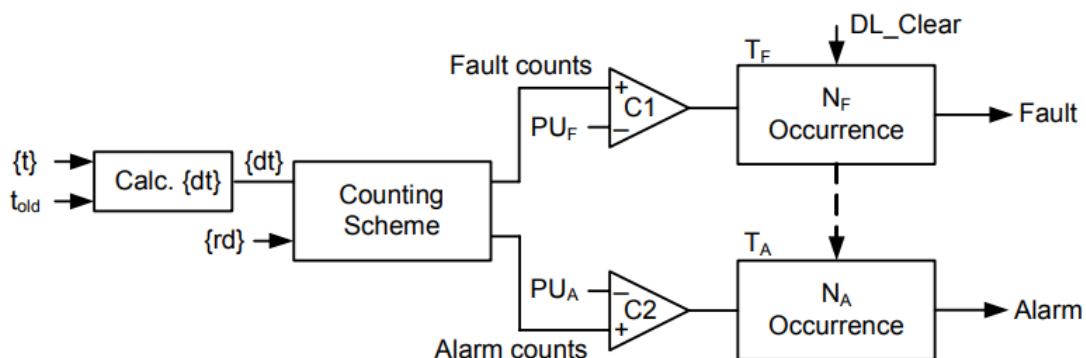
Kuva 6 esittää, kuinka vaiheiden virrasta otetaan 32 virta-arvon näytettä yhden jakson aikana. Sen jälkeen vertaillaan näytteiden eroja vaihtovirran jaksojen

välillä. Virran eroista saadaan arvioitua virtojen erojen summan määrä johdolla. Erityisesti virtojen erojen summa kertoo, paljonko epäharmonista komponenttia johdolla kulkee. Korkean impedanssin vika tuottaa usein epäharmonisia komponentteja. Ideaalitalanteessa vertailtavien mittausnäytteiden välinen ero on nolla. Silloin virran muoto on täydellisen siniaallon muotoinen. (Hou 2007.)



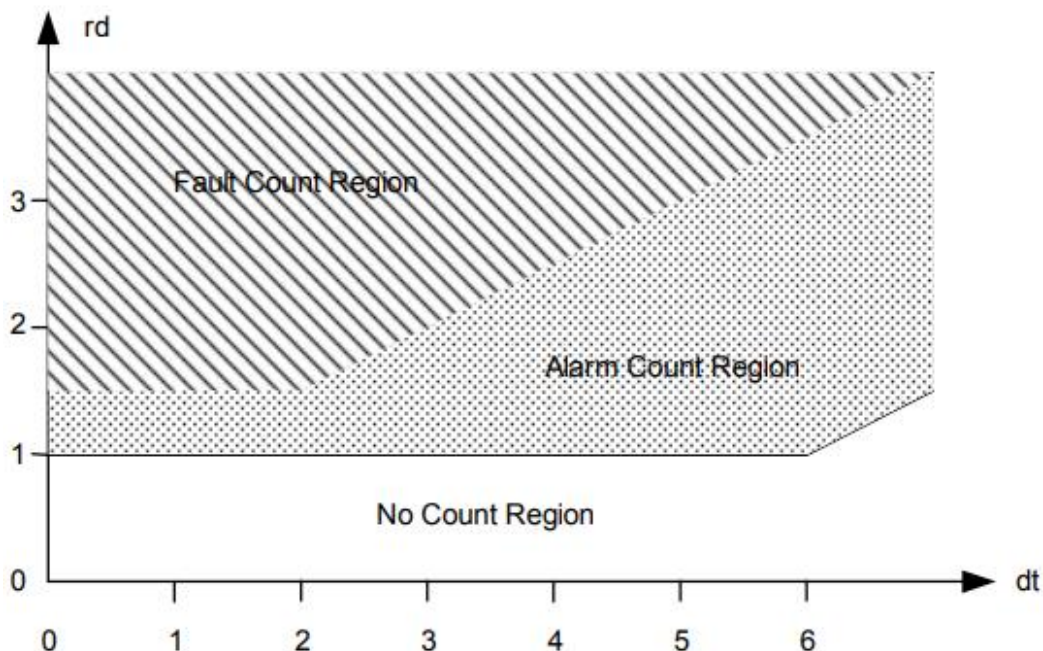
Kuva 6. Mittausnäytteitä vertaillaan sinikäyrän jaksojen välillä ja lasketaan poikkeamien suuruus (Hou 2007).

SDI-arvon määrä kasvaa korkean impedanssin vian vaikutuksesta, koska siinä on epälineaarista kuormaa. Arvoa on aina verrattava historiaan eli normaalitilanteen arvoon. Vertailu toimii kuvan 7 laatikkodiagrammin esittämän logiikan mukaan. Normaalitilanteen arvo lasketaan mittausnäytteistä ja siihen voidaan verrata vikatilanteen arvoja. Näin saadaan tunnistettua vika ja tehtyä hälytys suoja-laitteistoille. (Hou 2007.)



Kuva 7. Laatikodiagrammi algoritmin toiminnan rakenteesta (Hou 2007).

Algoritmi vertailee mittausnäytteitä referenssiarvoihin eli normaalitilanteen arvoihin. Jos vikavirran suuruus ja vikojen määrä ylittää kynnyksen, antaa algoritmi hälytyksen tai vian tulokseksi. Kuva 8 esittää alueen, jossa on syytä epäillä vikaa verkossa. (Hou 2007.)



Kuva 8. Sallitun arvon ylityskerrat suhteessa virtojen summien erojen arvoon (Hou 2007).

Mittausnäytteiden välinen suuri ero eli SDI arvon suuruus kertoo viasta, ja silloin algoritmi toteaa vian tapahtuneen ja tarvitaan toimenpiteitä vian lopettamiseksi. Jos eroja ilmaantuu usein, mutta SDI ei ole suuri, antaa algoritmi hälytyksen mahdollisesta viasta. Se ei kerro vielä varmasti vikatilannetta. (Hou 2007.)

4.3.2 MACI

MACI-luvun laskemiseen perustuva algoritmi toimii maasulkujen tunnistamisessa kaksisuuntaisesti. Se pystyy havaitsemaan kumpaankin suuntaan johdolla kulkevan vikavirran. Ensin arvioidaan mitatuista virtanäytteistä, onko johdolla kulkeva virta kasvanut nopeasti, mikä voi kertoa uudesta viasta johdolla. Mitattuja arvoja verrataan normaalitilan virran arvoihin eli referensseihin. Kaavalla lasketaan virtanäytteistä onko kyseessä vikavirta. (Payam & Samet 2021.)

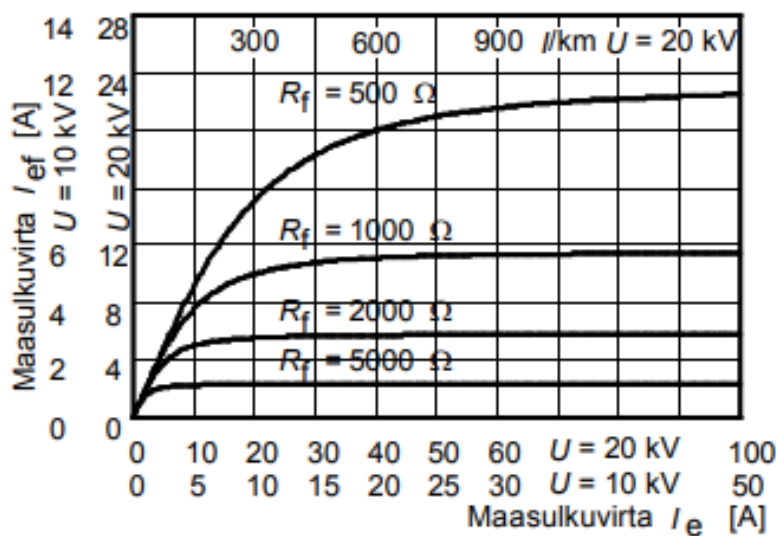
ACI-luku on ennen MACI-lukua laskettava arvo. ACI-luku lasketaan jokaisesta kerätyksestä virtanäytteestä. Se toimii ensimmäisenä suodattimena vikavirran havaitsemisen jälkeen. Algoritmi päättää ACI-luvun avulla lasketaanko MACI-lukua. (Payam & Samet 2021.)

MACI-luvun arvo vaihtelee $-1:n$ ja $1:n$ välillä. Kun se alittaa arvon $-0,25$ tai ylittää arvon $0,25$ viitenä peräkkäisenä jaksena, voidaan johto erottaa. (Payam & Samet 2021.)

4.4 Maasulkuvirta, summavirta ja nollajännite

Nollajännitettä syntyy usein silloin, kun verkko ei toimi normaalitilassa eli jossain kohtaa verkkoa on syntynyt vika. Nollajännite on nollan ja maan välinen jännite. Maasulku aiheuttaa sen, että terveidenkin vaiheiden jännite suhteessa maahan kasvaa. Nollajännite voi toimia vikojen havaitsemisessa asetteluarvona, josta arvioidaan vian paikka ja suuruus. Maasulussa osa virrasta kulkee vikapaikan kautta maahan, ja sitä kutsutaan maasulkuvirraksi.

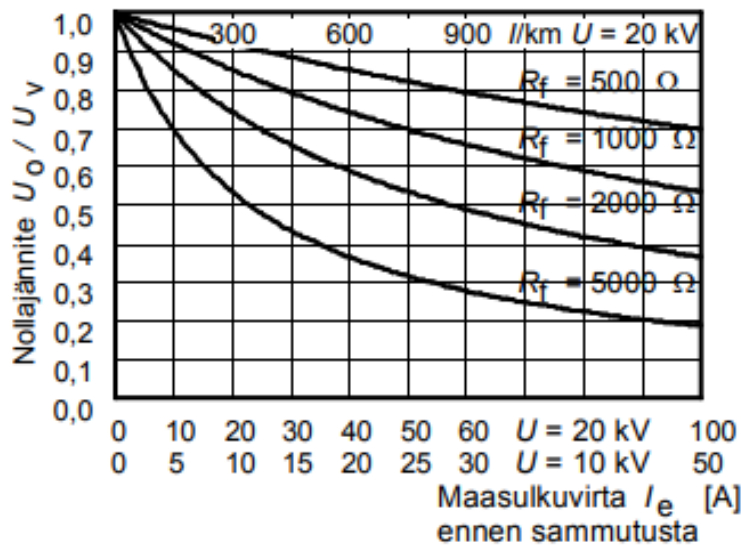
Sammutetussa verkossa esiintyy nollajännitettä myös verkon terveessä tilassa, mutta myös vian aikainen nollajännite on suurempi. Relesuojauksen asettelu-arvo täytyy asettaa suuremmaksi kuin maasta erotetussa verkossa. Kuvassa 9 esitetään maasulkuvirtojen mittaustuloksia eri vikaresistansseilla ja verkon pituuksilla. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)



Kuva 9. Maasulkuvirta pienenee, kun vikaresistanssi kasvaa (ABB:n TTT-käsikirja 2000).

Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa myös verkon pituus. Jos vikaresistanssi on yli 5000 ohmia, ei suunnatun maasulkusuojan asettelu-arvo enää havaitse

vikaa. Asetteluarvo perinteisellä suojareleellä on 2 A. Maasulkuvirran pienentyessä nollajännite kasvaa, kuten kuvassa 10 esitetään.



Kuva 10. Nollajännitteen suuruus eri vikaresistansseilla kompensoidussa verkossa (ABB:n TTT-käsikirja 2000).

Pienimmät nollajännitteen muutokset syntyvät, kun verkon osa on pitkä ja vikaresistanssi on korkea. Silloin maasulkuvirta on korkea. Kaksoismaasulku on tilanne, jossa kahdesta vaiheesta haarautuu maasulkuvirta. Siinä nollajännite on pienimmillään silloin, kun molempien viallisten vaiheiden vikaresistanssit ovat yhtä suuret. Kuvasta 10 nähdään, että vielä 5000 ohmin vikaresistanssilla nollajännite on lähes 20 % vaihejännitteestä, joka on tarpeeksi iso, jotta perinteisillä vikasuojilla voidaan maasulku havaita. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Summavirran mittaamiseen tarvitaan tietoa jokaisen keskijänniteverkon vaihevirran suuruudesta. Se voidaan toteuttaa vaihevirtamuuntajien summakytkenällä sähköasemalla muuntajan luona, kaapelivirtamuuntajien avulla tai vaiheita mittaavien sensoreiden avulla. Sensorit pystyvät mittaamaan summavirtaa ja nollajännitettä kaikkien vaiheiden mittausräyhteiden avulla.

Ihanteellisessa tilanteessa kolmen vaiheen virtojen summa on nolla, mutta jos verkossa on epäsymmetristä kuormaa, on summavirta suurempi kuin nolla.

Epäsymmetrisyyttä voi normaalisti toimivassa verkossa aiheuttaa se, että verkko on sammutettu. Verkkovika jossain vaiheessa tai vaiheiden välillä aiheuttaa myös epäsymmetristä kuormaa, ja vaiheissa kulkee toisistaan huomattavasti eroavia virtoja. Verkkoon syntyy silloin epäsymmetriaa, koska maasulkuvirta kuormittaa sitä epäsymmetrisesti. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Maasta erotetussa verkossa, riippumatta siitä missä kohtaa verkkoa maasulku syntyy aiheuttaa maasulku aina nollajännitteen verkkoon, mikä perinteisesti havaitsee ylijännitesuoja. Tällä tavoin pystytään parhaimmillaan toteamaan 600 km:n matkalle ulottuvassa verkossa 5000 ohmin vikaresistanssi. Ylijännitesuojan asetteluarvo on 5 % eli kun jännite on yli 5 % nimellisestä, relesuoja laukeaa ja antaa hälytyksen. (ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Suurin havaittava vikaresistanssi keskijänniteverkossa sähkömarkkinain (2023) mukaan on 500 ohmia. Käytännössä tarvitaan kuitenkin suurempienkin vikaresistanssien suojauksia, koska niistä aiheutuu haittaa ja vaarallisia kosketusjännitteitä verkon ympäristössä. (Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje.)

4.5 Vikaindikaattori pylväässä

Pylvääseen asennettavia vikaindikaattoreita on olemassa, mutta monet niistä ovat vielä kehitysvaiheessa. Kuva 11 esittää vikaindikaattorin anturin asentamista johtopylvääseen. Anturit lähettävät langattomasti tietoa näyttöiden mitaustuloksista. Vikaindikointilaitteistossa on yleensä anturit, jotka lähettävät dataa keskusyksikölle. Keskusyksikkö voi sijaita sähköasemalla, josta se on helpommin seurattavissa. Se voi tallentaa dataa pilvipalveluun, jossa se pysyy

pitkään tallennettuna. Yhteydet mahdollistavat etäkäytön vikojen ja verkon tilan seuraamiseen.



Kuva 11. Safe Gridin Grayhawk-indikaattorin anturin asennus pylvääseen.

Safe Grid on suomalainen yritys, joka kehittää tarkempaa ja nykyaikaisempaa vianindikointia sähköverkkoon. Safe Gridin Grid Guardian-vikaindikaattori tarjoaa kehittyneempää viantunnistusta keskijänniteverkkoon. Se perustuu datan keräämiseen anturien kautta langattomasti, jotka ovat asennettu pylvääseen. Anturien keräämä data siirtyy keskusyksikölle, jossa kerätty mittaustieto

käsitellään. Dataa voidaan myös tallentaa pilvipalveluun eli lähettää palvelimelle muistiin. Vian havaitsemiseen käytetään tietokoneen laskemia algoritmeja ja vertaillaan mittaustuloksia pilveen tallennettuihin tietoihin. Tiedon käsittelyssä käytetään tekoälyä ja koneoppimista. Niistä voidaan havaita vika, jos esimerkiksi samaan aikaan vuosi sitten virran laatu on ollut erilainen kuin mittauksen hetkellä. Siitä voidaan päätellä mahdollisia vikatilanteita. Tarkkuus riippuu algoritmeista ja kerätyn tiedon määrästä. Safe Gridin laitteistot ovat vielä monelta osin kehitys- ja testausvaiheessa. Niitä testaan käytännössä, jotta toimivuutta saadaan paremmaksi. (GridGuardian™: Cloud-Based Monitoring System.)

Safe Gridin monitorointilaitteisto on helppo asentaa olemassa olevaan sähköasemaan. Anturit asennetaan ympäri sähköverkkoa pylvääseen. Antureiden tilaa seurataan tietokoneen kautta. Vikapaikat saadaan käyttöliittymässä näkyväksi suoraan kartalla. Siitä on helppo ja nopea nähdä vikojen sijainti ja tyyppi. (GridGuardian™: Cloud-Based Monitoring System.)

Safe Grid on kehittänyt myös sähköasemalle asennettavan anturin. Jokaiselle vaiheelle asennetaan Rogowski kela ja sillä saadaan mittaustietoa virrasta. (GridGuardian™: Cloud-Based Monitoring System.)

4.6 Itsenäisesti toimiva vikaindikaattori johdolla

Johdolla toimivan vikaindikaattorin etuja on tarkempi vikapaikan kartoitus. Yksi isoimmista haasteista tulee siitä, kuinka vikaindikaattori saa käyttöjännitteen. Akku virtalähteenä olisi yksinkertainen valinta, mutta akun varauksen pitäisi kestää esimerkiksi kylmän talven yli.

Induktiokäämi indusoi sähköenergiaa keskijännitejohdolta vikaindikaattorille. Samalla sen avulla voidaan laskea ja arvioida, paljonko virtaa ja jännitettä keskijänniteverkossa on. Tämä tieto täytyy mitata latauskäämin jälkeen laitteistolla. Sen jälkeen se lähetetään langattomasti keskusyksikölle, joka tekee laskelmia

saadusta tiedosta. Nortrollin vikaindikaattori Linetroll (Line Indicators) on johdolle asennettava vikasuojalaitteisto, jota kuva 12 esittää.



Kuva 12. Linetroll-vikaindikaattori asennetaan avojohdon ympärille (Line Indicators).

Linetrollin anturin virtalähteenä toimii litiumionakku. Johdolle asennettava anturi-osa lähettää mittaustietoja eteenpäin langattomasti monitorointilaitteelle. Se taas voi lähettää hälytyksiä vioista eteenpäin SCADAn kautta olemassa oleville suojalaitteistoille. SCADA on yleisesti sähköverkossa käytössä oleva valvomo-ohjelmisto. SCADA on käytössä useissa sähkönjakelun laitteissa. Sen takia Nortrollin järjestelmän pystyy lisäämään vanhaan sähköverkkoon tukemaan vanhaa vikasuojausta. (Line Indicators.)

5 Pohdinta

Korkean impedanssin vikojen aikana vian indikointi perinteisillä vikasuojilla voi olla hankalaa. Nämä viat voivat aiheuttaa terveydellistä ja taloudellista haittaa. Vikasuojat ovat yleensä sähköasemilla, eli ne eivät voi kertoa kovin tarkasti itse vian sijaintia. Se olisi kuitenkin hyödyllistä sähköverkon huollon kannalta. Keski-jänniteverkossa voisi olla tarvetta paremmalle vikojen ennaltaehkäisylle ja paikantamiselle. Sähköverkkoyhtiöillä voi olla jopa velvollisuus parantaa vikojen havaitsemista, joka vaikuttaa sähkön toimitusvarmuuteen. Sähkömarkkinalaki (2023) kehottaa sähköyhtiöitä suojaamaan verkon korkean impedanssin vikoja vastaan niin hyvin kuin teknisesti on mahdollista ja järkevää.

Etenkin tietotekniikan kehitys mahdollistaa uudenlaisten vikaindikointitapojen käyttöä. Näillä voi parantaa vikojen havaitsemisen tarkkuutta, eli pystytään tunnistamaan todelliset vikatilanteet vääristä hälytyksistä.

Lähteet

ABB:n TTT-käsikirja. 2000. Helsinki: ABB Oy.

Earth fault in compensated networks. Verkkoaineisto. EGE, spol. s r.o. <<https://www.ege.cz/en/electrical-engineering-division/earth-fault-in-compensated-networks>>. Luettu 21.1.2023.

Elenia Säävarman verkon tarina. Verkkoaineisto. Elenia Oy. <<https://www.elenia.fi/palvelut/sahkoverkon-rakentaminen-ja-yllapito/elenia-saavarma>>. Luettu 21.4.2023.

Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011a. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011b. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto.

GridGuardian™: Cloud-Based Monitoring System. Verkkoaineisto. Safe Grid Oy. <<https://safegrid.io/products-gridguardian/>>. Luettu 6.4.2023.

Hou, Daqing. 2007. Detection of High Impedance Faults in Power Distribution Systems. E-aineisto. 6th Annual Clemson University Power Systems Conference. IEEE.

Jurvanen, Lauri. 2022. Yrityksen sisäinen dokumentti. Save LAN Oy.

Kagan, Nelson & Matsuo, Nelson. 2016. Computerized System for Detection of High Impedance Faults in MV Overhead Distribution Lines. E-aineisto. IEEE.

Keskeytystilasto. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/files/4972/Sahkon_keskeytystilasto_2019.pdf>. Luettu 10.1.2023.

Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2007. Sähköjälkelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

Line Indicators. Verkkoaineisto. Nortroll AS. <<https://www.nortroll.no/products/line-troll/>>. Luettu 5.4.2023.

Muuntamoratkaisut. Verkkoaineisto. ABB Oy. <<https://new.abb.com/medium-voltage/fi/muuntamoratkaisut/puistomuuntamot>>. Luettu 2.2.2023.

Nikander, Ari & Järventausta, Pertti. 2017. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. E-aineisto. IEEE.

Payam, Mohammad Sadegh & Samet, Haidar 2021. Fault direction identification utilizing new current-based index founded on rate of change of fault current. E-aineisto. IEEE.

SFS 6001. Suurjänniteasennukset. 2018. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Sähkömarkkinalaki. 2023. 9.8.2013/588.

Sähkötöimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf>. Luettu 14.1.2023.