

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Sähköenergiatekniikan laboratorio

Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet

A. Nikander, A. Mäkinen

Tampere 2017

Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojausasteet, yliaallot, vaarajännitteet

Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2017

Raportti / Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköenergiatekniikan laboratorio

ALKUSANAT

Tämä raportti esittelee Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähköenergiatekniikan laboratoriossa tehdyn selvityksen ”Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset” keskeisiä tuloksia. Päähuomio kohdistui suojaushaasteisiin, yliaaltoihin ja vaarajännitteisiin verkon maasulkutilanteissa. Tutkimus on tehty Sähkötutkimuspoolin ja TTY:n rahoituksella.

Hankkeen johtoryhmään kuuluivat:

Petri Hovila, ABB Oy, puheenjohtaja

Rauno Ristimäki, Caruna Oy

Timo Kiiski, R4 / Savon Voima Verkko Oy

Kimmo Kuisma, Porin Energia, KV11 ryhmittymä

Hanna-Mari Aalto, Elenia Oy

Sirpa Leino, Sähkötutkimuspoolin asiamies

Tutkimuksen toteutus:

Pertti Järventausta, hankkeen vastuullinen johtaja TTY:ssä

Ari Nikander, hankkeen projektipäällikkö TTY:ssä

Antti Mäkinen, TTY

Tampereella 2017

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat.....	i
Sisällysluettelo.....	ii
1. Johdanto ja tutkimusongelman kuvaus.....	1
1.1 Tavoite.....	3
2. Laajan kaapeliverkon mallintaminen.....	4
2.1 Laajan kaapeliverkon erityispiirteet.....	4
2.2 Perinteinen maasulkuanalyysi ja sen perusoletukset.....	5
2.3 Maasulkuvirran pätökomponentti.....	8
2.3.1 Kaapelin nollaimpedanssi.....	9
2.4 Verkon mallintaminen vikavirran yliaaltojen arvioimiseksi.....	10
2.4.1 Maasulkuvirran harmoninen yliaaltovirtakomponentti.....	12
2.5 Kosketusjännitevaatimukset.....	13
2.5.1 Harmonisen maasulkuvirran synnyttämä kosketusjännite.....	15
2.5.2 Jäännösmaasulkuvirran aiheuttaman maadoitusjännitteen arviointi.....	16
3. Kaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin vaikutus maasulkusuojaukseen.....	17
3.1 Nollajännitteen ja summavirtojen jälkivärähtelyilmiöt.....	17
3.1.1 Maasulun poistumiseen liittyvät jännitetransientit.....	17
3.1.2 Pelkästään hajautetusti kompensoitu verkko.....	20
3.1.3 Keskitetty kompensointi.....	20
3.1.4 Keskitetty ja hajautettu kompensointi.....	20
3.1.5 Esimerkkejä jännitetransienteista maasulun poistuttua.....	21
3.2 Maasulkuilmiöiden simulointi.....	23
3.2.1 PSCAD mallin määrittely.....	24
3.2.2 Esimerkkejä suojauksen toiminnasta.....	25
3.2.3 Pitkien kaapelilähtöjen vaikutus vikavirran pätökomponenttiin.....	27
3.2.4 Johtopäätöksiä esimerkkitarkasteluista.....	29
4. Vikavirran yliaaltojen arviointi ja vaikutukset.....	30
5. Yhteenveto.....	38
6. Lähdeluettelo.....	40
Liite 1: Maadoitusmittausaineisto.....	41

1. JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS

Yhteiskunta on entistä enemmän riippuvainen häiriöttömästä sähkönjakelusta. Keskeytyshaittoja koskevien selvitysten mukaan jo lyhyistäkin sähkökatkoista seuraa taloudellista haittaa eri sähkönkäyttäjien ryhmille. Keskeytykset heikentävät myös sähkön toimituksen laatua. Sekä pidemmät että lyhyet keskeytykset ovat mukana myös viranomaisen verkkoyhtiöiden tehokkuuden arviointiin käyttämässä valvontamallissa. Siksi asiakkaiden lisäksi keskeytyksillä on taloudellinen merkitys myös verkkoyhtiöille. Vuonna 2013 voimaan astunut Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkkoyhtiöt parantamaan sähkön jakelun toimitusvarmuutta merkittävästi. Edellä mainituista syistä monet sähköyhtiöt ovat alkaneet pyrkiä verkkoon, joka on suojassa säään vaikutuksilta. Säävarma verkko edellyttää keskijänniteverkkojen laajamittaista kaapelointia.

Keskijänniteverkkojen rakenne ja ominaisuudet muuttuvat, kun maakaapeleita asennetaan yhä enemmän myös laajoihin haja-asutusalueiden verkkoihin taajamien ulkopuolella, missä sähkönjakelu on perinteisesti hoidettu ilmajohdoilla. Kaapeloinnin seurauksena verkkojen kapasitiiviset maasulkuvirratt kasvat nopeasti. Kaapelointiasteen kasvaessa kosketusjännitevaatimusten täyttäminen edellyttää yleensä maasulkuvirran kompensointia. Pitkillä kaapelilähdöillä saatetaan tarvita myös hajautettua kompensointia. Verkkojen loistehon tuotanto kasvaa ja siksi myös loistehoa saatetaan joutua kompensoimaan reaktoreilla. Kaapeliverkossa vikojen määrä on huomattavasti pienempi kuin vastaavassa avojohtoverkossa. Maasulku on yleisin vikatyyppe. Myös keskijänniteverkon vikatyypit muuttuvat kaapeloinnin myötä. Kaapeliverkoille tyypilliset katkeilevat maasulut, joissa vikavalokaari syttyy ja sammuu toistuvasti, yleistyvät.

Haja-asutusalueiden kaapeloiduissa verkoissa on havaittu harmillisia sympatialaukaisuja, joissa terve lähtö laukeaa maasulkutilanteessa tarpeettomasti pois. Sympatialaukaisuja on tyypillisesti esiintynyt verkoissa, joissa käytetään hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Hajautetun kompensoinnin seurauksena maasulkutilanteessa myös terveellä lähdöllä saattaa esiintyä vikavirtoja, joiden taajuus poikkeaa perustaaajuudesta. Nämä perustaaajuudesta poikkeavat maasulkuilmiöt voivat aiheuttaa virheellisiä laukaisuja, mikäli niiden olemassaoloa ei ole otettu huomioon suojauksen suunnittelussa, kun verkon rakenne ja kompensointitapa muuttuu.

Perustaaajuudesta poikkeava nollajännitteen jälkivärähtely aiheuttaa lähdöille lähinnä sen nolla-admittanssiin verrannollisen summavirran, jonka seurauksena terve lähtö saattaa laueta verkosta. Näiden turhien keskeytysten välttämiseksi tulisi tuntea jälkivärähtelyiden syntymekanismi sekä tekijät, joilla värähtelyihin voidaan vaikuttaa. Nollajännitteen jälkivärähtelyjä esiintyy

myös katkeilevien maasulkujen yhteydessä. Tällöin niiden kesto riippuu myös vian katkeilu-taajuudesta.

Kun laaja avojohtoverkko kaapeloidaan joko kokonaan tai osittain, syntyy yleensä pitkiä kaa-peloituja lähtöjä tai sekalähtöjä, jotka poikkeavat sähköisiltä ominaisuuksiltaan avojohtoläh-döstä tai taajaman lyhyemmästä kaapelilähdöstä. Lähdön ja koko verkon maasulussa tuottama varausvirta kasvaa voimakkaasti. Varausvirta on kapasitiivista suhteessa verkon nollajännitteen. Varausvirran siirtyminen maasulkutilanteessa pitkän maakaapelin nollaimpedanssin läpi aiheuttaa myös vikavirtakomponentin, joka on saman vaiheinen nollajännitteen kanssa. Tämä pätövirtakomponentti on merkityksellinen seuraavista syistä:

- Jäännösvikavirran pätökomponenttia ei voida kompensoida Petersenin kelalla, joten sen vaikutus maadoitusjännitteeseen tulisi pystyä huomioimaan.
- Sammutetun verkon maasulkusuojaus perustuu yleensä vikavirran pätökomponentin ja sen suunnan määrittämiseen.
- Koska asennettujen maakaapeleiden nollaimpedansseja ei tunneta taulukkoarvoina, kaapeleissa maasulun aikana kulkevia pätövirtakomponentteja ei voida määrittää las-kennallisesti hyvällä tarkkuudella.

Verkon kapasitiivinen 50 Hz maasulkuvirta voidaan kompensoida tehokkaasti sammutuskuris-timilla. Jäljelle jäävään vikakohtaan jäännösvikavirtaan vaikuttavat

- kuristimien 50 Hz vinovirityksestä riippuva reaktiivinen jäännösvirta,
- 50 Hz pätövirtakomponentti ja
- yli 50 Hz taajuiset yliaaltovirrat.

Verkon eri yliaaltolähteiden vikakohtaan synnyttämien yliaaltovirtojen suhteellinen osuus jään-nösmaasulkuvirrasta kasvaa, kun perustaaajuinen maasulkuvirta kompensoidaan hyvin pieneksi. Yliaaltovirrat aiheuttavat säröä keskijänniteverkon jännitteisiin. Keskijänniteverkon jännittei-siin säröä voivat aiheuttaa mm.

- syöttävän, tyypillisesti 110 kV jännitetason jännitteen yliaallot,
- verkkoon liitetyt epälineaariset kuormitukset mm.
 - tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, teholähteet, taajuusmuuttajat,
 - yleisesti elektroniikkalaitteet (televisiot, tietokoneet ...),
 - hitsauslaitteet ja valokaariunit,
 - aurinkosähköjärjestelmät,
 - loistelamput ja led valaistus (liitäntälaitteet), purkauslamput,
 - tuulimyllyt ja -puistot,
- mahdolliset resonanssiipiirit sekä
- rautasydämisten verkkokomponenttien epälinearisuudet.

Turvallisuuden kannalta vikavirtojen aiheuttamat vaarajännitteet eivät saa aiheuttaa vaaraa. Turvallisuutta voidaan lisätä rajoittamalla vikavirtoja, parantamalla maadoitusjärjestelmiä, lyhentämällä vikojen vaikutusaikoja sekä standardissa SFS 6001 esitetyillä erityistoimenpiteillä [1].

Yliaaltojen osalta standardissa SFS 6001 mainitaan seuraavaa: ”Mm. teollisuusasennuksissa tulee kiinnittää huomiota virtojen ja jännitteiden harmonisiin yliaaltoihin. Tarvittaessa yliaallot on analysoitava sen selvittämiseksi, mitkä toimenpiteet ovat tarpeen paikallisten määräysten noudattamiseksi ja/tai miten koko sähköjärjestelmän virheetön toiminta varmistetaan”. Lisätietoja on esitetty standardissa SFS-EN 50160 [1], [2]. Vaarajännitteiden kannalta maasulkutarkastelut ovat keskittyneet perinteisesti 50 Hz perustaajuisiin suureisiin. Yliaaltotaajuisia maasulkuvirtakomponentteja ja niiden vaikutuksia ei liene Suomessa juurikaan selvitetty. Jäännösmaasulkuvirran harmonisia komponentteja on tarkasteltu muualla mm. seuraavissa kansainvälisissä viitteissä [3], [4] ja [5].

1.1 Tavoite

Tutkimus rajattiin koskemaan sammutetun, osittain tai kokonaan kaapeloidun keskijänniteverkon ilmiöitä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten maakaapelointi ja hajautettu kompensointi vaikuttavat maasulun yhteydessä esiintyviin ilmiöihin ja suureisiin, joita käytetään suojausten toteutuksessa. Tutkimuksessa arvioitiin maakaapelin nollaimpedanssin merkitystä vikavirran pätökomponentin suuruuden kannalta esimerkkitapauksissa sekä selvitettiin nollajännitteen jälkivärähtelyn taajuuteen ja vaimenemiseen vaikuttavat tekijät verkon suojaus huomioiden. Vikavirran pätökomponentin merkityksen tarkempi arviointi edellyttäisi laajempia kenttämittauksia sekä mallien verifiointia mittaustulosten avulla. Siksi tämän tutkimuksen tarkastelut ovat esimerkinomaisia valottaen lähinnä ilmiöiden syntymekanismia ja niitä tekijöitä, joilla ilmiöihin voidaan vaikuttaa.

Tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää keskijänniteverkon harmonisten yliaaltojen vaikutuksia yksivaiheisen maasulun aikana vikavirtaan ja maadoitusjännitteisiin. Tässä selvityksessä keskityttiin lähinnä ulkoisten yliaaltolähteiden, kuten epälineaaristen kuormien yms. aiheuttamien harmonisten yliaaltojännitteiden vaikutukseen. Lopputuloksena esitettiin alustavat johtopäätökset siitä, miten harmonisen jäännösvikavirran suuruutta voitaisiin arvioida ns. pahimmissa tilanteissa. Vikakohdan harmoninen yliaaltojännite ennen vikaa on keskeinen suure harmonisen jäännösvikavirran kannalta. Koska verkoissa esiintyvistä harmonisten yliaaltojännitteiden suuruuksista ei ollut käytettävissä hyvin sovellettavaa mittausaineistoa, tämän tutkimuksen tarkastelut ovat lähinnä esimerkinomaisia. Siksi myöskään yliaaltojen laajempaa merkitystä kosketusjännitevaatimusten kannalta ei voitu arvioida.

2. LAAJAN KAAPELIVERKON MALLINTAMINEN

2.1 Laajan kaapeliverkon erityispiirteet

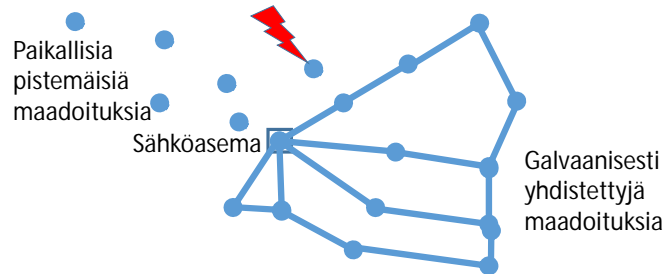
Haja-asutusalueen laajan, pääosin kaapeloidun keskijänniteverkon rakenteelle ominaisia piirteitä ovat:

- pitkät etäisyydet, paljon kaapelikilometrejä ja suuri kapasitiivinen maasulkuvirta
- säteittäinen verkon käyttötapa, pitkät lähtöpituudet ja vähän varasyöttöyhteyksiä
- pienehköt vaihejohtimien- ja kosketussuojien poikkipinnat
- pitkät kaapeliosuudet ilman maadoitusta
- pienehkö pätötehokuorma ja mahdollinen pätötehon tuotanto

Pitkistä etäisyyksistä johtuen kokonaan tai osittain kaapeloidun verkon kokonaismaasulkuvirta voi nousta suureksi, ollen tyypillisesti satoja ampeereita. Avojohtoverkon maadoitukset ovat yleensä pistemäisiä erillismaadoituksia, jolloin maadoitusimpedanssi voi olla suurehko riippuen paikallisista maadoitusolosuhteista. Kaapeliverkossa maadoitukset yhdistyvät kaapelin maadoitettujen osien, kuten kaapelien kosketussuojien sekä mahdollisten keskusköysien ja erillisten maadoitusjohtimien välityksellä. Maadoitusten ketjuuntuminen on yleistymässä, kun yhtiöt eivät kaapeloi enää pelkästään kaupunkien keskustoissa, vaan myös taajamissa ja haja-asutusalueella. Tilanne eroaa perinteisestä säteittäisen ilmajohtoverkon maadoitusrakenteesta. Muuntopiirien maadoitukset eivät ole pistemäisesti erillään toisistaan, kuten ilmajohtoverkossa, vaan niillä on galvaaninen kontakti toisiinsa maakaapeleiden suojajohtimien ja mahdollisten erillisten maadoitusjohtimien kautta [6].

Maadoitusjärjestelmä koostuu yleensä vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu tai lyöty maahan. Yhdessä kohdassa voi olla yhdistettynä galvaanisesti useita maadoituselektrodeja muodostaen paikallisen maadoitusjärjestelmän. Muuntamon keskijännitepuolen suojamaadoitus ja muuntopiirin pienjänniteverkon maadoitukset yhdistetään lähes aina. Kaapeliverkossa kaapelien kosketussuojat, mahdolliset kaapelien keskusköydet ja muut maadoitusjohtimet muodostavat galvaanisia yhteyksiä eri maadoitusten välille. Tällöin muodostuu ketjuuntuneita ja myös silmukoita sisältäviä verkkomaisia laajempia maadoitusjärjestelmiä. Standardin SFS 6001 mukaan laajat maadoitusjärjestelmät mahdollistavat maasulkuvirtojen jakautumisen siten, että paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalinen nousu pienenee [1], [6].

Pistemäisen maadoituksen muodostaa yksi maadoituselektrodi tai maadoituselektrodit, jotka ovat lyhyitä ja sijaitsevat lähellä toisiaan. Tällaisten paikallisten maadoitusten osalta vaarajännitevaatimusten täyttäminen on yleisesti haasteellisempaa kuin laajemmissa maadoitusjärjestelmissä. Liitteessä 1 referoidun maadoitusmittausaineiston mukaan yksittäisten kaapeli-liitäntäisten puistomuuntamoiden maadoitusarvot ovat tyypilliset olleet noin 10 – 20 W. Moninkertaisiakin lukemia on osin toki esiintynyt [6].



Kuva 2.1 Maadoitusjärjestelmän rakenne kaapeliverkossa, jossa on myös ilmajohto-osia.

Maadoitusimpedanssi määritetään ottaen huomioon suoraan kytketyt maadoituselektrodit ja myös maahan yhdistetyt ilmajohtojen ukkosjohtimet ja maadoitukset, maadoituselektrodeina toimivat maakaapelit ja muut maadoitusjärjestelmät, jotka kytkeytyvät asianomaiseen maadoitusjärjestelmään johtavien kaapelivaippojen, kosketussuojien ja PEN-johtimien välityksellä tai muulla tavalla [1].

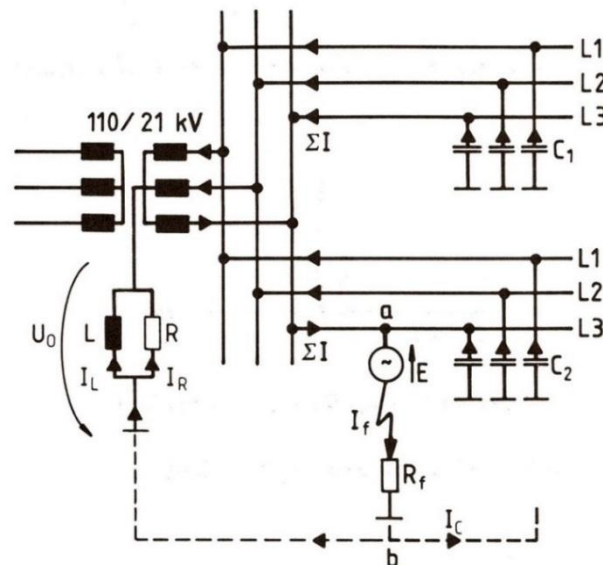
Ketjuuntuneiden maadoitusten kohdalla tilanne poikkeaa laajasta maadoitusverkosta, koska maadoitukset eivät muodosta verkkomaista usean reitin kautta yhdistynyttä rakennetta ja muuntopiirien välimatkat vaihtelevat tiheistä taajamaverkoista usean kilometrin etäisyyksiin haja-asutusalueella. Kaapeliverkon resultoivat maadoitusimpedanssit ovat selvästi pienempiä avojohtoverkon pistemäisiin maadoituksiin verrattuna. Kosketusjännitetarkasteluissa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että useimmiten verkkoon jää myös ilmajohto-osuuksia kaapeloinnin ollessa käynnissä ja sen jälkeenkin. Maadoitusjännitteet nousevat usein korkeammiksi juuri erillismaadoitukseen tapahtuvissa vioissa.

2.2 Perinteinen maasulkuanalyysi ja sen perusoletukset

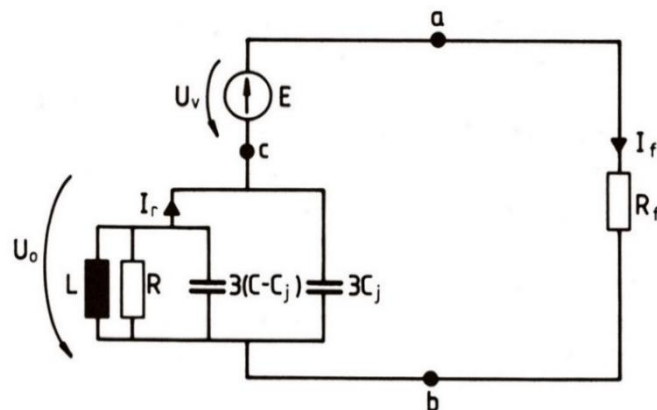
Perinteinen maasulkuanalyysi (50 Hz), jossa huomioidaan pelkästään nollaverkon poikittaiset impedanssit ja vikaresistanssi, soveltuu tyypillisesti sekä kaupunkien kaapeli- että haja-asutusalueiden ilmajohtoverkoille. Kaupunkien kaapeloidut verkot koostuvat tyypillisesti lukuisista johtopituudeltaan lyhyehköistä lähdöistä. Johdinpoikkipinnat ovat yleensä suurehkoja. Ilmajohtoverkoissa johdinrakenteiden maakapasitanssin edustama impedanssi on yleensä niin suuri, että johtojen pitkittäisillä impedansseilla ei ole merkittävää vaikutusta maasulkuvirtaan. Em. syistä näissä verkoissa voidaan tehdä seuraavat yksinkertaistavat oletukset, jotka pätevät kuvien 2.2 ja 2.3 sijaiskytkentöihin [7].

- Kunkin johtotyypin kokonaispituus ja kokonaismaakapasitanssi ovat määrävät tekijät vikavirran laskennassa.
 - Eri lähtöjen pituuksia tai lukumääriä ei tarvitse huomioida erikseen.
- Verkon tuottama maasulkuvirta on lähes puhtaasti kapasitiivista ja verrannollinen kokonaisjohtopituuksiin ja johto-osien maakapasitansseihin.
 - Maasulkuvirtaa voidaan kompensoida Petersenin kelalla.
- Maasulkuvirta ja nollajännite voidaan määrittää verkon maakapasitanssien, kompensointikelan reaktanssin, lisäkuormitusvastuksen resistanssin ja vikaresistanssin avulla.

Maasulkusuojauksen asetteluiden määrittäminen sammutetussa verkossa perustuu yleensä verkon maakapasitanssin, kompensointikelan reaktanssin, lisäkuormitusvastuksen resistanssin ja vikaresistanssin avulla laskettuihin maasulkusuureisiin. Asetteluissa otetaan huomioon myös maksimivikaresistanssi, jolla suojauksen halutaan vielä toimivan.



Kuva 2.2 Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa [7].



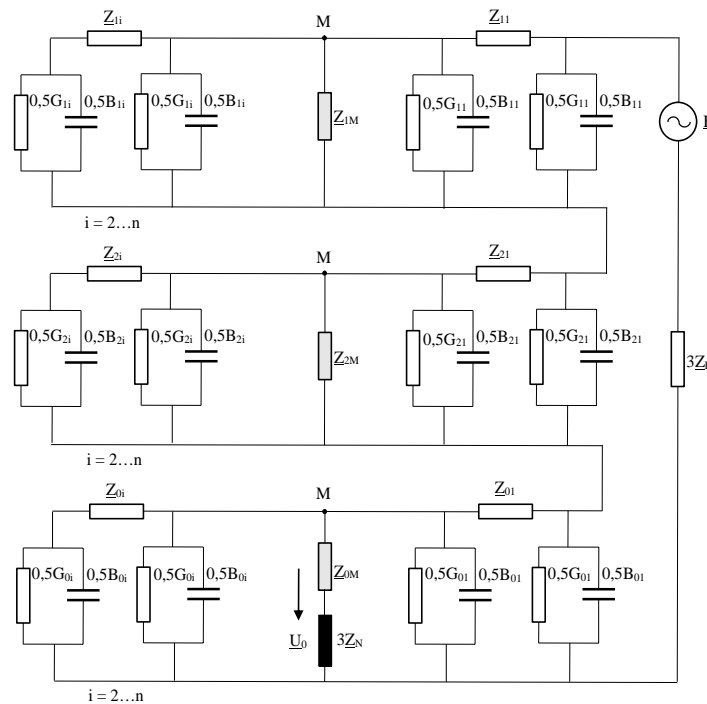
Kuva 2.3 Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä [7].

Edellä mainitut oletukset eivät ole kaikilta osin voimassa laajoissa haja-asutusalueen kaapeli-verkoissa. Kaupunkiverkoissa on yleensä paljon rinnakkaisia lyhyehköjä kaapelilähtöjä. Tällöin lyhyttä lähtöä kuvaava ρ -sijaiskytkentä muodostuu kahdesta suuresta maakapasitanssista

ja suhteellisen pienestä sarjanollaimpedanssista, jonka vaikutus maasulkuvirran kannalta voidaan olettaa merkityksettömäksi. Kun lyhyet lähdöt kytkeytyvät rinnakkain, sarjaimpedanssin ja maakapasitanssien edustamien impedanssien suhde ei merkittävästi muutu, joten sarjaimpedanssit voidaan jättää huomiotta myös koko verkon tarkastelussa.

Haja-asutusalueen kaapeliverkossa on tyypillisesti vähemmän lähtöjä, mutta lähtöjen johtopi-tuudet voivat olla suuria kaupunkiverkkoihin verrattuna. Tällöin pitkän kaapelilähdön voidaan ajatella muodostuvan usean lyhyttä johto-osaa kuvaavan ρ -sijaiskytkennän sarjakytkentänä. Kun lähdön pituus kasvaa, maakapasitanssien edustama impedanssi pienenee, mutta sarjaimpe-danssi kasvaa. Riittävän pitkällä kaapelilähdöllä sarjanollaimpedanssi ei ole välttämättä enää merkityksetön. Tämä on olennainen ero kaupunki- ja maaseutukaapeliverkkojen välillä.

Kuvassa 2.4 on esitetty yleisen maasulkuteorian mukainen symmetristen komponenttiverkko-jen kytkeytyminen keskijänniteverkon maasulussa. Lähdöt on mallinnettu ρ -sijaiskytkennän avulla. Piste M kuvaa sähköasemaa eli kohtaa, josta lähdöt lähtevät ja jossa ovat verkon mit-taukset. Impedanssit \underline{Z}_{1M} , \underline{Z}_{2M} ja \underline{Z}_{0M} ovat päämuuntajan myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit. Vika on lähdön 1 lopussa ja vikaimpedanssi on \underline{Z}_F . Alaindeksi i ($i = 2 \dots n$) kuvaa taustaverkkoa, jonka muodostaan $n-1$ kpl rinnan kytkeytyviä terveitä lähtöjä. G_{1i} , G_{2i} ja G_{0i} ovat lähdön i myötä-, vasta- ja nollakonduktanssit sekä B_{1i} , B_{2i} ja B_{0i} lähdön i myötä-, vasta- ja nollasuskep-tanssit vastaavasti. Impedanssit \underline{Z}_{1i} , \underline{Z}_{2i} ja \underline{Z}_{0i} ovat lähdön i pitkittäiset myötä-, vasta- ja nol-laimpedanssit. Impedanssi \underline{Z}_N edustaa tähtipisteen ja maan väliin kytkeytyvää impedanssia. Sammutetun verkon tapauksessa \underline{Z}_N on kompensointikelan ja lisäkuormitusvastuksen rinnan-kytkennän edustama impedanssi. Lähdejännite \underline{E} on vikakohdan jännite ennen vikaa.



Kuva 2.4 Esimerkki myötä-, vasta- ja nollaverkon kytkeytymisestä sammutetun keskijännite-verkon maasulussa.

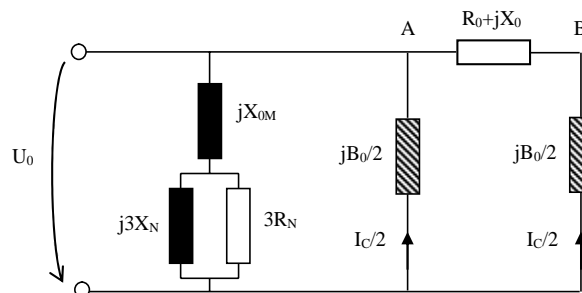
Maasulun vikavirta \underline{I}_F voidaan määrittää yleisesti Theveninin menetelmällä käyttämällä laskentajännitteenä ennen vikaa vikapaikassa vallinnutta jännitettä \underline{E} ja verkon kokonaisimpedanssia kaavan 2.1 mukaisesti. Komponenttiverkkojen kokonaisimpedanssit \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 ja \underline{Z}_0 kytkeytyvät maasulussa sarjaan.

$$\underline{I}_F = \frac{3\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_F} \quad (2.1)$$

2.3 Maasulkuvirran pätökomponentti

Pitkässä maakaapeloidussa lähdössä saattaa kulkea maasulussa kapasitiivisen varausvirran lisäksi myös pätövirtaa suhteessa nollajännitteeseen, kun nollajännitteen synnyttämä virta kulkee kaapelin nolлайmpedanssin läpi. Pätövirtakomponenttia ei voida kompensoida vikavirrasta maadoituskuristimen avulla. Kaupunkiverkoissa, joissa suuripoikkipintaiset lyhyehköt kaapelilähdöt kytkeytyvät rinnakkain, sarjanolлайmpedanssin merkitys on yleensä hyvin vähäinen.

Johdot on perinteisesti mallinnettu maasulkulaskennassa pelkkinä maakapasitansseina kuvien 2.2 ja 2.3 mukaisesti. Laajassa kaapeliverkossa lähtöjen suuret kapasitiiviset varausvirrat aikaansaavat jännitehäviöitä johtojen sarjaimpedansseissa. Kuvassa 2.5 on esitetty nolлайverkon yksinkertaistettu sijaiskytkentä, jossa kaapelin nolлайpiiri on kuvattu p-sijaiskytkennän avulla. X_{0M} on päämuuntajan nolлайreaktanssi, R_N on lisäkuormitusvastuksen resistanssi ja X_N sammutuskuristimen reaktanssi. Kaapelin maasuskeptanssi on B_0 . Kaapelin nolлайresistanssi ja -reaktanssi ovat R_0 ja X_0 vastaavasti.



Kuva 2.5 Nolлайverkon yksinkertaistettu sijaiskytkentä kaapeliverkossa.

Jos pitkän kaapelin nolлайpiiri ajatellaan p-sijaiskytkentänä, kaapelin alkupäähän sijoitetun maasuskeptanssin yli (piste A) vaikuttaa sama nolлайjännite kuin sijaiskytkennän navoissa. Sen sijaan kaapelin loppupäähän sijoitetun suskeptanssin yli (piste B) oleva jännite on eri suuri kuin kaapelin alkupään nolлайjännite. Tämä johtuu kaapelin pitkittäisessä nolлайmpedanssissa tapahtuvasta jännitehäviöstä, jonka varausvirta $I_c/2$ saa aikaan kulkiessaan nolлайmpedanssin läpi. Vikavirtaan generoituu kapasitiivisen varausvirran lisäksi myös pätövirtaa suhteessa nolлайjännitteeseen. Tyypillisesti resistanssi alkaa vaikuttaa kaapelin kokonaisnolлайmpedanssin vaihekulmaan merkittävästi vasta suurilla johtopituuksilla.

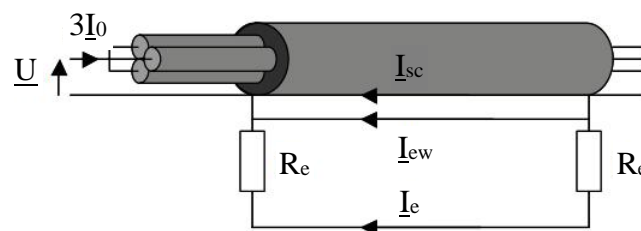
Todellisuudessa kaapelilähdön voidaan ajatella muodostuvan useiden p-sijaiskytkentöjen sarjakytkentänä. Myös lähdön konfiguraatio vaikuttaa pätökomponentin muodostumiseen, koska runkojohdon haarat, niiden pituus ja sijainti vaikuttavat runkojohdolla kulkevaan varausvirtaan. Vikavirran pätökomponenttia voidaan pienentää hajautetun kompensoinnin avulla sijoittamalla pienempiä kompensointiyksiköitä myös kaapelilähdön varrelle. Maasulkuvirran pätökomponenttia on tarkasteltu myöhemmin kohdassa 3.2.3.

2.3.1 Kaapelin nollaimpedanssi

Kaapelin nollaimpedanssiin vaikuttavat myös kapasitanssit, jotka tunnetaan kullekin kaapelityypille valmistajan taulukkoarvoina. Sen sijaan kaapeleiden sarjanollaimpedansseja ei tunneta johtovakioina. Sarjanollaimpedanssiin vaikuttavat mm. kaapelin johtimien poikkipinta, kosketussuojat ja niiden impedanssi, kaapelin osien geometriset mitat, kaapelin mahdollinen keskusköysi ja sen impedanssi, mahdollinen erillinen maadoitusjohdin ja sen impedanssi, maaperän johtavuus, kaapelin maadoitukset ja niiden maadoitusresistanssit. Siten kaapelin nollaimpedanssi riippuu paitsi kaapelin sähköisistä ominaisuuksista myös sen asennuksesta sekä asennus- ja maadoitusolosuhteista. Siksi kaapelille ei voida määrittää laskennallisesti yleispätevää nollaimpedanssia.

Kuvassa 2.6 tarkastellaan maasulkua vaihejohtimesta kaapelin maadoitettuun osaan, tyypillisesti kosketussuojaan. Tässä tapauksessa kolmella johtimella on yhteinen kosketussuoja, mutta jokaisella virtajohtimella voi olla myös oma kosketussuoja (esimerkiksi AHXAMK-W tyypin kaapelit). Virta I_{sc} on kosketussuojassa kulkeva virta, I_{ew} keskusköyden tai erillisen maadoitusjohtimen virta ja I_e on maassa kulkeva virta, johon vaikuttavat kaapelin päissä olevien maadoitusten resistanssit. Nollavirran paluupiirin muodostavat kosketussuojat, mahdollinen maadoitusköysi sekä maa. Kun kaapelin alkupäähän kytketään sama jännite kuhunkin vaihejohtimeen, vaihejohtimissa kulkevaa nollavirtaa I_0 rajoittaa kaapelin nollaimpedanssi Z_0 kaavan 2.2 mukaisesti. Nollaimpedanssi riippuu virtateiden itseis- ja keskinäisimpedansseista, joihin vaikuttavat kaapelin rakenne ja dimensiot sekä paluupiirien ominaisuudet.

$$\underline{Z}_0 = \frac{U}{I_0} = \frac{3U}{I_{sc} + I_{ew} + I_e} \quad (2.2)$$



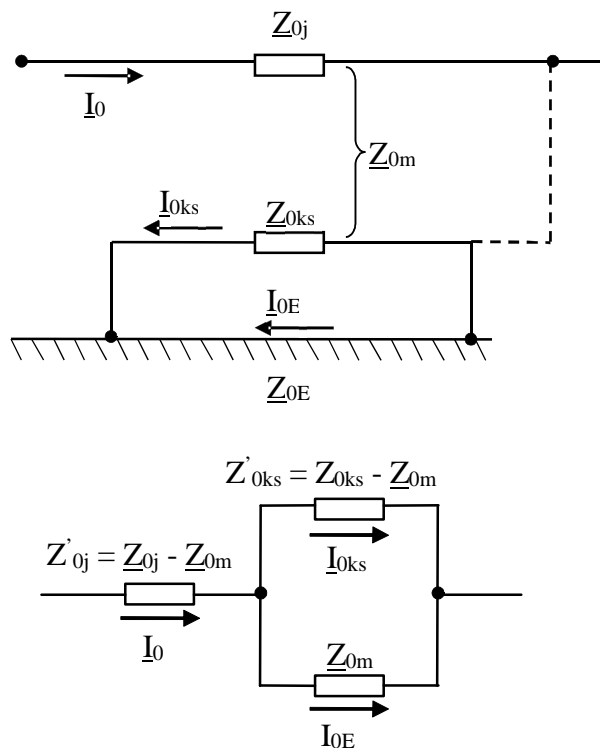
Kuva 2.6 Asennetun kolmivaihekaapelin nollapiirin muodostuminen [8].

Kaapelin vaihejohtimet ja paluupiirin johtimet muodostavat kolme virtapiiriä. Vaihejohtimet ja kosketussuoja, vaihejohtimet ja maadoitusjohdin sekä vaihejohtimet ja maa. Kyseiset virtapiirit sisältävät sekä itseis- että keskinäisimpedansseja. Siten nollaresistanssi ja nollareaktanssi ovat

3x3 matriiseja. Teoreettinen tarkastelu on esitetty tarkemmin mm. viitteissä [8] ja [9]. Viitteessä [9] on esitetty menetelmä, joka huomioi vaihejohtimien ja kosketussuojien keskinäisimpedanssin. Kaikilla vaihejohtimissa kulkevilla nollavirroilla täytyy olla paluuvirtapiiri. Menetelmä perustuu Carsonin yksinkertaistettujen yhtälöiden soveltamiseen. Menetelmän avulla voidaan erottaa kolme eri tapausta paluuvirran kulkureitin perusteella.

1. Kaikki paluuvirrat kulkevat pelkästään kosketussuojissa eikä maan kautta kulje virtaa.
2. Paluuvirrat kulkevat rinnakkain sekä kosketussuojissa että maassa.
3. Koko paluuvirta kulkee pelkästään maan kautta.

Menetelmän avulla voidaan määrittää vaihejohtimien impedanssi \underline{Z}_{0j} (paluupiirinä maa) ja kosketussuojien impedanssi \underline{Z}_{0ks} (paluupiirinä maa) sekä vaihejohtimien ja kosketussuojien keskinäisimpedanssi \underline{Z}_{0m} maan vaikutus huomioiden [9]. Kaapelin nollapiiri voidaan esittää kuvan 2.7 mukaisella sijaiskytkennällä. Kuvaan on piirretty katkoviivalla nollavirran galvaaninen reitti vaihejohtimista maadoitettuihin osiin.



Kuva 2.7 Nollaverkon ekvivalenttikytkentä [9].

2.4 Verkon mallintaminen vikavirran yliaaltojen arvioimiseksi

Kun laajassa haja-asutusalueen verkossa siirrytään ilmajohtoverkosta laajaan maakaapeliverkoon tai sekaverkkoon, verkon maakapasitanssien edustama nollaimpedanssi pienenee huomattavasti, mikä näkyy kapasitiivisen maasulkuvirran kasvuna. Jos ilmajohtoverkon 50 Hz kapasitiivinen maasulkuvirta on 20 A, sen edustama johtopituus on noin 286 km. Tällöin sen maakapasitanssien edustama impedanssi on luokkaa 600 W. Jos verkosta kaapeloitaisiin puolet (AHXAMK-W 3x95Al), sen maasulkuvirta olisi noin 340 A ja kapasitanssien edustama impedanssi noin 35 W.

Kun luvussa 1 mainitut yliaaltolähteet syöttävät verkkoon harmonisia yliaaltovirtoja, keskijänniteverkon vaihejännitteet säröytyvät. Kun taajuus kasvaa, verkon maakapasitanssin edustama impedanssi pienenee kääntäen verrannollisesti taajuuteen nähden. Esimerkiksi 250 Hz yliaaltovirran kohtaama impedanssi on viidesosa 50 Hz virran kohtaamasta impedanssista. Toisaalta kaapelin pitkittäinen reaktanssi on 250 Hz taajuudella viisinkertainen 50 Hz reaktanssiin verrattuna. Sammutuskuristimen edustama reaktanssi on suoraan verrannollinen taajuuteen. Jos kelan 50 Hz virta on esimerkiksi 300 A, sen reaktanssi on noin 40 W. Taajuuden ollessa 250 Hz vastaava reaktanssi on noin 200 W. Jos tätä verrataan maakapasitanssien edustamaan impedanssiin vastaavan kokoisessa verkossa vastaavalla taajuudella, voidaan arvioida, että kompensointikelalla ei ole kovin merkittävää vaikutusta jännösmaasulkuvirran harmonisiin virtoihin varsinkaan 250 Hz tai sitä suuremmilla taajuuksilla.

Harmoninen yliaaltojännite u_h on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Standardissa SFS-EN 50160 ”Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” on määritelty jakelujännitteen ominaisuudet keskijänniteverkossa [2]. Kyseisessä standardissa on esitetty harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä u_I (Taulukko 2.1). Maasulun aikana nollijännitteessä ja vikavirrassa esiintyy tyypillisimminkin parittomia harmonisia komponentteja, joiden järjestysluku on 3, 5 ja 7. Näiden osalta suurimmat sallitut jännitesäröt ovat 5,0 – 6,0 % perustaajuisesta jännitteestä. 20,5 kV jännitteellä 5 – 6 % jännitesärö tarkoittaa noin 592 – 710 V harmonista vaihejännitettä. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.

Taulukko 2.1 Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä u_I [2].

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h
5	6,0 %	3	5,0 % ^a	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

^{a)} Verkon rakenteesta riippuen kolmas yliaalto saattaa olla huomattavasti pienempi.

Harmoninen yliaaltojännite riippuu epälineaaristen kuormien verkkoon syöttämisestä harmonisista virroista sekä niiden kohtaamista impedansseista. Kyseessä on siis tilastollisesti kuormitusten mukaan vaihteleva suure. Harmonisia virtakomponentteja voi siirtyä keskijännite-

verkkoon myös 110 kV järjestelmästä. Harmoninen kokonaissärö THD lasketaan seuraavalla kaavalla [2].

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (2.3)$$

2.4.1 Maasulkuvirran harmoninen yliaaltovirtakomponentti

Sammutetun verkon 50 Hz maasulkuvirta lasketaan perinteisesti Theveninin menetelmällä nollaverkon mallin avulla. Ilmajohdoverkoissa ja kaupunkiverkoissa myötä- ja vastaimpedanssien vaikutus vikavirran suuruuteen on voitu katsoa vähäiseksi. Myös nollaverkon pitkittäiset impedanssit jätetään yleensä huomiotta (kuvat 2.2 ja 2.3).

Kun tarkastellaan harmonisia vikavirtakomponentteja, verkon mallinnuksessa tarvittavia lähtötietoja ovat:

- verkkotopologia
- johtojen mallit ja impedanssiarvot joko p-sijaiskytkentöinä tai taajuusriippuvina johdingeometrioihin ja sähköisiin ominaisuuksiin perustuvina malleina
 - kaapeleille ja johdoille nolla- myötä- ja vastaverkon resistanssit, induktanssit sekä kapasitanssit
 - muuntajan ja sammutuslaitteistojen sähköiset arvot
- syöttävän verkon sähkötekniiset tiedot
- kuormitukset
- yliaaltolähteet virtainjektiona tai jännitelähteinä haluttuihin kohtiin

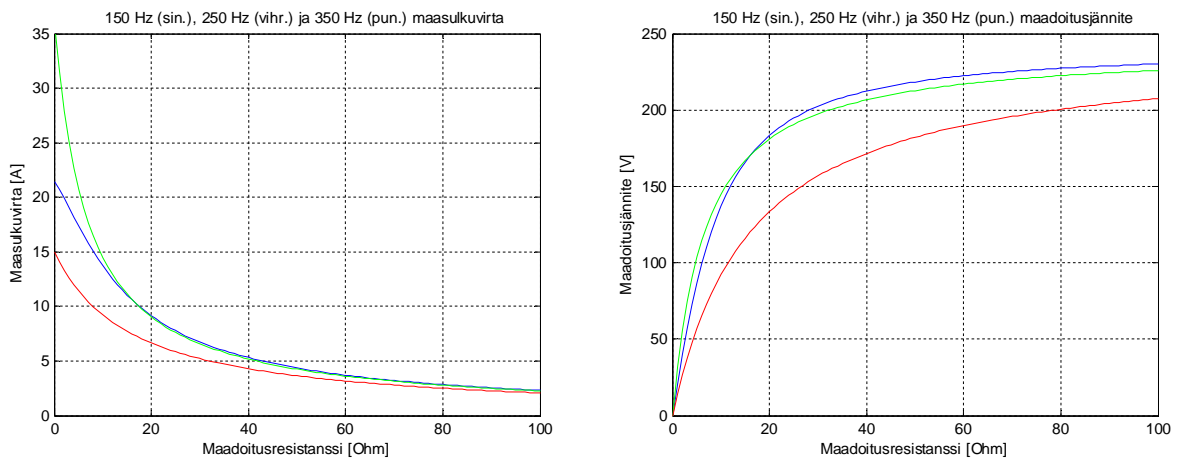
Oletetaan, että tietyn taajuinen virta kohtaa verkossa tätä taajuutta vastaavat impedanssit. Siten kutakin taajuutta voidaan tarkastella erikseen. Symmetristen komponenttien käyttöön perustuvat kaavat riippuvat vikatyypistä. Verkon yksivaiheinen maasulkuvirta voidaan määrittää yleisesti kuvan 2.4 mukaisen sijaiskytkennän avulla, jossa myötä-, vasta- ja nollaverkot kytkeytyvät sarjaan. Tällöin yleisen maasulkuteorian mukaan vikakohdan maasulkuvirta voidaan laskea kaavasta 2.1. Samaa laskentatapaa voidaan soveltaa myös harmonisille vikavirtakomponenteille. Kaava 2.4 esittää, kuinka harmonista taajuutta h vastaava vikavirtakomponentti I_{Fh} voidaan laskea, kun jännite U_h on järjestysluvultaan h , vikakohdassa ennen vikaa vallinnut harmoninen yliaaltojännite. Impedanssit Z_{h1} , Z_{h2} ja Z_{h0} ovat vikakohdasta nähdyt harmoniset myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit vastaten järjestyslukua h . Oletetaan, että vikaimpedanssi Z_F on taajuudesta riippumaton resistanssi.

$$I_{Fh} = \frac{3U_h}{Z_{h1} + Z_{h2} + Z_{h0} + 3Z_F} \quad (2.4)$$

Kun lähdejännitteen taajuus kasvaa ollen esimerkiksi 250 Hz, verkon kapasitiiviset reaktanssit pienenevät siinä määrin, että myös johtojen pitkittäisten reaktanssien merkitys kasvaa. Myöskään myötä- ja vastaverkkoa ei voida jättää huomiotta.

Laskenta muodostuu käytännössä varsin haasteelliseksi ilman simulointiohjelmistoa. Jatkossa edetään hyödyntämällä PSCAD-simulointiohjelmistoa. Luvussa 4 pyritään yksinkertaistamaan vikavirran ja maadoitusjännitteen arviointia simulointien ja likimääräistyksiä avulla.

Harmonisia vikavirtakomponentteja voidaan arvioida, jos vikakohtaan harmoninen jännitesärö tunnetaan mittaustietona ja verkon kokonaisimpedanssi tunnetaan. Mittaus voi olla jatkuva tai harmoninen jännitesärö voi perustua pitkäkestoiseen seurantamittaukseen, minkä perusteella saadaan joko keskimääräinen tai suurin mahdollinen harmoninen jännitesärö. Kuvassa 2.8 on esitetty maasulkuvirran harmoniset virtakomponentit ja harmoninen maadoitusjännite esimerkiverkossa (määritelty kohdassa 3.2.1) 150 Hz, 250 Hz ja 350 Hz taajuuksilla, kun harmoninen jännitesärö kaikilla taajuuksilla on 2 % ja vika on sähköasemalla.



Kuva 2.8 Harmoninen maasulkuvirta ja maadoitusjännite esimerkiverkossa 150 Hz (sin.), 250 Hz (vihr.) ja 350 Hz (pun.) taajuuksilla, kun jännitesärö on 2 % ja vika sähköasemalla.

2.5 Kosketusjännitevaatimukset

Maasulun vikavirran aiheuttamat vaarajännitteet eivät saa aiheuttaa vaaraa turvallisuudelle. Henkilön turvallisuudelle on uhkana, että sydämen kautta kulkee suuruudeltaan sellainen virta, joka voi aiheuttaa sydänkammiovärinän. Käyttötaajuudella sovellettava virtaraja on johdettu julkaisun IEC/TS 60479-1 asianomaisesta käyrästä. Kehon kautta kulkevan virran raja-arvo on muutettu jännitteen raja-arvoiksi, jotta sitä voidaan verrata laskettuihin askel- ja kosketusjännitteisiin (Kuva 2.9) [1]. Yleisesti turvallisuutta voidaan lisätä

- rajoittamalla vikavirtoja,
- parantamalla maadoitusjärjestelmiä,
- lyhentämällä vikojen vaikutusaikoja ja
- SFS 6001 standardissa esitellyillä erityistoimenpiteillä.

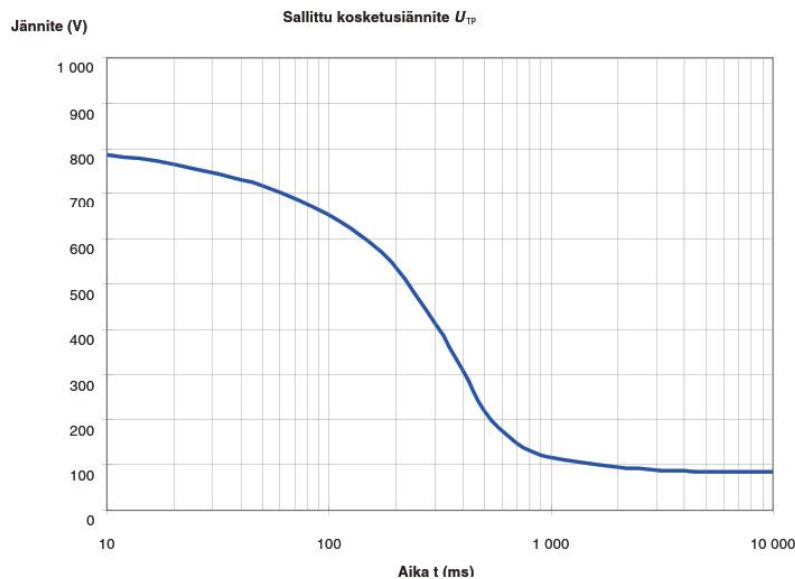
Vaarajännitteiden kannalta maasulkutarkastelut ovat keskittyneet perinteisesti 50 Hz perustaa-juisiin suureisiin. Verkon epälineaaristen kuormien synnyttämän jännitesärön seurauksena

maasulkuvirtaan summautuu kuitenkin myös harmonisia yliaaltokomponentteja. Lisääntyessään ne voivat yhdessä perustaajuisen maasulkuvirran kanssa kasvattaa maadoitusjännitettä, mikä tulisi ottaa huomioon kosketusjännitteitä tarkasteltaessa.

Sallittujen kosketusjännitteiden katsotaan toteutuvan suurjännitejärjestelmässä, jos jompikumpi ehdoista toteutuu:

- Kyseessä oleva asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää.
- Täytetään tietyt maadoitus- ja kosketusjännitteisiin liittyvät kriteerit.

Sallitut kosketusjännitteet perustuvat standardeissa SFS6001 ja EN 50522 esitettyyn käyrään. Kosketusjännite U_{TP} on esitetty virran kestoajan funktiona, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmässä. Jos virran kesto aika on huomattavasti pidempi kuin 10 s, sallitun kosketusjännitteen U_{TP} arvona voidaan käyttää 80 V.

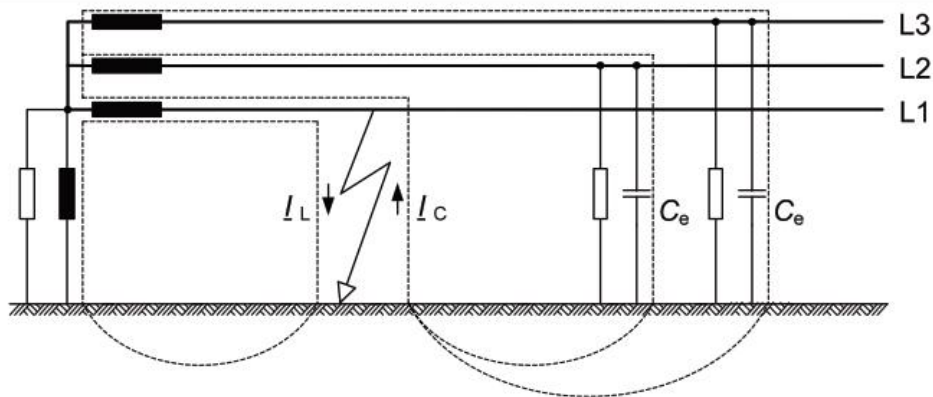


Kuva 2.9 Sallittu kosketusjännite U_{TP} virran kestoajan funktiona [1].

Sellaisen maadoitusjärjestelmän, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän osa, suunnittelu perustuu maadoitusjännitteeseen U_E , joka lasketaan esiintyvän suurimman maavirran I_E ja maadoitusimpedanssin Z_E tulona. Tällöin sovelletaan $2U_{TP}$ tai $4U_{TP}$ kriteerejä eli maadoitusjännite saa olla kaksinkertainen tai tietyin edellytyksin nelinkertainen käyrästä 2.9 luettavaan sallittuun kosketusjännitteeseen verrattuna. Toinen vaihtoehto on kosketusjännitteen osoittaminen mitauksin, jolloin mitattua arvoa verrataan käyrästä 2.9 luettavaan kosketusjännitearvoon [1].

Standardissa SFS 6001 kuvassa 3 on esitetty suurjännitejärjestelmien maasulkuvirtojen keskeiset komponentit (kaava 2.5). Sammutetun järjestelmän maasulun osalta voidaan soveltaa kuvaa 3b). Sammutetun järjestelmän jäännösmaasulkuvirta sisältää kompensoinnin vinovirityksestä aiheutuvan reaktiiviseen komponentin lisäksi vikavirran pätövirtakomponentin sekä harmonisen vikavirtakomponentin I_H , joka sisältää eri taajuuksia. Vikavirran pätökomponentti on määriteltävä sisältyvän virtaosoittimiin I_C ja I_L , jotka ovat verkon maasulussa tuottama kapasitiivinen

virta ja kompensointikuristimen tai -kuristimien tuottama induktiivinen virta vastaavasti. Mikäli maasulun jäännösvirran tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, sen arvoksi voidaan standardin mukaan olettaa 10 % arvosta I_C [1].



Kuva 2.10 Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä [1].

Maasulkuvirta I_F voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$|I_F| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2} \quad (2.5)$$

Sammutettujen järjestelmien, joissa on sammutuskelat, maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta maasulussa on seuraava [1].

$$I_E = r * \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2} \quad (2.6)$$

Virta I_L on sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa ja r on reduktiokerroin. Mikäli järjestelmässä ei ole sammutuskeloja, vastaava vikavirta I_E on jäännösvikavirta kerrottuna reduktiokertoimella r [1].

$$I_E = r * I_{RES} \quad (2.7)$$

2.5.1 Harmonisen maasulkuvirran synnyttämä kosketusjännite

Jos vikakohdan harmonisia yliaaltovirtoja tarkastellaan niiden synnyttämien kosketusjännitteiden kannalta, maadoitusjännite ei ole suurimmillaan harmonisen virran ollessa suurimmillaan (Kuva 2.8). Vaikka vikavirta pienenee vikaresistanssin kasvaessa, maadoitusjännite saavuttaa yleensä suurimman arvonsa nolaa selvästi suuremmalla vikaresistanssin arvolla. Harmonisen vikavirran maksimiarvon määrittäminen pitäisi kaiketi perustua pahimman tilanteen arviointiin, jonka pohjana on vikapaikan harmoninen jännitesärö.

2.5.2 Jäännösmaasulkuvirran aiheuttaman maadoitusjännitteen arviointi

Sammutetun verkon kokonaismaasulkuvirta muodostuu maasulun aikaisen nollajännitteen vaikutuksesta sisältäen eri komponentteja. Jäännösmaasulkuvirrasta voidaan erottaa seuraavat komponentit:

- reaktiivinen jäännösmaasulkuvirta kompensoinnin jälkeen
 - tähän vaikuttaa verkon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran suuruus ja se kuinka suuri osa siitä on kompensoitu
- lisäkuormitusvastuksen resistiivinen maasulkuvirta
 - tyypillisesti 5 - 10 A jäykässä maasulussa
- kaapeliverkon nollaimpedanssista riippuva resistiivinen maasulkuvirta
- harmonisen jännitesärön tuottama harmoninen kokonaismaasulkuvirta I_H
 - muodostuu harmonisten virtakomponenttien summan tehollisarvona

Kokonaismaadoitusjännite muodostuu edellä mainittujen virtakomponenttien aiheuttamien maadoitusjännitteiden summan tehollisarvona. Jäännösmaasulkuvirta voidaan määrittää myös kompensoidun verkon vaimennusasteen d , virityksasteen m ja harmonisten virtakomponenttien (I_h) avulla. Verkon kompensoimaton perustaaajuinen kapasitiivinen maasulkuvirta on I_C , maadoituskuristimen virta maasulun aikana I_L ja maasulkuvirran pätökomponentti I_R .

$$d = \frac{I_R}{I_C}, \quad m = \frac{I_C - I_L}{I_C} \quad (2.8)$$

$$I_{RES} = I_C \sqrt{d^2 + m^2 + \sum_h \left(\frac{I_h}{I_C}\right)^2} \quad (2.9)$$

Tästä voidaan periaatteessa ratkaista suurin sallittu harmoninen jäännösvirta I_{RES_H} suhteessa verkon kapasitiiviseen maasulkuvirtaan, kun suurin sallittu kokonaisjäännösvirran arvo (I_{RES}) tunnetaan.

$$I_{RES_H} \leq \sqrt{\left(\frac{I_{RES}}{I_C}\right)^2 - m^2 - d^2} \quad (2.10)$$

Jäännösmaasulkuvirran tunteminen on olennaista paitsi kosketusjännitteiden myös maasulkuvalokaaren sammumisen kannalta. Viitteessä [10] on esitetty virtarajat maasulkuvalokaaren itsestään sammumiselle sammutetussa ja maasta erotetussa verkossa. 20 kV sammutetussa verkossa itsestään sammumisen virtaraja on 60 A ja maasta erotetussa 20 kV verkossa 35 A. Nämä rajat eivät päde suojakipinävälissä palavalle maasulkuvalokaarelle.

3. KAAPELOINNIN JA HAJAUTETUN KOMPENSOINNIN VAIKUTUS MAASULKUSUOJAUKSEEN

3.1 Nollajännitteen ja summavirtojen jälkivärähtelyilmiöt

Sammutetussa kaapeliverkossa verkon nollajännite ja lähtöjen summavirrat jäävät värähtelemään vaimenevasti maasulkuvian poistuttua, kun maakapasitanssien varaus purkautuu. Esi-merkki nollajännitteen ja summavirran jälkivärähtelystä on esitetty kuvassa 3.3. Hajautusalueiden kaapeli- ja sekaverkoissa on havaittu harmillisia sympatialaukaisuja, joissa terve lähtö laukeaa maasulkutilanteessa tarpeettomasti pois. Sympatialaukaisuja on esiintynyt tyypillisesti verkoissa, joissa käytetään hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Hajautetun kompensoinnin seurauksena maasulkutilanteessa myös terveellä lähdöllä saattaa esiintyä vikavirtoja, joiden taajuus poikkeaa perustaaajuudesta. Nämä perustaaajuudesta poikkeavat maasulkuilmiöt voivat aiheuttaa virheellisiä laukaisuja, mikäli niiden olemassaoloa ei ole otettu huomioon suojausten suunnittelussa, kun verkon rakenne ja kompensointitapa muuttuu.

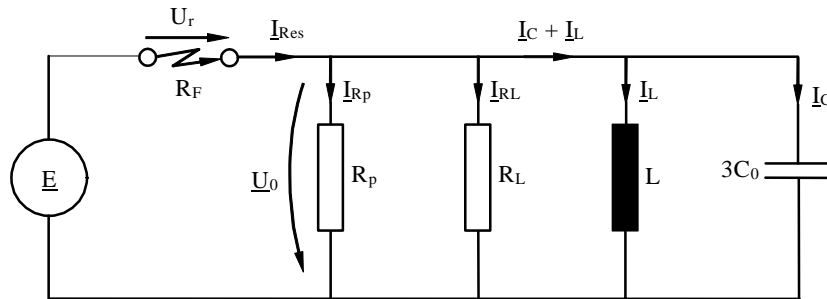
3.1.1 Maasulun poistumiseen liittyvät jännitetransientit

Maasulkuvika voi poistua sammutetussa verkossa lähinnä kahdella eri tavalla. Vika voi sammua itsestään tai lähdön maasulkusuojaus laukaisee viallisen lähdön verkosta. Kun maasulkuvirta katkeaa virran nollakohdassa, vikakohdan jännite palautuu. Tästä seuraa vikaväliin jännitetransientti, ns. palaava jännite, jolla on merkitystä valokaaren sammumisen kannalta.

Sammutuksen ansiosta maasulkuvalokaari voi sammua itsestään, koska vikakohtaan palaavan jännitteen nousunopeus ja jäännösvikavirta ovat pieniä maasta erotettuun verkkoon verrattuna. Tämä pätee kuitenkin pääasiassa ilmajohto-osuuksilla tapahtuviin vikoihin. Viitteen [10] mukaan 20 kV sammutetussa verkossa valokaaren itsestään sammumisen virtaraja on 60 A. Maakaapeliverkossa maasulku syntyy usein vaihejohtimesta kaapelin maadoitettuun osaan. Tällöin tilanne johtaa helposti katkeilevaan vikaan, koska valokaari palaa lyhyessä elektrodivälissä ja vian uudelleensyntyminen on todennäköistä vikakohtaan palaavan jännitteen vaikutuksesta.

Maakaapelin vikaantuessa vika ei korjaannu itsestään, joten vika erotetaan tyypillisesti lähdön maasulkusuojauksen laukaistessa viallisen lähdön verkosta. Tällöin jäljelle jäävän verkon viritysaste muuttuu hetkellisesti ennen kuin keskitetyn maadoituskuristimen säätäjä on ehtinyt säätää kompensoinnin vastaamaan jäljelle jääneen verkon sähköistä laajuutta.

Vian poistuttua nollajännite jää värähtelemään verkkoon kompensoinnin ja verkon maakapasitanssien määräämällä rinnakkaisresonanssipiirin resonanssitaajuudella. Värähtelyn vaimeneminen riippuu pääasiassa verkon vaimennuksesta suhteessa verkon sähköiseen laajuuteen. Kuvassa 3.1 verkon vaimennusta sijaiskytkennässä edustaa laskennallinen resistanssi R_p ja lisäkuormitusvastuksen resistanssia R_L . Vikakohtaan palaava jännite on U_r . Reaktiivisen jännösvikavirran suuruus riippuu kompensointiasteesta ja määräytyy virtojen I_C ja I_L osoitinsummana. Lisäksi jännösmaasulkuvirrassa on resistansseista R_p ja R_L riippuva resistiivinen komponentti.



Kuva 3.1 Maasulun ekvivalenttipiiri sammutetussa verkossa.

Nollajännitteen jälkivärähtelyä ja palaavan jännitteen muodostumista sammutetussa verkossa voidaan tarkastella kuvan 3.1 mukaisen sijaiskytkennän avulla. Jos vaimennuksen vaikutus jätetään huomiotta, maasulkuvirta kohtaa kompensointikelan reaktanssin X_L ja verkon maakapasitanssien edustaman impedanssin X_C rinnankytkennän edustaman kokonaisimpedanssin. Tällöin nollajännitteen taajuus vian poistuttua on rinnakkaisresonanssitaajuus.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{3LC_0}} \quad (3.1)$$

Verkon vaimennuksen vaikutus rinnakkaisresonanssitaajuuteen on suhteellisen vähäinen sammutetulle keskijänniteverkolle tyypillisillä vaimennuksen arvoilla. Se voidaan ottaa kuitenkin huomioon tarkastelemalla kuvan 3.1 mukaiselle sijaiskytkennälle kirjoitettua differentiaaliyhtälöä, joka pätee maasulkuvirran katkettua. Tällöin komponenttivirtojen summa menee nolaksi. Resonanssitaajuus voidaan ratkaista rinnakkaisresonanssipiirin differentiaaliyhtälöstä, joka ottaa huomioon myös vaimennuksen vaikutuksen. Resistanssi R edustaa sekä verkon että mahdollisen lisäkuormitusvastuksen resistansseja. Nollajännitettä on merkitty u :lla.

$$3C_0 \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = 0 \quad (3.2)$$

Kun valokaarivirta katkeaa, kompensointikuristimen ja maakapasitanssien muodostama rinnakkaisresonanssi piiri alkaa värähdellä järjestelmän luonnollisella kulmataajuudella ω_0 , joka saadaan differentiaaliyhtälön karakteristisen polynomin ratkaisuna. Vaimennusvakio on d

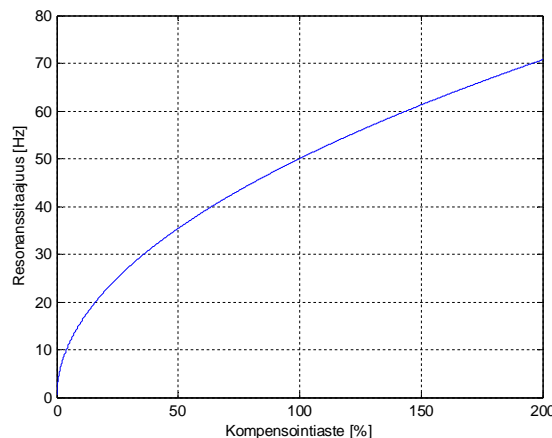
$$s = -\frac{1}{6RC_0} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{6RC_0}\right)^2 - \frac{1}{3LC_0}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (3.3)$$

Kun maadoituskuristimen induktiivinen reaktanssi on täsmälleen yhtä suuri kuin verkon maakapasitanssien edustama kapasitiivinen reaktanssi, rinnakkaisresonanssitaajuus f_r on 50 Hz. Käytännössä sammutetuissa verkoissa käytetään pientä 5 - 10 % vinoviritystä. Suomessa vinoviritys on tyypillisesti alikompensoinnin puolella, mutta se voi olla myös ylikompensoinnin puolella. Vinovirityksestä johtuen verkon rinnakkaisresonanssitaajuus poikkeaa hieman 50 Hz:stä. Jos verkossa on pelkästään hajautettua kompensointia, resonanssitaajuus voi poiketa enemmän perustaajuudesta, koska kompensointiaste jää alhaisemmaksi. Kun viallinen lähtö laukeaa verkosta, jäljelle jäävän verkon kompensointiaste muuttuu hetkellisesti. Tämä vaikuttaa nollajännitteen jälkivärähtelyn taajuuteen. Muutoksen suuruuteen vaikuttaa laukaistavan lähdön kapasitiivinen maasulkuvirta suhteessa koko verkkoon. Lisäksi muutoksen suuruuteen vaikuttaa, onko laukaistavalla lähdöllä hajautettua kompensointia. Nollajännitteen jälkivärähtelyn vaimenemisnopeuteen vaikuttaa verkon vaimennus, erityisesti lisäkuormitusvastuksen mitoitus ja käyttötapa.

Verkon nollajännite maasulun sammuttua voidaan määrittää seuraavasta kaavasta 3.4 [11]. E on vaihejännitteen tehollisarvo, ω_r on resonanssikulmataajuus ja kulma j on jännitteen vaihekulma vikavirran katketessa. Vaimennuksen aikavakio t määritellään vaimennusvakion d käännteisarvona.

$$u_0(t) = -\sqrt{2}E \cos(\omega_r t + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.4)$$

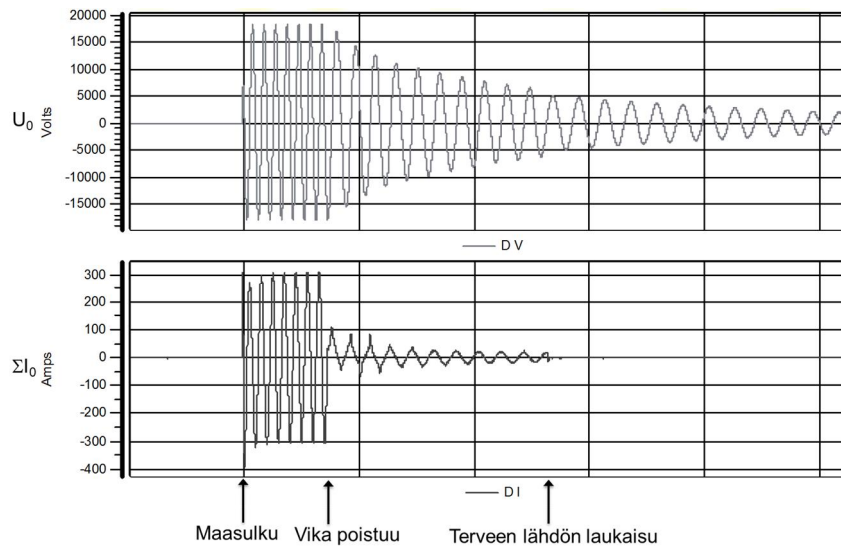
Vaimenematon rinnakkaisresonanssitaajuus voidaan laskea kohtalaisen hyvin kaavasta 3.1 vaikka periaatteessa myös verkon vaimennusvakio d vaikuttaa hieman resonanssitaajuuteen. Kuvassa 3.2 on esitetty sammutetun verkon rinnakkaisresonanssitaajuus kompensointiasteen funktiona ilman vaimennuksen vaikutusta.



Kuva 3.2 Sammutetun verkon rinnakkaisresonanssitaajuus kompensointiasteen funktiona.

Seuraavassa kuvassa 3.3 on esitetty esimerkki mitatuista nollajännitteestä ja lähdön summavirrasta maasulun aikana ja vian poistuttua. Maasulun poistuttua nollajännite ja terveen lähdön summavirta jäävät värähtelemään kuvan 3.3 mukaisesti. Verkko on alikompensoitu, minkä vuoksi nollajännitteen taajuus vian poistuttua on alle 50 Hz vastaten verkon resonanssitaajuutta.

Nollajännitteen ja lähdön summavirran jälkivärähtely johtaa terveen lähdön laukeamiseen, vaikka vika on poistunut jo aiemmin.



Kuva 3.3 Sammutetun verkon nollajännitteen ja lähdön summavirran jälkivärähtely, joka johtaa sympatialaukaisuun.

3.1.2 Pelkästään hajautetusti kompensoitu verkko

Jos verkossa on pelkästään hajautettua kompensointia, verkko on yleensä selvästi alikompensoitu. Tällöin maasulkusuojaus toimii vastaavasti kuin maasta erotetussa verkossa, jolloin mikään lähtö ei saa ylikompensoitua. Tällaisessa verkossa verkon rinnakkaisresonanssitaajuus on alle 50 Hz. Nollajännitteen värähtelytaajuuden ollessa alle 50 Hz, hajautetusti kompensoitu lähtö voi ylikompensoitua jälkivärähtelyn aikana. Tällöin summavirran loiskikomponentin suunta vaihtuu. Tämä voi aiheuttaa sympatialaukaisun terveellä lähdöllä maasulun poistuttua.

3.1.3 Keskitetty kompensointi

Jos vika poistuu ilman katkaisijatoimintoa, rinnakkaisresonanssitaajuus määräytyy kompensoinnin vinovirityksen perusteella. 5 - 10 % vinovirityksellä rinnakkaisresonanssitaajuus on lähellä perustaajuutta. Jos viallinen lähtö laukeaa, alun perin alikompensoitu verkko jää vian poistuttua hetkellisesti ylikompensoiduksi, mikäli laukeavan lähdön kapasitiivinen maasulkuvirta on suurempi kuin kompensoinnin vinoviritys ampeereina. Tällöin rinnakkaisresonanssitaajuus suojauksen toimittua on hetkellisesti yli 50 Hz. Keskitetysti kompensoidun verkon maasulkusuojaus perustuu yleensä vikavirran pätökomponenttiin. Siksi olennainen kysymys on, voiko jälkivärähtelyistä aiheutua summavirtaa, jonka terveen lähdön rele näkee pätövirtana, joka voi aiheuttaa sympatialaukaisun?

3.1.4 Keskitetty ja hajautettu kompensointi

Jos vian seurauksen laukeava lähtö on hajautetusti kompensoitu, sen mukana poistuu myös kompensointia verkosta. Hajautetusti kompensoidut lähdön ovat tyypillisesti alikompensoituja,

koska lähtöjen alkuosat kompensoidaan yleensä keskitetysti. Vaikka koko verkon kompensointiaste hetkellisesti hieman laskee viallisen lähdön lauettua, rinnakkaisresonanssitaajuus ei kuitenkaan muutu yhtä paljon kuin pelkästään keskitetysti kompensoidussa verkossa.

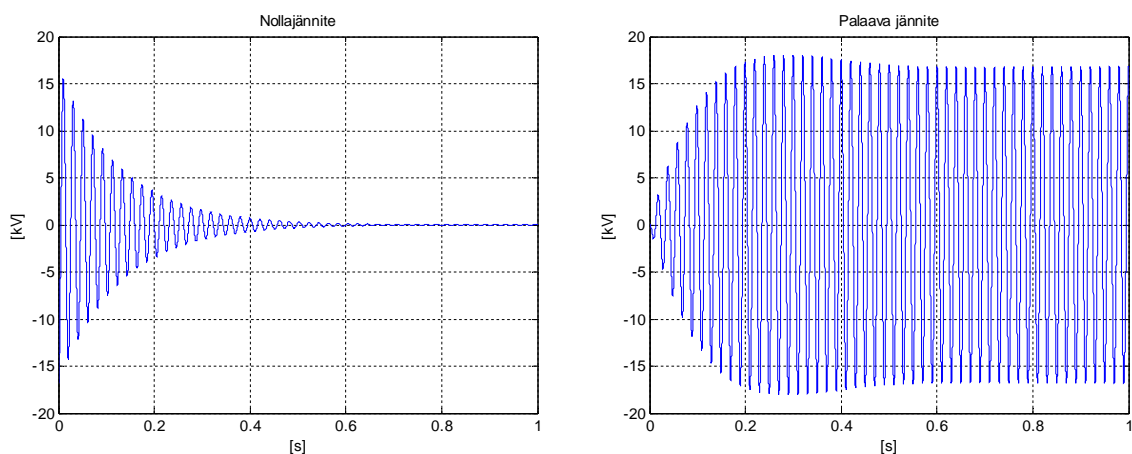
3.1.5 Esimerkkejä jännitetransienteista maasulun poistuttua

Seuraavassa verkon nollajännite ja vikakohtaan palaava jännite on laskettu eri kompensointias-teilla ja lisäkuormitusvastuksen mitoituksella kuvan 3.1 sijaiskytkentään perustuen. Esimer-keissä tarkastellun kaapeliverkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta oli 300 A ja avojohtoverkon 20 A. Kokonaan kaapeloituna 300 A:n maasulkuvirta edustaa noin 130 km AHXAMK-W 3x95Al kaapelia. Laskentajännitteenä tarkasteluissa käytettiin 20,6 kV. Nolla-jännite on laskettu kaavasta 3.4 ja vikakohtaan palaava jännite kaavasta 3.5 [11]. Kaavan 3.5 ensimmäinen termi edustaa vaihejännitettä, joka summautuu nollajännitteen kanssa vian pois-tuttua vikakohdassa. Kulmataajuus ω_r on sammutetun verkon resonanssikulmataajuus. Esi-merkkitarkasteluissa ilmoitettu verkon kapasitiivinen maasulkuvirta ja kompensointiaste pätevät vian poistuttua.

$$U_p(t) = \sqrt{2}E \left(\cos(\omega t + \varphi) - \cos(\omega_r t + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.5)$$

Esimerkki 3.1: Sammutettu avojohtoverkko

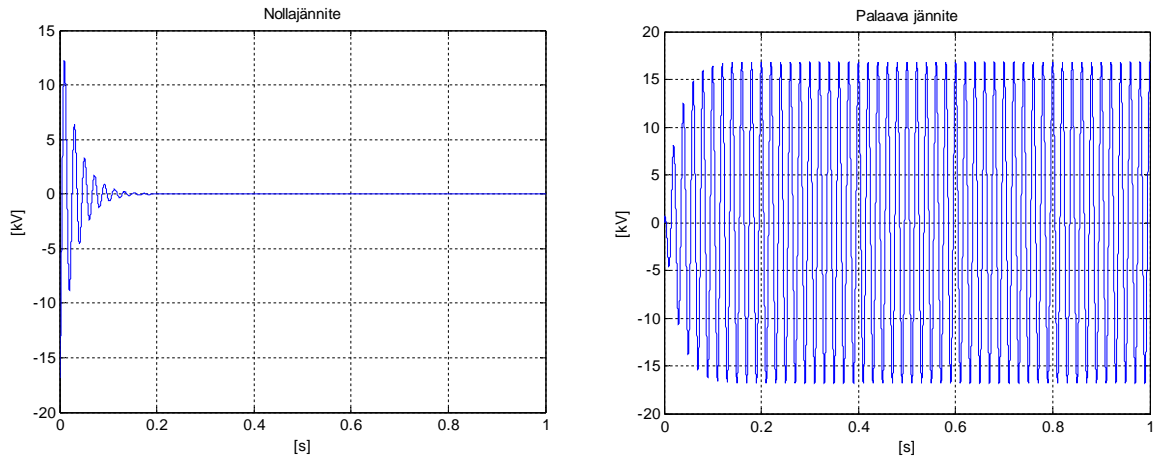
- Kapasitiivinen maasulkuvirta $I_C = 20$ A
- Kompensointiaste 95 %
- Verkon vaimennusaste $d = I_R / I_C = 0,05$
- Lisäkuormitusvastuksen virta 0 A
- Resonanssitaajuus $f_r = 48,7$ Hz
- Palaavan jännitteen värähtelytaajuus (huojunta) $f_h = 1,3$ Hz



Kuva 3.4 Nollajännite ja vikakohtaan palaava jännite esimerkissä 3.1.

Esimerkki 3.2: Sammutettu avojohtoverkko

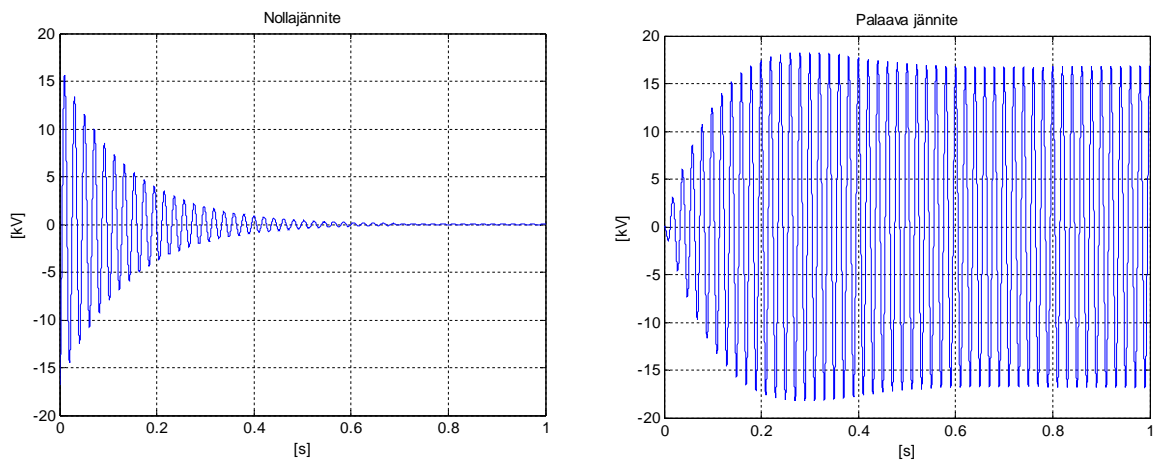
- Kapasitiivinen maasulkuvirta $I_C = 20 \text{ A}$
- Kompensointiaste 95 %
- Verkon vaimennusaste $d = I_R / I_C = 0,05$
- Lisäkuormitusvastuksen virta 3 A
- Resonanssitaajuus $f_r = 48,5 \text{ Hz}$
- Palaavan jännitteen värähtelytaajuus (huojunta) $f_h = 1,5 \text{ Hz}$



Kuva 3.5 Nollajännite ja vikakohtaan palaava jännite esimerkissä 3.2.

Esimerkki 3.3: Sammutettu kaapeliverkko

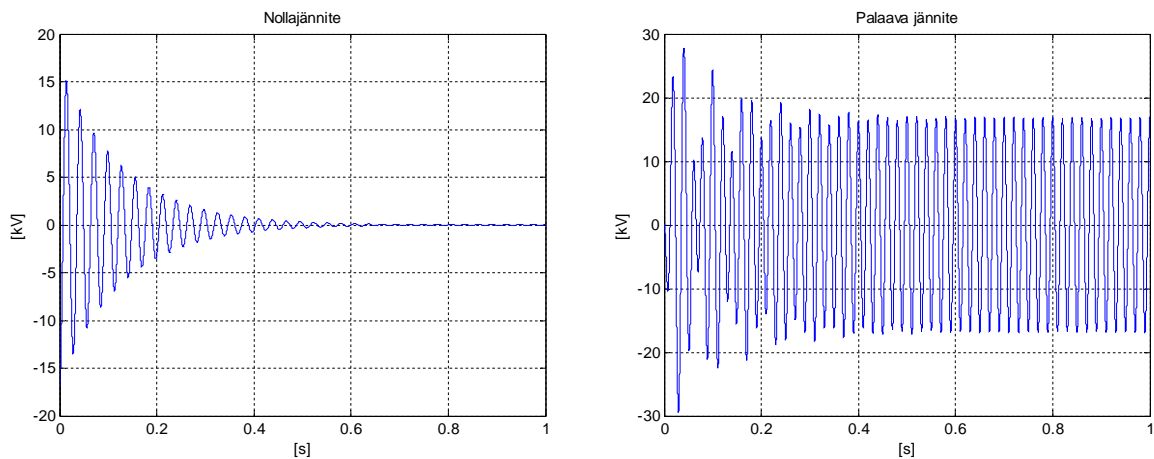
- Kapasitiivinen maasulkuvirta $I_C = 300 \text{ A}$
- Kompensointiaste 95 %
- Verkon vaimennusaste $d = I_R / I_C = 0,03$
- Lisäkuormitusvastuksen virta 5 A
- Resonanssitaajuus $f_r = 48,7 \text{ Hz}$
- Palaavan jännitteen värähtelytaajuus (huojunta) $f_h = 1,3 \text{ Hz}$



Kuva 3.6 Nollajännite ja vikakohtaan palaava jännite esimerkissä 3.3.

Esimerkki 3.4: Hajautetusti kompensoitu kaapeliverkko

- Kapasitiivinen maasulkuvirta $I_C = 300 \text{ A}$
- Kompensointiaste 50 %
- Verkon vaimennusaste $d = I_R / I_C = 0,05$
- Resonanssitaajuus $f_r = 35,3 \text{ Hz}$
- Palaavan jännitteen värähtelytaajuus (huojunta) $f_h = 14,7 \text{ Hz}$



Kuva 3.7 Nollajännite ja vikakohtaan palaava jännite esimerkissä 3.4.

Kuvista 3.4 ja 3.5 nähdään, millainen vaikutus lisäkuormitusvastuksella on nollajännitteen jälkivärähtelyilmiön keston avojohtoverkossa. Jo 3 A lisävastus vaimentaa jälkivärähtelyä tehokkaasti. Kun laaja verkko kaapeloidaan kokonaan tai osittain, kapasitiivinen maasulkuvirta kasvaa huomattavasti. Verkon vaimennus, johon käytettävä lisäkuormitusvastus vaikuttaa, ei kuitenkaan kasva läheskään samassa suhteessa kuin kapasitiivinen maasulkuvirta. Siksi nollajännitteen jälkivärähtelyiden kesto yleensä lisääntyy verkon kaapeloinnin seurauksena (Kuva 3.6). Mikäli verkon kompensointiaste poikkeaa huomattavasti resonanssivirityksestä, kuten esimerkiksi pelkästään hajautetusti kompensoidussa verkossa, nollajännitteen värähtelytaajuus poikkeaa selvästi perustaajuudesta (kuva 3.7). Tällöin myös palaavassa jännitteessä näkyy pienitaajuinen huojunta.

Nollajännitteen jälkivärähtelyiden vaimenemiseen voidaan vaikuttaa lähinnä seuraavilla toimenpiteillä:

- lisäkuormitusvastuksen mitoitus ja käyttötapa
 - mahdollisimman pieni resistanssi vaimentaa nollajännitteen värähtelyn nopeimmin
 - lisäkuormitusvastus vaimentaa jälkivärähtelyjä vain, jos se on kytkettynä vian poistuessa

3.2 Maasulkuilmiöiden simulointi

Maakaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin aiheuttamia ilmiöitä ja haasteita verkon suo-
jauksen kannalta sekä yliaaltojen vaikutuksia maasulunaikaisiin vaarajännitteisiin selvitettiin

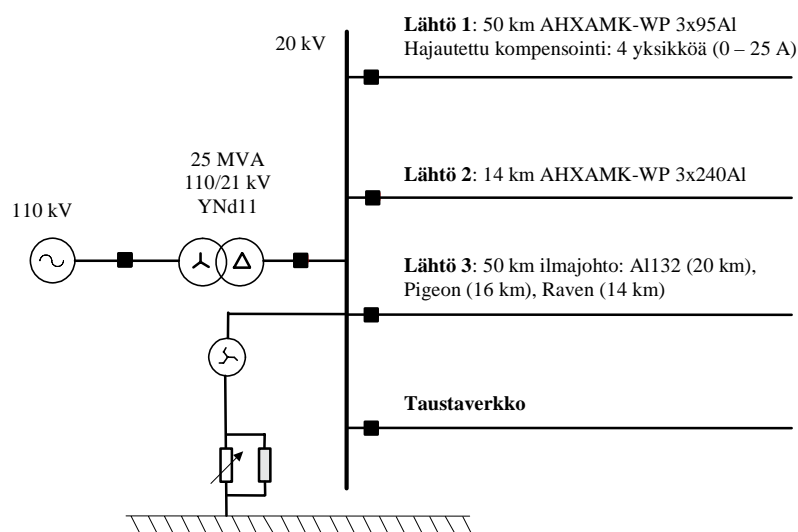
PSCAD simulointiympäristössä toimivien verkkomallien avulla. Maasulkusuojauksen osalta tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten maakaapelointi ja hajautettu kompensointi vaikuttavat maasulun yhteydessä esiintyviin ilmiöihin ja suureisiin, joita käytetään suojauksen toteutuksessa. Tutkimuksessa arvioitiin nollajännitteen jälkivärähtelyilmiöitä ja maakaapeloinnin vaikutusta vikavirran pätökomponenttiin esimerkkitapauksissa. Seuraavassa on kuvattu PSCAD malli, jota em. esimerkkitarkasteluissa.

Toisena tavoitteena oli selvittää keskijänniteverkon harmonisten yliaaltojännitteiden vaikutuksia vikavirtaan ja maadoitusjännitteisiin maasulun aikana. Tähän tarkoitukseen käytetty PSCAD malli on kuvattu luvussa 4.

3.2.1 PSCAD mallin määrittely

Suojaustarkasteluissa käytettiin alla kuvattua verkkomallia. Tavoitteena oli saada esille erilaisen verkkorakenteiden eroja (haja-asutusalue, taajama) tarkasteltavien ilmiöiden kannalta. Tavoitteena oli yleisen verkkomallin käyttäminen, jolloin voidaan tarkastella erilaisia verkkoratkaisuja ja niiden vaikutusta tutkittavaan ilmiöön.

Kuvaa 3.8 vastaavassa mallissa on kuvattuna 3 eri tyyppistä lähtöä. Lähdöt on mallinnettu p-sijaiskytkennän avulla siten, että jokainen 2 km johto-osa on mallinnettu erikseen. Lisäksi taustaverkko on mallinnettu maakaapelina halutun maasulkuvirran aikaansaamiseksi. Mallin 20 kV lähdöt on mallinnettu runkojohtona. Maasulkuvirran pätökomponenttiin liittyvissä tarkasteluissa havainnollistettiin myös lähdön 1 konfiguraation vaikutusta, jolloin puolet lähdön kokonaispituudesta koostui haaroista. Seuraavassa on kuvattu mallin ja sen eri lähtöjen koostumukset.



Kuva 3.8 PSCAD verkkomalli.

PSCAD malli sisältää seuraavat mallinnetut verkon primäärikomponentit:

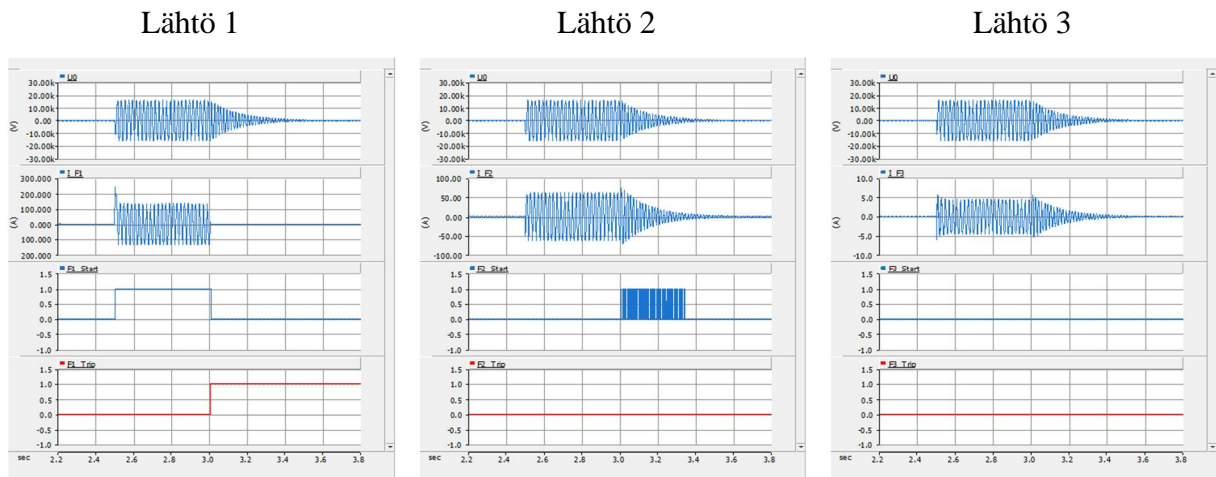
- syöttävää verkkoa 110 kV jännitetasosta ylöspäin kuvaava jännitelähde
- päämuuntaja käämikytkimellä: 25 MVA, 110/21 kV
- lähtöjen ja 20 kV syötön katkaisijat
- 20 kV lähdöt
 - haja-asutusalueen kaapelilähtö: 50 km AHXAMK-WP 3x95Al (lähtö 1)
 - § jakelumuuntajia 2 km välein
 - § lähdön muuntajien impedanssikuormat yht. 2,5 MVA, $\cos j = 0,95_{ind}$
 - § 4 kpl hajautetun kompensoinnin yksiköitä (0 - 25 A)
 - taajaman kaapelilähtö: 14 km AHXAMK-WP 3x240Al (lähtö 2)
 - § jakelumuuntajia 2 km välein
 - § lähdön muuntajien impedanssikuormat yht. 2,8 MVA, $\cos j = 0,95_{ind}$
 - haja-asutusalueen avojohtolähtö: yhteensä 50 km (lähtö 3)
 - § 20 km Al132, 16 km Pigeon, 14 km Raven
 - § jakelumuuntajia 2 km välein
 - § lähdön muuntajien impedanssikuormat yht. 2,5 MVA, $\cos j = 0,95_{ind}$
 - taustaverkon malli (lähtö 4)
 - § kaapelia AHXAMK-WP 3x240Al
 - § verkon kapasitiivisen maasulkuvirran säätö
 - § impedanssikuormat yht. 4,8 MVA, $\cos j = 0,95_{ind}$
- maadoitusmuuntaja ja sen toisiokomponentit (lähtö 5 suojaustarkasteluissa)
 - maasulkuvirran kompensointi ja lisäkuormitusvastus
 - kompensointiaste ja lisävastuksen virta säädettävissä
- 20 kV syötön ja lähtöjen suojareleet, jotka ohjaavat ko. katkaisijoita
 - ylivirta- ja maasulkusuojaus

3.2.2 Esimerkkejä suojauksen toiminnasta

Nollajännitteen jälkivärähtelyiden vaikutusta suojauksen toimintaan on havainnollistettu seuraavassa muutamalla simulointiesimerkillä. Kuvissa on esitetty kolmen lähdön maasulkusuureet. Suureet ovat ylhäältä lukien: Nollajännite, lähdön summavirta, maasulkureleen havahtumissignaali (start) ja laukaisusignaali (trip). Lähtöjen maasulkusuojauksen nollajännitteen asetteluarvo oli 10 % sammutetussa tilanteessa ja 5 % pelkästään hajautetusti kompensoidussa tilanteessa. Summavirran asetteluarvo oli 1 A ja laukaisuhidastus 0,5 s. Simulointitarkasteluissa verkon kokonaisvaimennukseen vaikuttavat lisäkuormitusvastuksen lisäksi verkon johtojen, erityisesti maakaapeleiden nollaimpedanssit.

Esimerkki 3.5: Vika lähdöllä 1

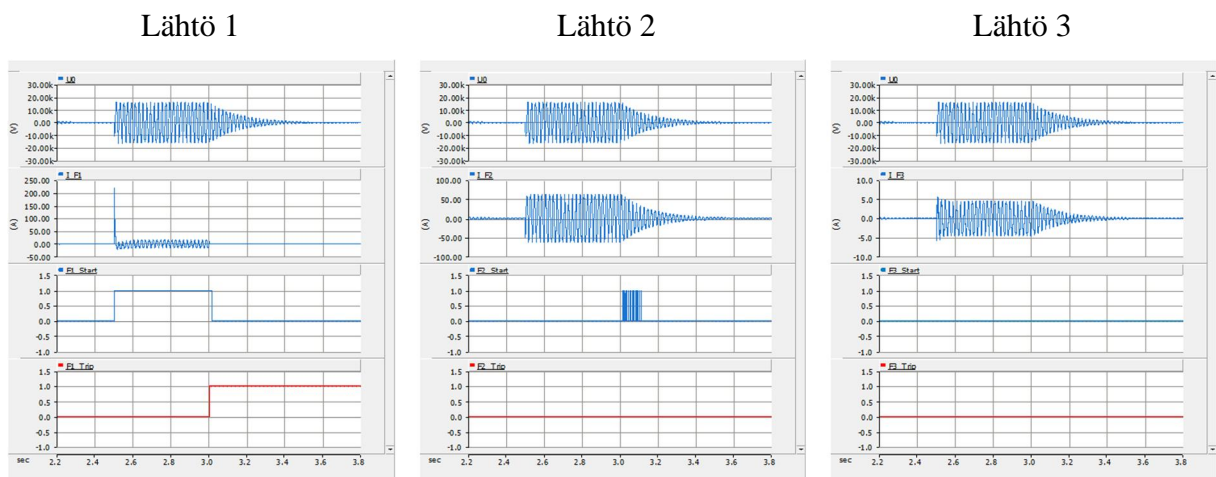
- Keskitetty kompensointi
- Kompensointiaste 95 %
- Lisäkuormitusvastuksen virta 7 A



Kun lähtö 1 laukeaa maasulun seurauksena verkosta, verkko jää ylikompensoitukseksi. Nollajännite jää tällöin värähtelemään yli 50 Hz taajuudella, minkä seurauksena terveillä lähdöillä 2 esiintyy maasulkureleen havahtumisia. Lähdön 2 rele ei kuitenkaan pysy riittävän kauan havahtuneena, jotta tapahtuisi sympatialukaisu.

Esimerkki 3.6: Vika lähdöllä 1

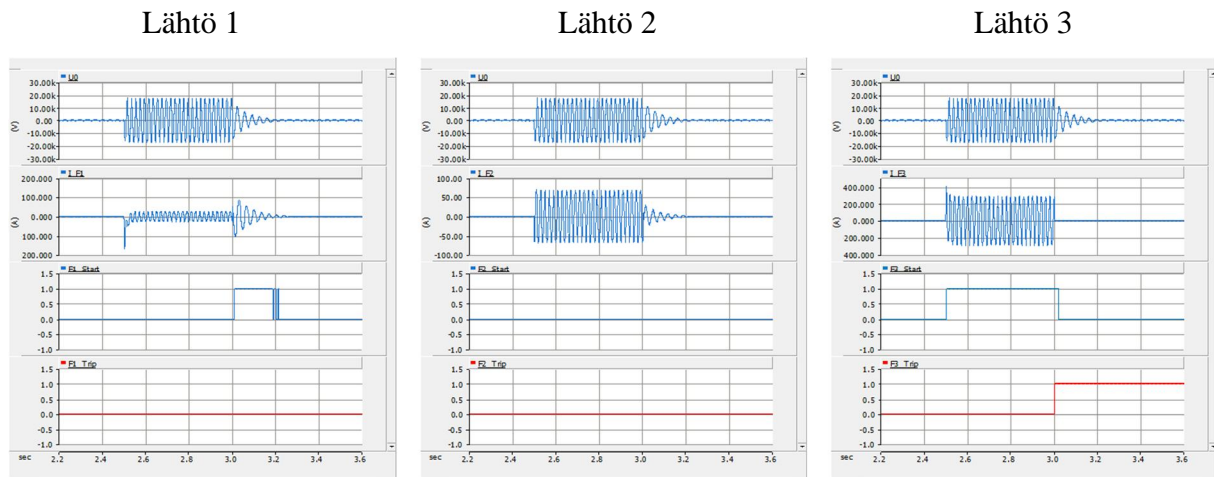
- Keskitetty ja hajautettu (100 A lähdöllä 1) kompensointi
- Kompensointiaste 95 %
- Lisäkuormitusvastuksen virta 7 A



Lähdön 1 hajautetun kompensoinnin ansiosta verkon kompensointiaste ei muutu yhtä paljon kuin esimerkissä 1. Siitä huolimatta terveen lähdön rele havahtuu hetkellisesti, mutta rele ei pysy riittävän kauan havahtuneena, jotta se laukeaisi.

Esimerkki 3.7: Vika lähdöllä 3

- Hajautettu kompensointi (100 A lähdöllä 1)
- Lähdöllä 2 ja 3 ei kompensointia
- Kompensointiaste noin 33 %



Hajautetusti kompensoidun verkon kompensointiaste on alhainen. Tästä johtuen nollijännite jää tällöin värähtelemään selvästi alle 50 Hz taajuudella lähdön 3 lauettua, minkä seurauksena lähtö 1 ylikompensoituu hetkellisesti. Lähdön 3 summavirta on suuri johtuen alhaisesta kompensointiasteesta. Viallisen lähdön laukeamisen jälkeen terveellä lähdöllä 1 esiintyy maasulkureleen havahtumisia, mutta rele ei pysy riittävän kauan havahtuneena, jotta tapahtuisi sympatialaukaisu. Jos releen laukaisuhidastus olisi lyhyempi tai verkon vaimennus pienempi, sympatialaukaisu olisi mahdollinen.

3.2.3 Pitkien kaapelilähtöjen vaikutus vikavirran pätökomponenttiin

Laajassa kaapeliverkossa, jossa on pitkiä kaapeloituja lähtöjä, suuret varausvirrat aikaansaavat jännitehäviöitä johtojen sarjaimpedansseissa. Yksittäisen lähdön ja siten myös koko verkon maasulussa tuottaman vikavirran pätökomponentin arvioiminen laskennallisesti on haasteellista, koska kaapeliosuuksien nolлайmpedansseja ei tunneta taulukkoarvoina. Lisäksi lähdön konfiguraatio vaikuttaa resistiivisen vikavirtakomponentin muodostumiseen,

Tässä tutkimuksessa havainnollistettiin releiden näkemiä maasulkuvirran pätökomponentteja PSCAD esimerkiverkossa (kohta 3.2.1). Taustaverkkoa kuvaava lähtö 4 mallinnettiin kaapelina siten, että malli muodostui 3 km kaapeliosuudesta, jotka on kytketty rinnakkain. Yhteensä taustaverkon mallissa oli 39 km AHXAMK-WP 3*240Al kaapelia. Kyseinen lähtö tuotti maasulussa noin 130 A kapasitiivista maasulkuvirtaa ja noin 4 A resistiivistä maasulkuvirtaa. Kaikkien lähtöjen yhteensä tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta oli noin 300 A. Lähtö 5 kuvaa maadoitusmuuntajalähtöä, joka sisältää maadoitusmuuntajan lisäksi tähtipisteen ja maan välille kytketyt komponentit. Kapasitiivisen loisivirran ja pätövirran suunta sähköasemalta asemalta lähdölle päin on määritelty positiiviseksi. Vikakohdan maasulkuvirran suunta vaiheesta maahan

on määritelty myös positiiviseksi. Mallin lähdöillä 1 - 3 koko johtopituus mallinnettiin runkojohtona lukuun ottamatta esimerkkiä 3.10, jossa havainnollistettiin lähdön konfiguraation vaikutusta vikavirran pätökomponenttiin. Esimerkissä 3.10 lähdön 1 runkojohtoon pituus oli 25 km ja siihen kytkeytyy 2 km haaroja 2 km välein. Lähdön 1 kokonaisjohtopituus oli sama kuin muissakin esimerkeissä.

Esimerkki 3.8: Maasulku sähköaseman kiskossa

- Lähdön 1 konfiguraatio: runkojohto 50 km
- Keskitetty kompensointi: kompensointiaste 95 %, lisäkuormitusvastus 10 A
- Verkon nolajännite maasulun aikana: $U_0 = 11,83$ kV

Vikavirta	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Vikakohta
$\ddot{I}_{3I_0\ddot{I}}$	116,6 A	46,8 A	3,4 A	130,4 A	282,0 A	35,1 A
$3I_{0pätö}$	-16,0 A	-1,8 A	-0,15 A	-4,2 A	-10,0 A	31,9 A
$3I_{0lois}$	-115,5 A	-46,8 A	-3,4 A	-130,4 A	281,8 A	14,8 A

Esimerkki 3.9: Maasulku lähdön 1 lopussa

- Lähdön 1 konfiguraatio: runkojohto 50 km
- Keskitetty kompensointi: kompensointiaste 95 %, lisäkuormitusvastus 10 A
- Verkon nolajännite maasulun aikana: $U_0 = 10,30$ kV

Vikavirta	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Vikakohta
$\ddot{I}_{3I_0\ddot{I}}$	89,3 A	40,8 A	3,0 A	113,6 A	245,6 A	30,7 A
$3I_{0pätö}$	14,0 A	-1,6 A	-0,13 A	-3,6 A	-8,7 A	25,4 A
$3I_{0lois}$	-88,2 A	-40,8 A	-3,0 A	-113,6 A	245,5 A	17,2 A

Esimerkki 3.10: Lähdön 1 konfiguraation vaikutus, maasulku aseman kiskossa

- Lähdön 1 konfiguraatio: runkojohto 25 km, 2 km haaroja 2 km välein
- Keskitetty kompensointi: kompensointiaste 95 %, lisäkuormitusvastus 10 A
- Verkon nolajännite maasulun aikana: $U_0 = 11,84$ kV

Vikavirta	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Vikakohta
$\ddot{I}_{3I_0\ddot{I}}$	117,1 A	46,9 A	3,4 A	130,5 A	283,1 A	29,8 A
$3I_{0pätö}$	-9,9 A	-1,8 A	-0,15 A	-4,2 A	-10,0 A	25,8 A
$3I_{0lois}$	-116,7 A	-46,8 A	-3,4 A	-130,5 A	282,9 A	15,0 A

Esimerkki 3.11: Maasulku sähköaseman kiskossa

- Lähdön 1 konfiguraatio: runkojohto 50 km
- Keskitetty ja hajautettu kompensointi: kokonaiskompensointiaste 95 %
 - Lähtö 1: 4 x 25 A, 10 km välein
- Lisäkuormitusvastus sähköasemalla 10 A
- Verkon nollajännite maasulun aikana: $U_0 = 11,84$ kV

Vikavirta	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Vikakohta
\dot{i}_{3I_0}	18,6 A	46,9 A	3,4 A	130,5 A	189,5 A	21,6 A
$3I_{0pätö}$	-3,2 A	-1,8 A	-0,15 A	-4,2 A	-10,0 A	19,1 A
$3I_{0lois}$	-18,3 A	-46,8 A	-3,4 A	-130,5 A	189,2 A	10,1 A

3.2.4 Johtopäätöksiä esimerkkitarkasteluista

Pitkä kaapelilähtö voi tuottaa maasulun aikana kapasitiivisen vikavirran lisäksi myös pätövirtaa suhteessa nollajännitteeseen. Sammutetun verkon maasulkusuojaus perustuu vikavirran pätökomponenttiin, joten siltä kannalta asia ei ole ongelma. Vikavirran pätökomponentin kasvu lisää kuitenkin jonkin verran vikakohdan jäännösvirtaa, koska sitä ei voida kompensoida.

Kohdan 3.2.3 simuloinneissa pitkää maakaapelilähtöä kuvaava lähtö 1 tuotti vikavirtaan 16 A pätövirtakomponentin, kun se mallinnettiin pelkkänä runkojohtona (esimerkki 3.8). Kaapeliparametrien lisäksi pätövirtakomponentin suuruus riippuu lähdön konfiguraatiosta. Kun lähdön 1 konfiguraatio muutettiin siten, että runkojohdon pituus oli 25 km ja siihen liittyi 2 km haaroja 2 km välein kokonaisjohtopituuden pysyessä samana, lähdön maasulussa tuottama pätövirtakomponentti pieneni vajaan 10 A:iin (esimerkki 3.10). Normaalisti merkittävä osa lähdön johtopituudesta muodostuu runkojohtoon kytkeytyvistä haaroista. Vian sijainti pitkän lähdön loppupäässä vaikuttaa myös nollajännitteen suuruuteen ja sitä kautta varausvirtoihin ja vikavirran pätökomponenttiin (esimerkki 3.9).

Kaapelilähdöllä maasulun aikana kulkevaa varausvirtaa voidaan pienentää hajautetun kompensoinnin avulla. Tätä on havainnollistettu esimerkissä 3.11. Hajautettu kompensointi pienentää Lähdön 1 tuottamaa pätövirtakomponenttia esimerkkitapauksissa 16,0 A:sta 3,2 A:iin. Hajautetun kompensoinnin tapauksessa lähdön 1 esimerkin 3.10 mukaisella konfiguraatiolla ei ollut merkittävää vaikutusta vikavirtaan. Maakaapelin nolaresistanssiin voidaan vaikuttaa kaapelin valinnan lisäksi maadoituksilla ja maapaluupiirin impedanssia pienentämällä esimerkiksi ylimääräisen maadoitusjohtimen avulla.

4. VIKAVIRRRAN YLIAALTOJEN ARVIOINTI JA VAIKUTUKSET

Maasulun aikana esiintyviä harmonisia yliaaltojännitteitä ja -virtoja tutkittiin PSCAD verkkomallien avulla. Jatkossa esitettävien simulointi- ja laskentatulosten pohjana olevan perusverkon malli sisälsi seuraavat komponentit:

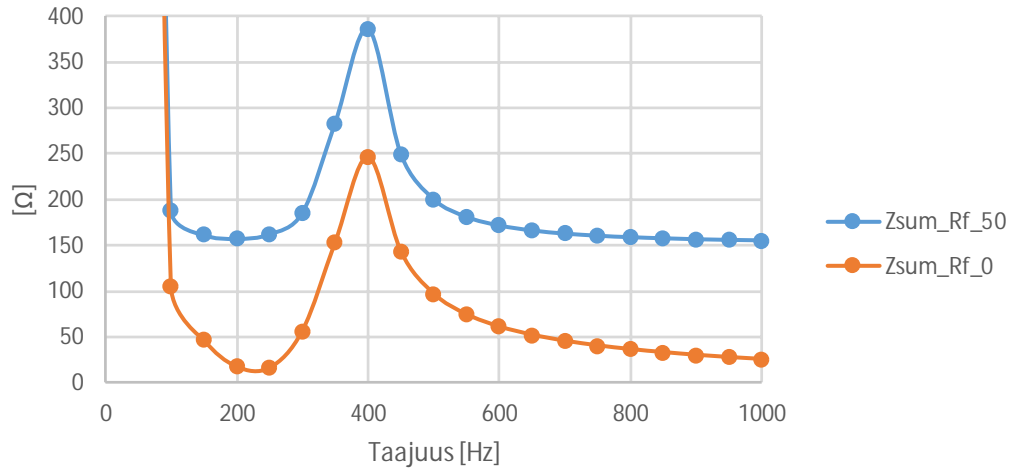
- syöttävä 110 kV verkko jännitelähteenä
- 110/20 kV päämuuntaja 16 MVA, perustilanteessa kuormitusaste 18 %
- 7 kpl 12 km pituisia kaapelilähtöjä
 - kaapeliosuudet 2 km/kpl, AHXAMK-WP 3x95Al, kapasitiivinen maasulkuvirta yhteensä noin 200 A
 - maasulkuvirran kompensointiaste 95 % ja lisäkuormitusvastus 1200 Ω
 - verkon kuormitukset on jaettu kaapelilähtöjen alku- ja loppupäihin ja kytketty pääjännitteisiin
 - oletetaan, että reduktiokerroin $r = 1$
 - § r on kolmivaihejohdon maavirran suhde päävirtapiirin vaihejohtimien nollavirtojen summaan [1].

Harmonisia yliaaltojännitteitä U_h voidaan tuottaa esimerkiksi 20 kV kiskon pääjännitteisiin lisäämällä harmoninen virtainjektio haluttuun kohtaan. Harmoninen yliaaltojännite U_h on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla h kerrottuna. Kerroin h on harmonisen komponentin järjestysluku. Yliaaltojännitteeseen viitataan joko järjestysluvulla h tai taajuudella. Esimerkiksi 5. yliaallon taajuus on $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$.

Tutkimuksessa tarkasteltiin maasulun jäännösvikavirran sekä maadoitusjännitteen perustaajuisia ja harmonisia komponentteja, kun jännitesärö 20 kV kiskossa sekä vikakohtasta näkyvä verkon kokonaisimpedanssi selvitettiin tarkastelluilla taajuuksilla simuloinnin perusteella.

Seuraavassa kuvassa 4.1 on esitetty simuloimalla saadut esimerkkiverkon taajuusvasteet impedansseina. Tarkastelukohta on sähköaseman kiskon välittömässä läheisyydessä. Simuloinnissa on oletettu, että vikaimpedanssina on taajuudesta riippumaton maadoitusresistanssi. Vikavirtapiirin myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennän impedanssien summaan on lisätty vikaresistanssit 0 W ja 50 W kolmella kerrottuna.

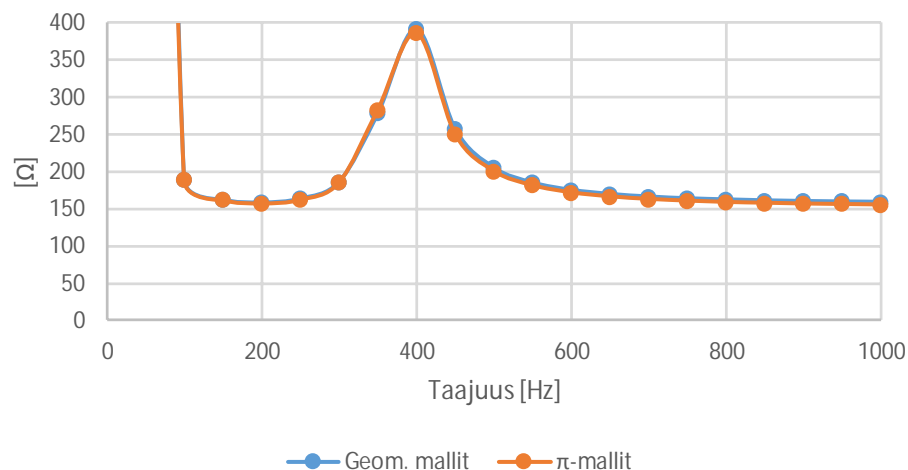
Kohdan 2.4 kaavan 2.4 mukaisesti maasulkuvirta halutulla taajuudella saadaan jakamalla ennen vikaa vikapaikassa vaikuttava yliaaltojännite vastaavalla vikavirtapiirin kokonaisimpedanssilla ja kertomalla kolmella. Esimerkiksi kuvan 4.1 tapauksessa 2 % yliaaltojännitteellä, joka vastaa 240 V jännitettä 250 Hz kohdalla, saadaan 50 W vikaresistanssilla virraksi noin $3 \times 240 / 162 \text{ A} = 4,5 \text{ A}$. Vastaava maadoitusjännitteeseen kerrostuva jännite on $50 \text{ W} \times 4,5 \text{ A} = 223 \text{ V}$. Tämä on vain 17 V vähemmän kuin verkon vaihejännitteessä esiintynyt 240 V yliaaltojännite.



Kuva 4.1 Esimerkkiverkon vikavirtapiirin impedanssit myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennälle, kun impedanssien summaan on lisätty vikaresistanssit $R_f = 0 \text{ } \Omega$ ja $R_f = 50 \text{ } \Omega$ kolmella kerrottuna.

Taajuus vaikuttaa merkittävästi impedansseihin. Kokonaisimpedanssit ovat pienimmillään välillä 150 – 300 Hz sekä suurimmilla taajuuksilla. Verkolle ominaiset resonanssitaajuudet vaikuttavat oleellisesti kyseisiin kokonaisimpedansseihin.

Kuvassa 4.2 on vertailtu esimerkkiverkon impedansseja, kun PSCAD mallissa käytettiin geometrisia kaapelimalleja ja π -malleja. Kuvan perusteella kummallakin mallinnustavalla saadut impedanssit ovat varsin lähellä toisiaan.



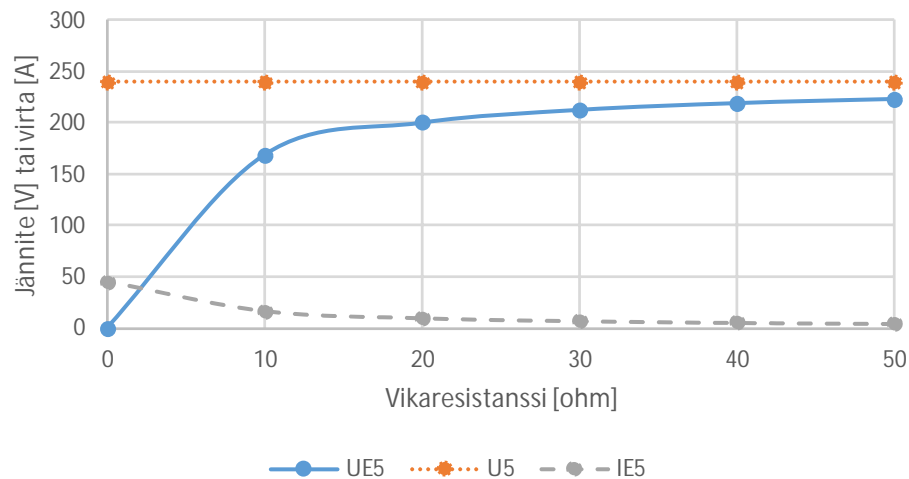
Kuva 4.2 Esimerkkiverkon impedanssien vertailu käytettäessä geometrisia kaapelimalleja ja π -malleja vikaresistanssin ollessa 50 Ω .

Taulukossa 4.1 on esitetty em. verkkomalliin liittyviä, simuloimalla saatuja tuloksia. Taulukosta nähdään, että nolla-, myötä- ja vastaverkon reaktanssit kumoavat toisiaan ja vikaresistanssin osuus kokonaisimpedanssissa korostuu.

Taulukko 4.1 Esimerkki yliaaltotarkastelusta.

Taajuus		250	Hz
Nollaverkon resistanssi R_0		2	Ω
Myötäverkon resistanssi R_1		5	Ω
Vastaverkon resistanssi R_2		5	Ω
Nollaverkon reaktanssi X_0		-37	Ω
Myötäverkon reaktanssi X_1		24	Ω
Vastaverkon reaktanssi X_2		24	Ω
Summa $R_0+R_1+R_2 = R_{012}$		11	Ω
Summa $X_0+X_1+X_2 = X_{012}$		11	Ω
Vikaresistanssi R_f		50	Ω
Kokonaisimpedanssi viassa		162	Ω
Verkon yliaaltojännite u_5 ennen vikaa		240	V
Vikavirta i_5 vian aikana		4	A
Maadoitusjännite u_5 vian aikana		223	V

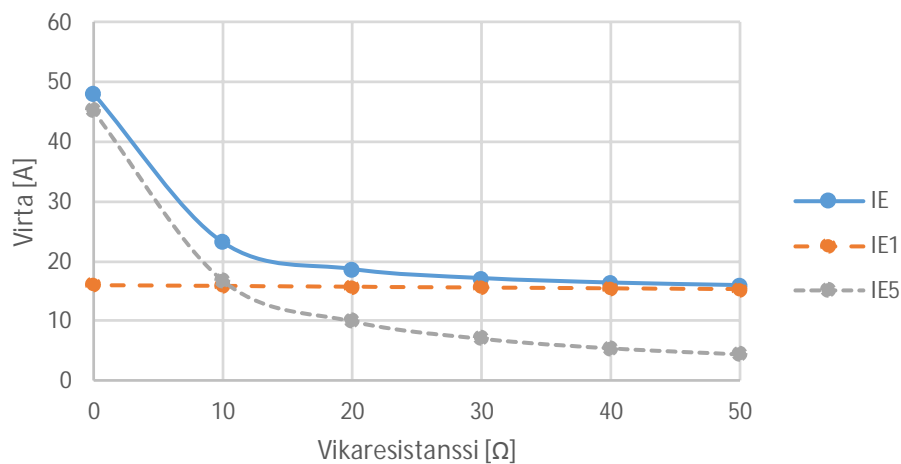
Kuvassa 4.3 on esitetty 5. yliaaltojännitteen U_5 vaikutus vastaavan taajuiseen maadoitusjännitteeseen U_{E5} ja vikavirtaan I_{E5} esimerkkitapauksessa. Normaaliutilassa 5. yliaallon U_5 suuruus on 2 % eli jännitteenä 240 V. Vikavirta I_{E5} on suurimmillaan, kun vikaresistanssi on pienin. Maadoitusjännite U_{E5} puolestaan kasvaa vikaresistanssin suurentuessa.



Kuva 4.3 5. yliaaltojännitteen U_5 vaikutus vastaavan taajuiseen maadoitusjännitteeseen U_{E5} ja vikavirtaan I_{E5} .

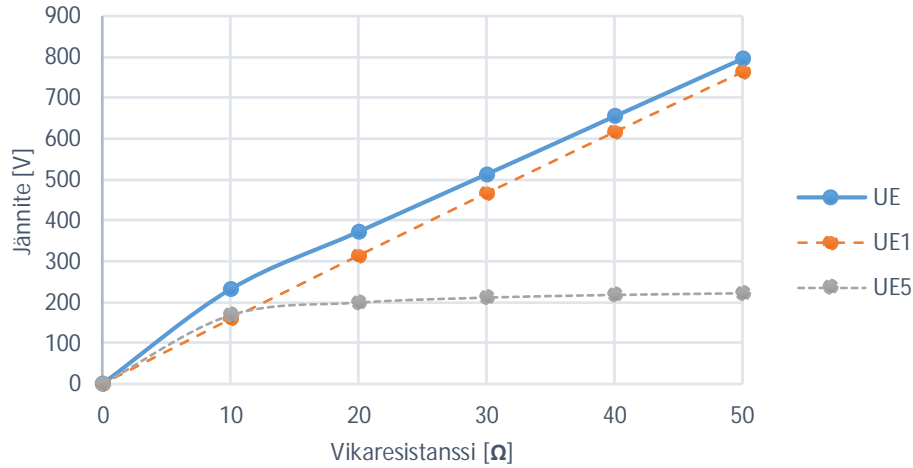
Maasulun kokonaisvikavirta muodostuu reaktiivisesta jäännösvirrasta, resistiivisistä sammuuslaitteistojen virroista ja muusta verkon pätövirrasta sekä yliaaltovirroista. Seuraavassa tarkastellaan vian aiheuttaman maavirran ja maadoitusjännitteen summautumista em. osatekijöistä.

Kuvassa 4.4 on tarkasteltu maadoitusjännitettä sähköaseman läheisyydessä esimerkiverkossa tapahtuvassa viassa. Kyseessä on sammutettu verkko. Kapasitiivinen maasulkuvirta on noin 200 A, kompensointiaste 95 % ja sammutuksen lisävastus 1200Ω . Jännitteessä on 2 % 5. yliaaltojännitettä. I_{E1} on perustaaajuinen 50 Hz virta ja I_{E5} on 5. yliaaltovirta. Kokonaisvirta I_E on em. virtojen summan tehollisarvo. Maavirta I_E on suurimmillaan pienillä vikaresistansseilla. Kokonaisvirrassa I_E yliaaltovirran suhteellinen merkitys pienenee vikaresistanssin kasvaessa.



Kuva 4.4 Maavirran I_E muodostuminen perustaaajuisesta virrasta I_{E1} ja yliaaltovirrasta I_{E5} .

Kosketusjännitevaatimusten kannalta maadoitusjännite on oleellinen tekijä. Kuvassa 4.5 on esitetty maadoitusjännitteiden kerrostuminen. Vikapaikassa oli ennen vikaa 2 % 5. yliaaltojännitettä. U_{E1} on perustaaajuinen 50 Hz maadoitusjännite, U_{E5} on maadoitusjännitteen 5. yliaaltojännite ja U_E on em. jännitteiden summan tehollisarvo. Maadoitusjännite U_E kasvaa ja yliaaltojännitteen U_{E5} suhteellinen merkitys pienenee vikaresistanssin kasvaessa. 2 % eli 240 V suuruinen 5. yliaaltojännite 20Ω vikaresistanssilla lisää maadoitusjännitettä noin 60 V eli 20 %. 50 W vikaresistanssilla vastaava vaikutus on noin 30 V eli 4 %.



Kuva 4.5 Maadoitusjännitteen U_E muodostuminen perustaajuisesta jännitteestä U_{E1} ja yliaaltojännitteestä U_{E5} .

Luvussa 2 on esitetty peruskaavat maavirran laskemiseksi. Oletetaan, että reduktiokerroin r maasulussa on 1. Tällöin maavirta $I_E = I_{RES}$ ja maadoitusjännite U_E saadaan maasulkuvirran ja maadoitusimpedanssin Z_E tulona:

$$|U_E| = |I_{RES}| \times |Z_E| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2} \times |Z_E| \quad (4.1)$$

Maadoitusjännite U_E muodostuu perustaajuisen maavirran I_{RES1} aiheuttamasta maadoitusjännitteestä U_{E1} ja yliaaltojännitteiden summan tehollisarvosta U_{EH} .

$$|U_E| = \sqrt{|U_{E1}|^2 + |U_{EH}|^2} \quad (4.2)$$

$$|U_{E1}| = |I_{RES1}| \times |Z_E| = \sqrt{|I_C + I_L|^2} \times |Z_E| \quad (4.3)$$

$$|U_{EH}| = |I_H| \times |Z_E| = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_{Eh}^2} \times |Z_E| = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_{Eh}^2} \quad (4.4)$$

Edellä esitettiin tarkasteluja yksinkertaisuuden vuoksi vain 5. yliaallon (250 Hz) osalta. Kaikkien haluttujen yliaaltojen summavaikutus maadoitusjännitteeseen voidaan periaatteessa laskea taajuus kerrallaan ja summaamalla edellä esitetyllä tavalla kaavojen 2.4 ja 4.2 – 4.4 mukaisesti. Oletetaan, että vikaimpedanssi Z_F on taajuudesta riippumaton maadoitusresistanssi R_F . Tällöin maadoitusjännite U_{Eh} voidaan laskea kullekin kertaluvun h yliaallolle seuraavalla kaavalla.

$$\underline{U}_{Eh} = \frac{3\underline{U}_h \cdot R_F}{Z_{h1} + Z_{h2} + Z_{h0} + 3R_F} \quad (4.5)$$

Kaavan 4.5 nimittäjän impedanssien summan itseisarvo on suurempi kuin osoittajan termi $3R_F$. Siksi vastaavan taajuinen maadoitusjännite U_{Eh} on pienempi kuin verkossa vikaa edeltänyt yliaaltojännite U_h . Siksi summautuvassa maadoitusjännitteessä harmoniset yliaaltojännitteet ovat pienempiä kuin syöttävän verkon jännitteessä. Harmoniselle kokonaissärölle $THDu$ saadaan:

$$THDu = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \underline{U}_h^2} > \sqrt{\sum_{i \neq 1} U_{Eh}^2} \quad (4.6)$$

Tällöin syöttävän verkon jännitesäröä $THDu$ voisi mahdollisesti käyttää turvallisella puolella olevana ylärajaestimaattina, mikäli harmonisia yliaaltojännitteitä otetaan huomioon maadoitusjännitteiden laskennassa.

Maadoitusjännitteelle U_E saadaan:

$$U_E = |\underline{U}_E| < \sqrt{|\underline{U}_{E1}|^2 + |THDu|^2} \quad (4.7)$$

Likimääräistetty maadoitusjännitetarkastelu, joka ottaa huomioon myös harmoniset jännitteet, voisi mennä em. perusteilla seuraavan algoritmin 1 mukaisesti:

Algoritmi 1

1. Määritetään sallittu kokonaismaadoitusjännite $U_{E_{max}}$ kosketusjännitevaatimusten perusteella.

$$2. U_E = \sqrt{|\underline{U}_{E1}|^2 + |\underline{U}_{EH}|^2} \quad (4.8)$$

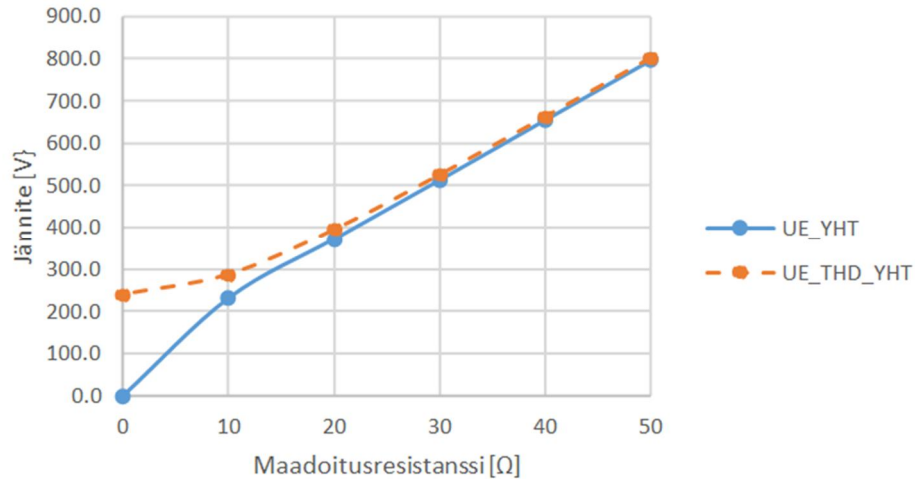
$$3. U_{E_{max}} \approx \sqrt{|\underline{U}_{E1_{max}}|^2 + THDu^2} \quad (4.9)$$

$$4. U_{E1_{max}} \approx \sqrt{U_{E_{max}}^2 - THDu^2} \quad (4.10)$$

Tämä tarkoittaisi sitä että, sallittu perustaajuinen maadoitusjännite $U_{E1_{max}}$ saisi olla enintään sallittu kokonaismaadoitusjännite $U_{E_{max}}$ vähennettynä jännitesäröllä $THDu$.

Em. menettely on esitetty tässä vain idea-asteella ja sen käyttökelpoisuuden arviointi edellyttäisi kattavampia jatkotarkasteluja. Taustalla on kuitenkin tarve kehittää riittävän yksinkertaisia menettelyjä käytännön tasolla sovellettavaksi.

Kuvassa 4.6 on esitetty 2 % jännitesärötarkastelua vastaavat maadoitusjännitteet 0 ... 50 Ω maadoitusresistansseilla. 20 ... 50 Ω maadoitusresistansseilla likimääräistetty menettely antaa vertailussa jonkin verran suurempia maadoitusjännitearvoja ja on siksi myös turvallisemmalla puolella edellyttäen pienempiä maadoitusresistansseja.



Kuva 4.6 Likimääräistetty jännitesärön vaikutus maadoitusjännitteeseen.

Kuvassa 4.6 UE_YHT on perustaajuisen maadoitusjännitteen ja verkon jännitesärön aiheuttaman maadoitusjännitteen summa. UE_THD_YHT on perustaajuisen maadoitusjännitteen ja verkon vikaa edeltävän jännitesärön summa.

Oletetaan edelleen, että reduktiokerroin r maasulussa on 1. Tällöin maavirta $I_E = I_{RES}$. Toinen tapa edetä likimääräisesti on esimerkiksi algoritmin 2 mukaisesti:

Algoritmi 2

$$1. \quad |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2} \quad (4.11)$$

$$2. \quad |I_H| = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_{Eh}^2} < \sqrt{\left(\frac{THDu}{Z_E}\right)^2}, \text{ missä } Z_E \text{ on maadoitusimpedanssi} \quad (4.12)$$

$$3. \quad |I_{RES_max}| \approx \sqrt{|I_C + I_L|^2 + \left(\frac{THDu}{Z_E}\right)^2} \quad (4.13)$$

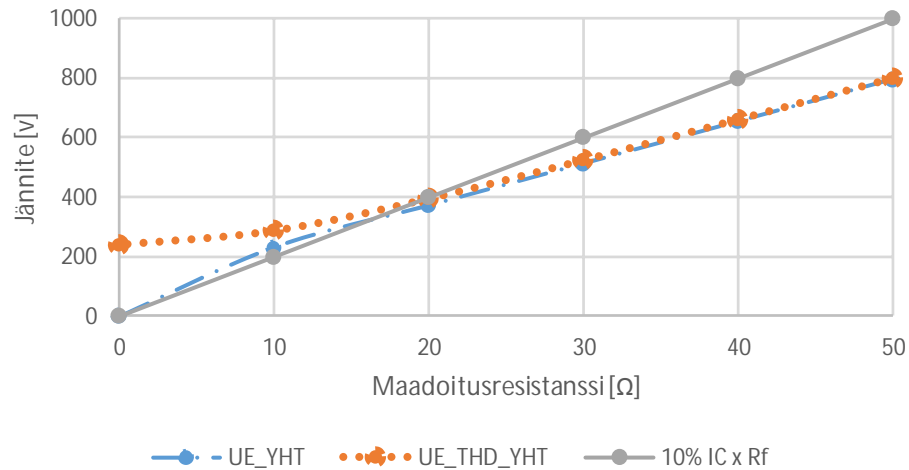
$$4. \quad U_{Emax} \approx |I_{RES_max}| \times Z_E \quad (4.14)$$

Tämä tarkoittaa, että syöttävän verkon jännitesäröä $THDu$ voisi mahdollisesti käyttää turvallisella puolella olevana ylärajaestimaattina, mikäli harmonisia yliaaltojännitteitä otetaan huomioon maasulun jäännösvirran ja maadoitusjännitteen laskennassa.

Standardin SFS6001 mukaan sammutetun verkon maadoitustarkasteluissa sovellettavia periaatteita ovat [1]:

- Lähtökohtana on maavirta, joka sisältää 50 Hz perustaajuiset kapasitiivisten, induktiivisten ja resistiivisten virtojen summan sekä eri taajuiset harmoniset virrat.
- Jos tarkkaa maavirran arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % kapasitiivisen virran arvosta I_C .
- Jos järjestelmä ei ole riittävän hyvin kompensoitu, yleistä arvoa 10 % I_C ei voi soveltaa ja jäännösvirran reaktiivinen/kapasitiivinen komponentti on lisäksi otettava huomioon.
- Sallittuja kosketusjännitevaatimuksia ei saa ylittää.

Kuvassa 4.7 on esitetty 2 % jännitesärötarkastelua vastaavat maadoitusjännitteet 0 ... 50 Ω maadoitusresistansseilla. Vertailukohtana on se, että maavirtana käytetään 10 % kapasitiivisen virran arvosta 200 A. 20 ... 50 Ω maadoitusresistansseilla 10 % I_C virta antaa vertailussa jonkin verran suurempia maadoitusjännitearvoja ja on siksi myös turvallisemmalla puolella edellyttäen pienempiä maadoitusresistansseja. Esimerkiksi sallitulla maadoitusjännitteellä 800 V suhde on 40 Ω / 50 Ω . Toisaalta paremman maadoituksen kustannus tulee suuremmaksi.



Kuva 4.7 Maadoitusjännitteiden vertailu

Kuvassa 4.7 UE_YHT on perustaajuisen maadoitusjännitteen ja verkon jännitesärön aiheuttaman maadoitusjännitteen summa. UE_THD_YHT on perustaajuisen maadoitusjännitteen ja verkon vikaa edeltävän jännitesärön summa. 10 % $I_C \times R_f$ on maadoitusjännite, joka on laskettu virralla 10 % kapasitiivisen virran arvosta I_C .

5. YHTEENVETO

Haja-asutusalueen kaapeliverkossa on tyypillisesti vähemmän lähtöjä, kuin taajamaverkoissa, mutta lähtöjen johtopituudet voivat olla suuria taajamaverkkoihin verrattuna. Perinteisen maasulkuanalyysin perusoletukset eivät ole kaikilta osin voimassa laajoissa kaapeliverkoissa. Pitkän kaapelilähdön tuottamassa maasulkuvirrassa voi olla kapasitiivisen komponentin lisäksi myös pätövirtaa suhteessa nollajännitteeseen, millä voi olla merkitystä kosketusjännitteiden kannalta.

Koska kaapeliosuuden tuottama pätövirtakomponentti riippuu sen nollaimpedanssin läpi kulkevan varausvirran suuruudesta, sitä voidaan pienentää hajautetun kompensoinnin avulla. Kaapelien nollaimpedanssin laskentaan vaikuttaa epävarmuustekijöitä, joita ei aina tunneta eksaktisti. Tällaisia tekijöitä ovat mm. maadoitusimpedanssit ja maaperän johtavuus. Lisäksi lähdön konfiguraatio vaikuttaa koko lähdön tuottamaan pätökomponenttiin maasulkutilanteissa.

Sammutetussa kaapeliverkossa verkon nollajännite jää värähtelemään maasulkuvian poistuttua kompensoinnin ja verkon maakapasitanssien määräämällä rinnakkaisresonanssiin resonanssitaajuudella. Nollajännitteen jälkivärähtelyn kesto kasvaa yleensä kaapeloinnin myötä, koska verkon vaimennus ei kasva samassa suhteessa kuin kapasitiivinen maasulkuvirta. Värähtelyn taajuus poikkeaa perustaajuudesta sitä enemmän, mitä kauempana resonanssivirityksestä kompensointi on vian poistuttua. Pelkästään hajautetusti kompensoidun verkon maasulkusuojaus perustuu yleensä summavirran loiskomponenttiin, jonka suunta voi kääntyä perustaajuutta pienemmillä värähtelytaajuuksilla. Jälkivärähtelyjen aiheuttamien haittojen kannalta on hyvä, jos verkon kompensointiaste on lähellä 100 %:a vian jälkeisessä tilassa. Verkon vaimennus vian poistumishetkellä on suurempi, mikäli lisäkuormitusvastus on tällöin kytkettynä.

Kun laajassa haja-asutusalueen verkossa siirrytään ilmajohtoverkosta maakaapeliverkkoon tai sekaverkkoon, verkon maakapasitanssien edustama impedanssi pienenee huomattavasti. Kun yliaaltolähteet syöttävät verkkoon harmonisia yliaaltovirtoja, verkon vaihejännitteet säröytyvät. Kun taajuus kasvaa, verkon maakapasitanssin edustama impedanssi pienenee kääntäen verrannollisesti taajuuteen nähden. Harmoninen jännitesärö riippuu epälineaaristen kuormien verkkoon syöttämisestä harmonisista virroista ja niiden kohtaamista impedansseista. Kyseessä on siis tilastollisesti kuormitusten mukaan vaihteleva suure. Tutkimuksessa harmonisia maasulkuvirtakomponentteja arvioitiin symmetrisiin komponentteihin perustuvan maasulkuteorian avulla.

Vaikka harmoninen maasulkuvirta pienenee vikaresistanssin kasvaessa, maadoitusjännite saavuttaa suurimman arvonsa huomattavasti nolaa suuremmalla maadoitusresistanssin arvolla.

Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen asetellut kosketusjännitevaatimuksiin. Epävarmuus kokonaisjännösvikavirran suuruuden osalta kohdistuu lähinnä harmonisiin yliaaltovirtoihin sekä verkon maasulussa tuottamaan resistiiviseen vikavirtakomponenttiin. Maasulkuvirran yliaaltojen ja vikavirran resistiivisen komponentin yleisemmän merkityksen arviointi kosketusjännitteiden kannalta edellyttäisi laajempien verkon jännitesärön seuranta-mittausten tekemistä useissa eri verkoissa.

Tavoitteena oli myös selvittää keskijänniteverkon yliaaltojen vaikutuksia vikavirtaan ja maadoitusjännitteisiin yksivaiheisen maasulun aikana. Avoimia kysymyksiä olivat, millainen vaikutus yliaaltovirroilla on ja miten niiden suuruutta voitaisiin arvioida ns. pahimmissa tilanteissa? Maasulun aikana esiintyviä harmonisia yliaaltojännitteitä ja -virtoja tutkittiin PSCAD simulointien avulla. Selvitettyjä asioita olivat maasulkuvirtapiirin kuvaus ja impedanssien muodostuminen, yliaaltojännitteiden vaikutus maasulussa maavirtaan ja maadoitusjännitteisiin, virtojen ja jännitteiden summautuminen sekä maadoitusjännitteen likiarvon arviointiin soveltuvan menetelmän kehityksen ideointi.

Yliaaltojännitteiden ja maadoitusimpedanssien suureneminen kasvattavat eri taajuuksien komponenttien summien tehollisarvoina muodostuvia maadoitusjännitteitä. Tavoitteena oli havainnollistaa ilmiötä esimerkkiverkossa. Mikäli tuloksia kuitenkin halutaan soveltaa yleisemmin, suositeltava tehtävänasettelu jatkoa varten olisi simulointien ja laskelmien oikeellisuuden varmistaminen useammilla tyyppiverkoilla. Tämä edellyttäisi jatkossa myös maasulkuihin liittyvän mittausaineiston hankkimista oikeista verkoista ja tulosten vertailua.

6. LÄHDELUETTELO

- [1] Suurjännitesähköasennukset (High-voltage electrical installations), SFS 6001, Suomen Standardoimisliitto SFS, SESKO ry, vahvistettu 10.8.2015, 4. painos, 156 s.
- [2] Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet (Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks), SFS-EN 50160, Suomen Standardoimisliitto, SESKO ry, vahvistettu 22.11.2010, 63s.
- [3] Frowein K., Schmidt U., Druml G. and Schegner P. New model for the calculation of harmonics in the residual earth fault current of medium voltage systems. Proceedings of the 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2017), Glasgow, Scotland, 12 - 15 June 2017, 5 p.
- [4] Schmidt U., Frowein K. and Druml G. New Method for Calculation of the Harmonics in the Residual Earth Fault Current in Isolated and Compensated Networks. Proceedings of 10th Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ2016) Conference, IEEE, 29 - 31 August 2016, Tallinn, Estonia, 5p.
- [5] Jorgensen H. J. Risks incident to harmonics in compensated MV networks. Proceedings of the 17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2003), Barcelona, Spain, 12 - 15 May 2003, 4 p.
- [6] Mäkinen A. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä, Raportti/Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos, 2016, 38 p.
- [7] Lakervi E. ja Partanen J. Sähkönjakelutekniikka. Otatiето, Helsinki, 2008, 285s.
- [8] Gulbrand A. Earth faults in Extensive Cable Networks, Licentiate thesis. Lund, Sweden, 2009, Lund University, 121p.
- [9] Blackburn J. L. Symmetrical Components for Power Systems Engineering. Marcel Dekker, Inc., 1993, New York, Otatiето, 427p.
- [10] VDE 0228, Teil 2, VDE-Bestimmung für Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen; Beeinflussung durch Drehstromanlagen. Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE), December 1987, 23 p. (in German)
- [11] Lehtonen, M., Hakola, T., Neutral earthing and power system protection - Earthing solutions and protective relaying in medium voltage distribution networks. ABB Transmit Oy, Vaasa, 1996, 118 p.

Liite 1: Maadoitusmittausaineisto

Aiemmassa Maadoitusjärjestelmät –hankkeessa maadoitusmittausaineistoa oli käytettävissä tyyppitapausten arviointia varten kolmesta eri verkkoyhtiöstä [6]:

1. Mittaustulokset yhtiö A:n yksittäisten puistomuuntamoiden maadoitusarvoista. Kohteet ovat erillisiä ilmajohdon alle rakennettuja puistomuuntamoita, jotka on kytketty alle 50 metrin keskijännitekaapelilla kiinni ilmajohtoon.
 - 166 kpl muuntamoita
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 16 W ja mediaani 11 W
 - 5 % muuntamoista yli 43 W

2. Yhtiön B tietoja kaapeliliitäntäisten puistomuuntamoiden maadoituksia.
 - 32 kpl
 - Maaperä pääosin hiekka/sora. Osin myös savi ja hiekkamoreeni.
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 8 W ja mediaani 7 W
 - 5 % muuntamoista yli 23 W

3. Yhtiön C muuntamot
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 17 W ja mediaani 11 W
 - 5 % muuntamoista yli 50 W

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 692
33101 Tampere